

Lech Lipiński, Mirosław Miszewski  
Pojazdy Szynowe PESA Bydgoszcz SA, Bydgoszcz

## WYZNACZANIE CHARAKTERYSTYK TRAKCYJNYCH POJAZDÓW KOLEJOWYCH Z ASYNCHRONICZNYMI NAPĘDAMI TRAKCYJNYMI

### DETERMINING TRACTION CHARACTERISTIC CURVES OF RAILWAY VEHICLES WITH TRACTION DRIVES WITH INDUCTION MOTORS

**Abstract:** For railway vehicles with electric traction drives with induction motors, it is necessary to determine traction characteristic curves of such a vehicle. Such a traction characteristic curve is essential to calculate all the static and dynamic parameters of the vehicle, such as maximum acceleration, maximum speed, time of approaching the maximum speed, and many others. For this purpose, one needs the original torque – speed characteristic of applied traction motors as well as both the wheel – rail adhesion coefficient and the train resistance as functions of the speed of the vehicle. It was taken into account of the three regions on the traction characteristic curve of the traction drive: the constant torque, the constant power, and the weakened power regions. Various formulas for the wheel – rail adhesion coefficient were compared and discussed. The method for considering the dispersion of real values of the adhesion coefficient was considered. Making use of all considerations, the resultant traction characteristic curves were created.

#### 1. Wstęp

W obecnych czasach głównym silnikiem napędowym pojazdów szynowych stał się silnik indukcyjny klatkowy. Wprawdzie czynione są próby wykorzystania do tego celu silników z magnesami trwałymi, jednak wiele przyczyn sprawiło, że pozycja silnika indukcyjnego jest w dalszym ciągu niezagrożona. Jednak parametry pojazdu trakcyjnego napędzanego silnikiem indukcyjnym zależą nie tylko od parametrów silnika. Ważną rolę odgrywa tarcie między kołem a szyną. Zjawisko to w sposób syntetyczny opisuje współczynnik przyczepności koło – szyna. Parametry trakcyjne pojazdu zależą także od oporów ruchu pojazdu.

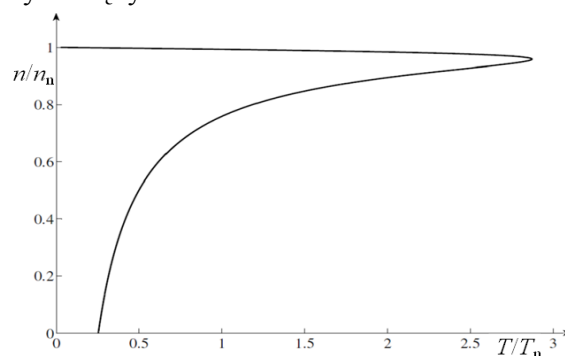
#### 2. Silnik indukcyjny jako silnik trakcyjny

##### 2.1. Parametry silnika a charakterystyka trakcyjna pojazdu

Podstawą do obliczeń charakterystyki trakcyjnej jest typowa charakterystyka mechaniczna silnika (rys. 1). Jednak charakterystyka trakcyjna uwzględnia dodatkowo następujące dane dotyczące napędu:

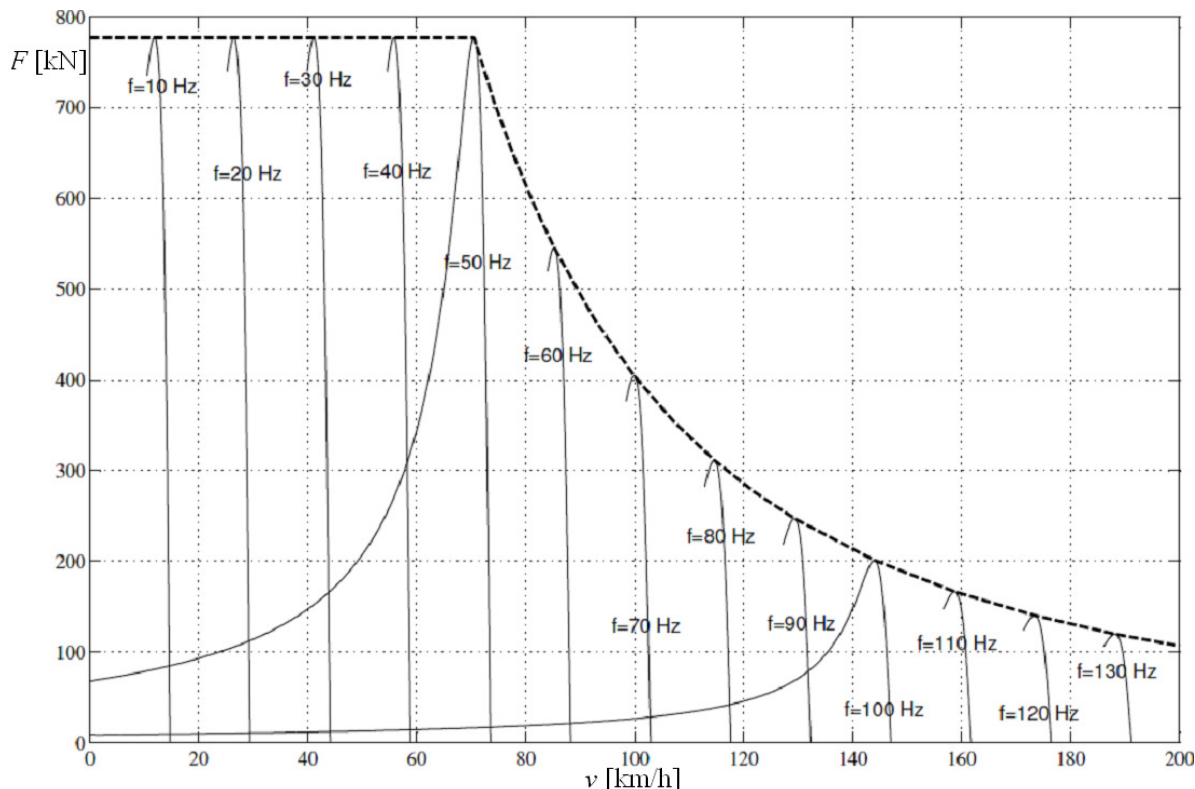
- $k$  – liczba silników w pojeździe szynowym,
- $i_g$  – przełożenie przekładni zainstalowanej między silnikiem a kołami pojazdu,
- $\eta_g$  – sprawność przekładni,
- $D$  – średnica koła pojazdu w m.

Do rozważań przyjmuje się tylko tę część charakterystyki mechanicznej, która jest położona między prędkością synchroniczną, a prędkością odpowiadającą poślizgowi krytycznemu. Poślizgi tej części charakterystyki spełniają warunek  $0 \leq s \leq s_k$ . W normalnych warunkach praca silnika trakcyjnego, zasilanego z falownika odbywa się tylko w takim zakresie.



Rys. 1. Charakterystyka mechaniczna silnika trakcyjnego klatkowego o mocy kilkuset kilowatów:  $n/n_s$  – wartość względna prędkości,  $T/T_n$  – wartość względna momentu obrotowego silnika

Warto tu zauważyć, że parametry trakcyjne pojazdu zależą też od średnicy kół pojazdu. Ta wartość nie jest stała, gdyż średnica kół zmniejsza się w trakcie eksploatacji pojazdów. Dlatego obliczenia charakterystyk trakcyjnych przeprowadza się albo dla średnicy maksymalnej, albo dla jej wartości średniej.



Rys. 2. Przeliczenie rodziny charakterystyk mechanicznych silnika trakcyjnego na graniczną charakterystykę trakcyjną pojazdu – charakterystykę siły utoyku

Niezależnie od tego, dla której wartości średnicy przeprowadza się obliczenia charakterystyk trakcyjnych, zawsze należy sprawdzić, czy wymagania trakcyjne pojazdu będą spełnione przy minimalnej średnicy kół.

Do wyznaczenia charakterystyki trakcyjnej przyjmuje się maksymalną moc, którą może rozwijać napęd. Jednym z celów wyznaczania takiej charakterystyki jest bowiem ocena współpracy koło – szyna, występująca przy eksploatacji pojazdu trakcyjnego, a możliwość wystąpienia poślizgów pojawia się dopiero przy większych mocach, rozwijanych przez napęd. Wartość maksymalnej mocy, którą może rozwijać napęd, przekracza zwykle wartość mocy napędu przy pracy ciągłej (S1). Zależy ona od trasy, na której będzie eksploatowany pojazd. Im dłuższy jest względny czas pracy napędu z mocą maksymalną, tym bardziej jej wartość zbliża się do mocy S1. Dokładną wartość mocy maksymalnej wyznacza się, symulując przejazd teoretyczne po danej trasie. Przy wstępnej analizie pracy napędu można założyć, że moc maksymalna odpowiada dawnej mocy jednogodzinnej silnika, jednak czasem może to być całkiem inną wartością.

Następnie przeprowadza się obliczenia charakterystyk mechanicznych przy różnych wartościach napięcia stojana i różnych częstotliwości. Dopóki wartość napięcia stojana nie przekroczy wartości znamionowej  $U_n$ , zmiana napięcia odbywa się w przybliżeniu przy zachowaniu  $U/f = \text{const}$ , natomiast po osiągnięciu wartości znamionowej  $U_n$  wartość napięcia stojana pozostaje stała. Dodatkowo prędkość obrotową silnika przelicza się na prędkość liniową pojazdu trakcyjnego  $v$  [km/h], a moment obrotowy rozwijany przez silnik na siłę trakcyjną pojazdu  $F$  [kN] [4]. Przy wyznaczaniu siły trakcyjnej pojazdu dodatkowo uwzględnia się sprawność przekładni  $\eta_g$ :

$$v = \frac{3\pi n D}{100 i_g}, \quad (1)$$

$$F = \frac{2 T k_i \eta_g}{D}, \quad (2)$$

przy czym:

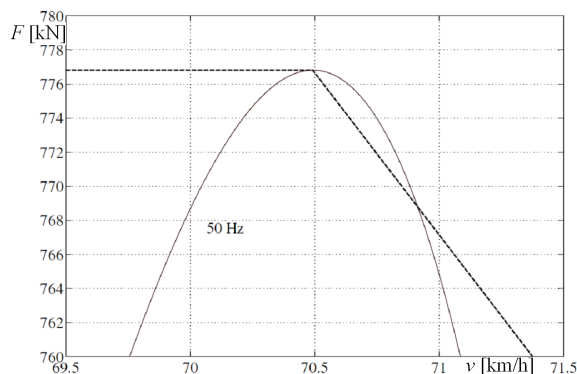
$n$  – prędkość obrotowa silnika w obr/min,

$T$  – moment obrotowy silnika w kNm.

Przy stosowaniu silników indukcyjnych do celów trakcyjnych stosowanie przekładni jest niezbędne, gdyż zastosowanie znajdują tu silniki co najwyżej 6-biegunowe. Przy większej liczbie biegunów pogarszają się znacznie parametry

ruchowe silnika. Powyższa uwaga nie dotyczy silników synchronicznych. W ich przypadku bowiem liczba biegunów nie wpływa znacząco na parametry silnika.

Dysponując taką rodziną charakterystyk, można charakterystyki mechaniczne pojedynczego silnika trakcyjnego przeliczyć na graniczną charakterystykę trakcyjną pojazdu, jaką jest charakterystyka siły utoyku napędu (rys. 2). W praktyce żaden napęd trakcyjny nie wytwarza sił trakcyjnych, odpowiadających momentowi utoyku silnika. Rzeczywistą charakterystykę trakcyjną pojazdu od góry ogranicza, albo krzywa łącząca punkty o wartościach siły określonych przez momenty utoyku poszczególnych charakterystyk mechanicznych silnika, albo krzywa maksymalnej siły przyczepności koło – szyna, zależnie od tego, która krzywa przebiega niżej. Od dołu zaś charakterystykę trakcyjną ogranicza charakterystyka oporów ruchu pojazdu. Trzeba wyraźnie podkreślić, że charakterystyka siły utoyku charakterystyk mechanicznych silnika nie jest ich obwiednią (rys. 3), chociaż często tak jest nazywana.



Rys. 3. Przebieg charakterystyki momentu utoyku i charakterystyki mechanicznej silnika przy  $f = 50 \text{ Hz}$

W strefie stałego momentu, czyli dla częstotliwości napięcia stojana od 0 do 50 Hz, przy zachowaniu  $U/f = \text{const}$ , moment utoyku silnika ma wartość stałą i równą (przy rezystancji stojana  $R_1 = 0$ ) [3]:

$$T_{\max n} = \frac{U_n^2}{2\omega_s X_\sigma}, \quad (3)$$

gdzie:

$U_n$  – napięcie stojana (międzyprzewodowe),  
 $\omega_s$  – prędkość kątowna synchroniczna silnika,  
 $X_\sigma$  – reaktancja rozproszenia silnika.

Bieżącą wartość momentu utoyku silnika przy wartościach napięcia i częstotliwości różnych

od znamionowych można wyznaczyć z zależności:

$$T_{\max} = T_{\max n} (\alpha_U / \alpha_f)^2, \quad (4)$$

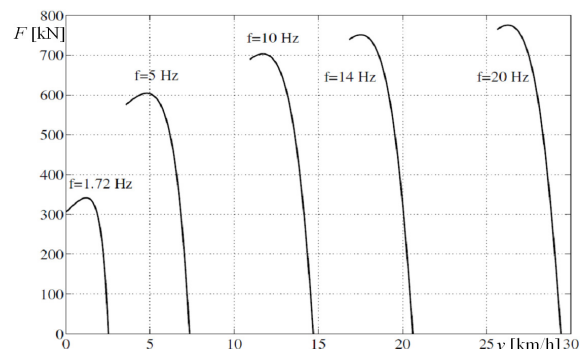
w której:

$T_{\max}$  – bieżąca wartość momentu utoyku,  
 $T_{\max n}$  – znamionowa wartość momentu utoyku,  
 $\alpha_U$  – względna wartość napięcia:  $U/U_n$ ,  
 $\alpha_f$  – względna wartość częstotliwości:  $f/f_n$ .

Z zależności (4) wynika, że powyżej strefy stałego momentu, gdy napięcie stojana jest stałe i równe znamionowemu, moment utoyku silnika zmniejsza się z kwadratem częstotliwości napięcia stojana.

## 2.2. Przebieg charakterystyki momentu utoyku rzeczywistego silnika

W rzeczywistym silniku, przy bardzo małych częstotliwościach, charakterystyka momentu utoyku silnika odbiega od charakterystyki, przedstawionej na rys. 2. Przy bardzo małych częstotliwościach napięcia stojana rośnie względna wartość rezystancji stojana i zaniebdanie jej przy obliczeniach prowadzi do nadmiernych błędów (rys. 4). Przedstawione na rys. 4 charakterystyki mechaniczne wyznaczone są przy założeniu, że prądy pobierane przez silnik nie przekraczają prądów pobieranych przez silnik przy zasilaniu napięciem o znamionowej wartości i częstotliwości.



Rys. 4. Typowy przebieg charakterystyki momentu utoyku przy małych częstotliwościach przy założeniu, że prądy silnika nie przekraczają prądów przy zasilaniu napięciem o znamionowej wartości i częstotliwości

W praktyce praca silnika przy bardzo małych częstotliwościach trwa, poza nielicznymi wyjątkami, bardzo krótko i często dopuszcza się przeciążenie silnika prądem w czasie rozruchu, jeżeli tylko pozwalają na to parametry przekształtnika trakcyjnego. Wtedy możliwe jest uzyskanie takich charakterystyk momentu utoyku jak na rys. 2.

### 3. Współczynnik przyczepności koło – szyna i opory ruchu pociągu

#### 3.1. Czynniki wpływające na siłę przyczepności pojazdu

Drugim, obok momentu utyku, czynnikiem ograniczającym od góry przebieg charakterystyki trakcyjnej pojazdu szynowego jest zjawisko przyczepności koło – szyna, które ujmuje współczynnik przyczepności  $\mu$ . Współczynnik przyczepności jest wielkością bezwymiarową. Jest to stosunek maksymalnej siły pociągowej, możliwej do rozwinięcia przez pojazd, do siły ciężkości, z którą osie pędne (napędzane przez silniki) pojazdu oddziałują na szynę. W przypadku lokomotywy, w której wszystkie osie są pędne, w wytwarzaniu siły pociągowej bierze udział cała masa lokomotywy. Natomiast w elektrycznych zespołach trakcyjnych zwykle tylko część osi pojazdu jest pędna i bierze udział w wytwarzaniu siły pociągowej. Pozostałe osie, tzw. toczne, są jednak wykorzystywane do wytwarzania siły hamującej. Oznacza to, że tylko część masy całkowitej pojazdu, spoczywającej na osiach napędnych i nazywanej masą napędną, bierze udział w wytwarzaniu siły pociągowej. Masa napędna może wynosić od 100% masy całkowitej pojazdu w przypadku pojazdów o napędzie rozproszonym ze wszystkimi osiami pędnymi (np. japoński Shinkansen) do kilkudziesięciu procent (np. 40% masy całkowitej w przypadku 4-członowego ELF-a z bydgoskiej PESY). Dodatkowo trzeba uwzględnić, że przy wjazdach na wzniesienia, nachylone pod kątem  $\beta$ , w wytwarzaniu siły pociągowej bierze udział tylko składowa siła ciężkości masy napędnej, która jest prostopadła do szyny. Ostatecznie więc można zapisać następujące wyrażenie na maksymalną siłę przyczepności pojazdu  $F_{ad\ max}$  [5]

$$F_{ad\ max} = m_N g \mu(v) \cos \beta, \quad (5)$$

w którym:

$m_N$  – masa napędna pojazdu,

$g$  – przyspieszenie ziemskie,

$\mu(v)$  – współczynnik przyczepności,

$\beta$  – kąt, pod którym wznosi się wzniesienie.

W celu ujednoczenia rozważań analizę parametrów trakcyjnych przeprowadza się zwykle dla toru poziomego, przy  $\beta = 0$ . Poza tym dla wzniesień o pochyleniu  $S \leq 50\%$  mamy

$$\cos \beta = \cos(\arctg S) \geq 0,999 \approx 1.$$

Tak więc nawet w przypadku tras o nachyleniu do  $S \leq 50\%$  wyrażenie (5) można uprościć do postaci

$$F_{ad\ max} = m_N g \mu(v). \quad (6)$$

Aby wyznaczyć tę siłę, konieczna jest znajomość wartości współczynnika przyczepności  $\mu(v)$  jako funkcji prędkości pojazdu.

#### 3.2. Zależność współczynnika przyczepności od prędkości pojazdu

Wyrażenia na  $\mu(v)$  w większości pochodzą z połowy ubiegłego stulecia. W Polsce najczęściej są stosowane aproksymacje  $\mu(v)$  według wzorów podanych przez Parodiego oraz Curtiusa i Knifflera [1, 2, 4, 5].

Wyznacza się je z następujących zależności:

- według Parodiego:

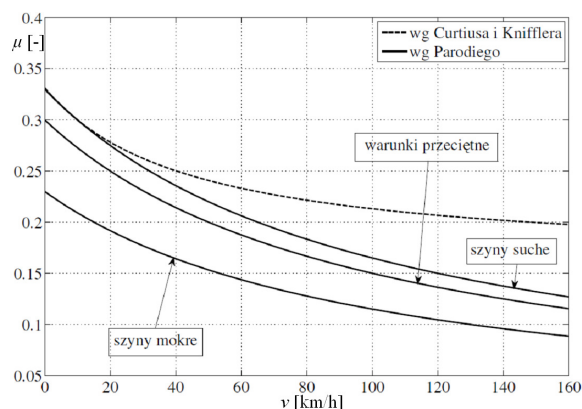
$$\mu(v) = \frac{\mu_0}{1 + 0,01v}, \quad (7)$$

w którym  $\mu_0$  wynosi 0,23 – 0,30 – 0,33 w zależności od stanu szyn (mokre – warunki przeciętne – suche),

- według Curtiusa i Knifflera

$$\mu(v) = \frac{7,5}{44 + v} + 0,161. \quad (8)$$

Jak widać (rys. 5) wartości  $\mu(v)$  różnią się znacznie w zależności od użytej aproksymacji. Ponadto były one opracowywane dla prędkości do 120 km/h i ich zastosowanie powyżej tej prędkości jest nieuzasadnione. Należy tu dodać, że współczynnik przyczepności zależy nie tylko od obecności wody na torach. Na jego wartość duży wpływ mają na przykład opadłe liście i inne zanieczyszczenia znajdujące się na torach.



Rys. 5. Zależność współczynnika przyczepności  $\mu(v)$  od prędkości pojazdu

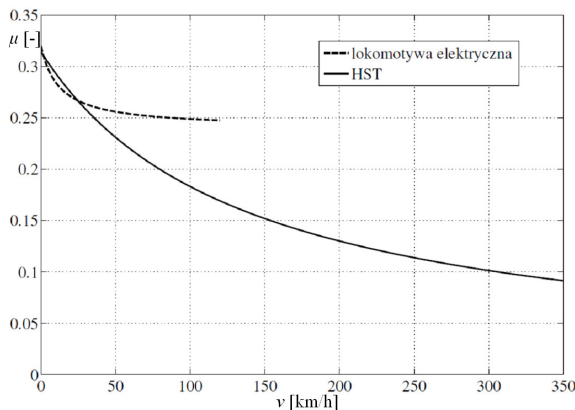
Pewne pojęcie o błędach występujących przy większych prędkościach dają badania uczonych chińskich, wykonane na trasach szybkiej kolei chińskiej [6]. Porównali oni aproksymację stosowaną na kolejach chińskich dla lokomotyw elektrycznych przy prędkościach do 120 km/h,

$$\mu(v) = \frac{8}{100 + 8v} + 0,24 \quad (9)$$

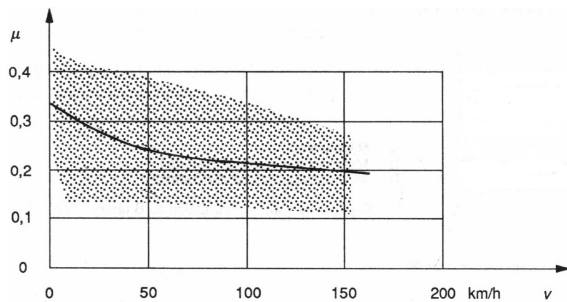
z wyznaczoną przez nich – na podstawie własnych badań – aproksymacją dla pociągów dużej prędkości (HST – *High Speed Train*)

$$\mu(v) = \frac{13}{42 + 0,31v} + 0,005 \cdot \quad (10)$$

Oba wykresy przedstawiono na rys. 6. Jak widać, tylko początkowe przebiegi charakterystyk mniej więcej się pokrywają. Powyżej prędkości 30 km/h obie charakterystyki zaczynają się różnić i to znacznie.



Rys. 6. Zależność współczynnika przyczepności  $\mu(v)$  od prędkości pojazdu dla lokomotywy elektrycznej i dla pociągów dużej prędkości (HST) według badań chińskich [6]



Rys. 7. Zakres zmienności pomierzonych (rzeczywistych) wartości współczynnika przyczepności według Curtiusa i Knifflera w zależności od warunków występujących na styku koło – szyna [1]

Trzeba też pamiętać, że podane wyrażenia opisują tylko jakąś średnią wartość współczynnika przyczepności. W określonych warunkach równie prawdopodobna jest każda inna wartość tego współczynnika, leżąca w pewnym paśmie, obejmującym wartości powyżej i poniżej krzywej, wyznaczonej na podstawie wzoru (rys. 7) [1, 5]. Dokładna wartość zależy od warunków panujących między kołem, a szyną (woda, zanieczyszczenia szyn, obecność piasku itp.).

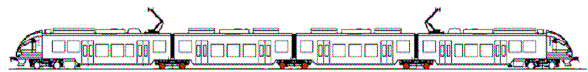
Tak więc bardzo ważnym problemem dla konstruktora pojazdu szynowego staje się pytanie, który przebieg współczynnika przyczepności przyjąć do obliczeń i z jakim prawdopodobieństwem traktować wyznaczone wartości współczynnika przyczepności.

### 3.3. Maksymalna siła przyczepności pojazdu

Jak wynika z zależności (6) maksymalna siła przyczepności pojazdu zależy od współczynnika przyczepności oraz od masy napędnej pojazdu. W przypadku lokomotywy o wszystkich osiach pędnych masa napędna jest równa masie całkowitej lokomotywy. Natomiast masę napędną elektrycznych zespołów trakcyjnych z napędem skupionym można w przybliżeniu wyznaczyć, znając całkowitą masę  $m$  i całkowitą liczbę osi  $n$  pojazdu, oraz liczbę osi pędnych  $n_p$ , ze wzoru

$$m_N = m \frac{n_p}{n} \quad (11)$$

Jednak takie postępowanie jest uzasadnione tylko w tych przypadkach, w których masa całkowita pojazdu jest równomiernie rozłożona na wszystkie osie pojazdu. W większości przypadków tak niestety nie jest. EZT pokazany na rys. 8 o układzie osi Bo'-(2')-(2')-(2')-Bo' <sup>1</sup> ma znacznie bardziej obciążone oba skrajne wózki, gdyż w przedniej części pojazdu umieszczono przekształtniki trakcyjne, a także dodatkowo, w skrajnych wózkach EZT-a zamontowano silniki trakcyjne. W takich przypadkach masę napędną pojazdu należy wyznaczać indywidualnie jako masy napędne dla każdego zestawu kołowego na podstawie znajomości rozmieszczenia mas na pokładzie i dachu pojazdu, pod jego podłogą oraz w wózkach.



Rys. 8. Przykład elektrycznego zespołu trakcyjnego (EZT), wykorzystujący wózki wspólne, czyli tak zwane wózki Jacobsa

Dla przykładu wyznaczmy maksymalną charakterystykę siły przyczepności pojazdu, którego charakterystyki momentu utyku napędu trakcyjnego pokazano na rys. 2. Do obliczeń przyjęto aproksymację współczynnika przyczepności według Curtiusa i Knifflera, zakła-

<sup>1</sup> Bo' – oznacza dwie osie napędne, zgrupowane w jednym wózku, przy czym każdy zestaw kołowy napędzany jest oddzielnym silnikiem; (2') – oznacza dwie osie toczne, zgrupowane w jednym wózku wspólnym (Jacobsa) [4]

dając, że masa całkowita pojazdu wynosi 88 t i jest równa jego masie napędnej. Takie parametry odpowiadają czteroosiowej lokomotywie o układzie osi Bo'-Bo', o masie 88 t, równomiernie rozłożonej na wszystkie osie.

Możliwa do uzyskania charakterystyka trakcyjna tego napędu musi leżeć w całym zakresie prędkości zarówno poniżej charakterystyki siły utoyku, jak i poniżej charakterystyki maksymalnej siły przyczepności. Jak to zaznaczono w poprzednim podrozdziale, przebieg charakterystyki maksymalnej siły przyczepności ma charakter orientacyjny i w praktyce często spotyka się przypadki, że charakterystyka trakcyjna pojazdu przecina charakterystykę maksymalnej siły przyczepności. Trzeba pamiętać o tym, że charakterystyka maksymalnej siły przyczepności ma charakter pasma, podobnie jak charakterystyka współczynnika przyczepności, na podstawie którego powstała, i że poślizg może wystąpić nawet w przypadku, gdy charakterystyka trakcyjna leży poniżej charakterystyki maksymalnej siły przyczepności. Dlatego nowoczesne pojazdy szynowe wyposaża się zarówno w układy regulacji poślizgu (*slip – slide control*) umieszczone w układzie sterowania przekształtnika trakcyjnego, jak i w piasecznice, które sypiąc piasek na szyny, pozwalają chwilowo zwiększyć wartość współczynnika przyczepności.

### 3.4. Opory ruchu pociągu

Podstawowe opory ruchu pociągu  $W_f$  na prostym, poziomym odcinku torów aproksymuje się w praktyce za pomocą trójmianu kwadratowego:

$$W_f = c_0 + c_1 v + c_2 (v + v_w)^2, \quad (12)$$

w którym wielkość  $v_w$  – prędkość wiatru występuje tylko w składniku zależnym od kwadratu prędkości [1, 4, 5]. Często ze względu na małą wartość przyjmuje się, że  $c_1 = 0$ . Różne zarządy kolejowe stosują różne wartości współczynników w wyrażeniu na opory jazdy [2, 4, 5]. Dla określonego pociągu podstawowe opory jazdy można wyznaczyć w praktyce metodą regresji. We wszystkich podanych niżej wzorach siła oporu  $W$  wyrażona jest w N, natomiast masa pojazdu  $m$  w t, a  $g = 9,81 \text{ m/s}^2$  – oznacza wartość przyspieszenia ziemskiego.

Na liniach DB AG podstawowe opory ruchu nowoczesnych, towarowych pociągów ekspre-

sowych  $W_f$  wyznacza się z zależności podanej przez Strahla [4]:

$$W_f = mg[1,0 + 0,0002(v + v_w)^2]. \quad (13)$$

W celu wyznaczenia całkowitych oporów jazdy wyrażenie (13) należy uzupełnić o zależności określające dodatkowe opory jazdy na zakrętach i wzniesieniach, a także w tunelach oraz o opór jazdy, spowodowany przyspieszaniem pociągu.

Dodatkowy opór na zakrętach można wyznaczyć ze wzoru stosowanego przez SNCF [4]

$$W_{\text{cur}} = mg \frac{C}{R}, \quad (14)$$

w którym,  $C=800$ ,  $R$  oznacza promień zakrętu w m.

Dodatkowy opór spowodowany wzniesieniem opisany jest równaniem [4, 5]

$$W_s = mgS, \quad (15)$$

w którym  $S$  oznacza nachylenie wzniesienia w ‰.

W dodatkowym oporze ruchu spowodowanym przyspieszeniem uwzględnia się dodatkową inercję spowodowaną wirowaniem takich elementów pojazdu, jak przekładnie, wirniki silników trakcyjnych, zestawy kołowe itp. W celu ich uwzględnienia stosowany jest tzw. dodatek na masy wirujące  $m_{\text{rot}}$ , który jest dodawany do rzeczywistej masy pojazdu. Jest on zwykle definiowany jako pewien procent  $\xi$  masy własnej pojazdu  $m_0$ . Współczynnik  $\xi$  zależy od rodzaju pojazdu i wynosi: 3% w przypadku wagonów, 7% w przypadku EZT-ów i 30% w przypadku lokomotyw elektrycznych [4, 5]. Dodatek na masy wirujące  $m_{\text{rot}}$  oblicza się ze wzoru

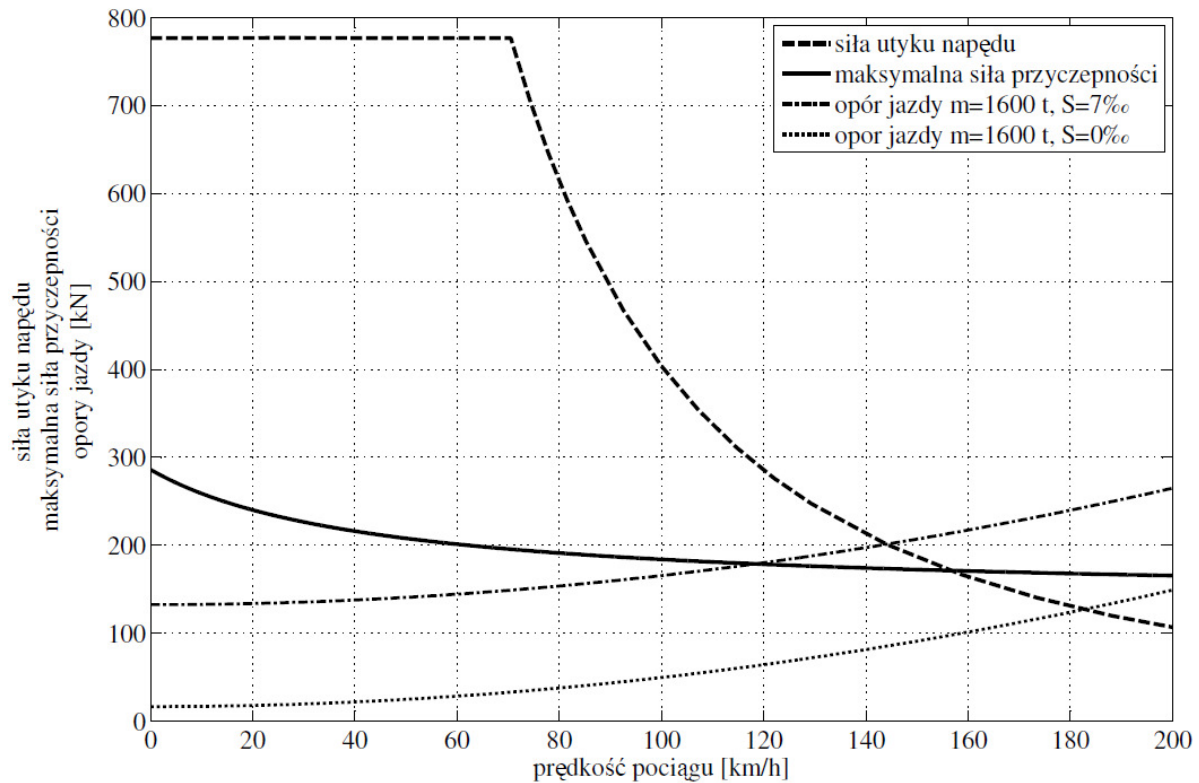
$$m_{\text{rot}} = m_0 \xi / 100. \quad (16)$$

Zatem ostateczne wyrażenie na dodatkowy opór ruchu spowodowany przyspieszaniem pociągu  $W_{\text{acc}}$  ma postać:

$$W_{\text{acc}} = a(m + m_{\text{rot}})10^3, \quad (17)$$

w którym  $a$  to przyspieszenie pojazdu w  $\text{m/s}^2$ .

Dla ujednoczenia danych i umożliwienia porównywania pojazdów różnych producentów zwykle opory ruchu określa się dla prostych odcinków tras o różnych nachyleniach. Przykładową charakterystykę oporów jazdy (trakcji) na prostym odcinku trasy o nachyleniu 0‰ i 7‰ pokazano na rys. 9. Do jej wyznaczenia wykorzystano zależności (13) i (15). Oprócz masy wagonów tego pociągu – 1600 t uwzględniono też masę lokomotywy, wynoszącą 88 t.



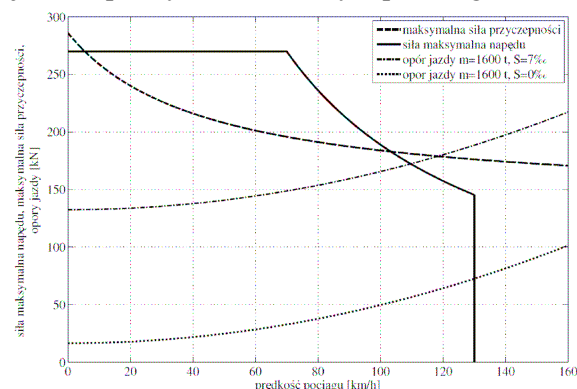
Rys. 9. Charakterystyka siły utoyku napędu, maksymalna siła przyczepności według Curtiusa i Knifflera i opory jazdy w funkcji prędkości pojazdu

#### 4. Charakterystyka trakcyjna pojazdu

Przeprowadzone dotychczas rozważania pozwalają skonstruować charakterystykę trakcyjną pojazdu. Możliwe są tu dwa rozwiązania. W pierwszym na charakterystyce trakcyjnej występuje strefa stałej siły trakcyjnej (stałego momentu), która leży poniżej charakterystyki siły przyczepności lub też ją przecina (rys. 10). Jest to typowa i często spotykana charakterystyka trakcyjna lokomotyw towarowych o masie  $80 \div 90$  t [4, 7]. Zwykle projektanci nie obawiają się takiego, jak na rys. 10, przebiegu charakterystyki trakcyjnej, ponieważ, jak już wspomniano, napędy trakcyjne wyposaża się w układy likwidacji poślizgu (*slip – slide control*) oraz w piasecznice. Ponadto taki właśnie przebieg charakterystyki trakcyjnej uzasadnia wcześniej podaną informację, aby charakterystykę siły przyczepności traktować jako przebieg przybliżony, pokazujący tylko charakter zmienności tego współczynnika, a nie jego dokładną wartość.

W drugim rozwiązaniu początkowy przebieg charakterystyki trakcyjnej jest w przybliżeniu zgodny z przebiegiem charakterystyki przyczepności, czyli początkowy przebieg charakterystyki opada, dając w rezultacie większą

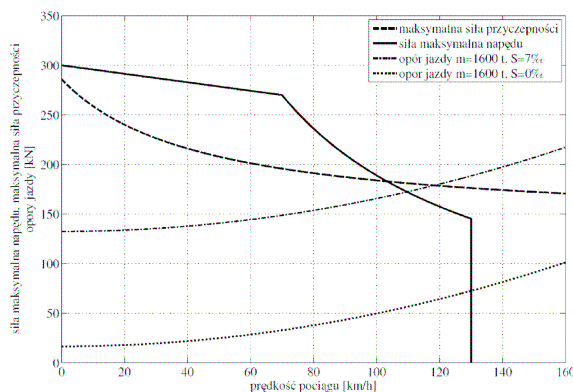
wartość siły trakcyjnej przy ruszaniu (przy prędkości  $v = 0$  km/h). Na tego typu charakterystyce trakcyjnej praktycznie nie występuje strefa stałego momentu (stałej siły trakcyjnej). Taka charakterystyka ułatwia ruszanie z miejsca, zwłaszcza pociągom towarowym. Trzeba zauważyć, że nowoczesne, mikroprocesorowe układy sterowania napędów trakcyjnych pozwalają uzyskać charakterystykę trakcyjną pojazdu o praktycznie dowolnym przebiegu.



Rys. 10. Przykładowa charakterystyka trakcyjna lokomotywy z typową strefą stałego momentu

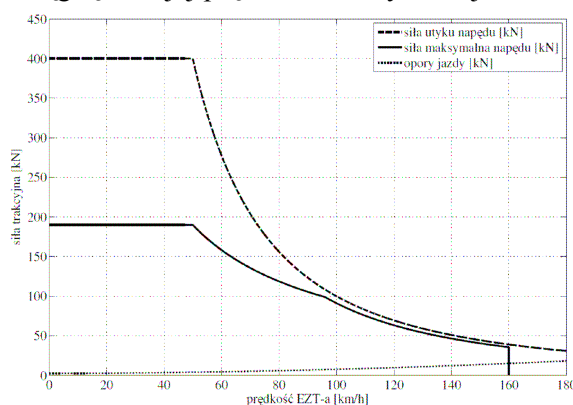
Również i w tym przypadku charakterystyka trakcyjna lokomotywy przebiega w początkowych strefach, do prędkości ok. 100 km/h powyżej charakterystyki maksymalnej siły przy-

czepności. W przypadku lokomotyw 4-osio- wych taka charakterystyka trakcyjna jest znacznie częściej stosowana w porównaniu z charakterystyką trakcyjną z typową strefą stałego momentu.



Rys. 11. Przykładowa charakterystyka trakcyjna lokomotywy ze zmodyfikowaną strefą stałego momentu

Charakterystyka trakcyjna pojazdu jest niezbędna do określenia niektórych parametrów trakcyjnych pojazdu, np. jego prędkości maksymalnej na określonej trasie, ponieważ zarówno siła trakcyjna, jak i siła oporu jazdy nie jest stała i zależy od prędkości. Jak widać (rys. 11), lokomotywa ciągnąc wagony o masie 1600 t na wzniesienie 7‰, nie jest w stanie osiągnąć swojej prędkości maksymalnej.



Rys. 12. Przykładowa 3-strefowa charakterystyka trakcyjna EZT-a ze strefą ograniczania mocy

W przypadku EZT-ów, w których przeciążalność napędu trakcyjnego w strefie stałego momentu jest mniejsza niż ma to miejsce w przypadku lokomotywy, dochodzi ograniczenie spowodowane przebiegiem charakterystyki momentu utyku napędu. Występuje tu konieczność ograniczania mocy przy największych prędkościach, gdy bieżąca przeciążalność silnika zmniejsza się do wartości  $1,1 \div 1,2$

(rys. 12). Moment maksymalny rozwijany przez napęd nie może być w żadnym punkcie charakterystyki trakcyjnej większy od momentu utyku napędu. Jeżeli ten warunek nie będzie spełniony, to silnik przejdzie do pracy przy poślizgach większych od poślizgu krytycznego i silnik trakcyjny jako obiekt regulacji utraci sterowalność.

## 5. Wnioski

W artykule opisano sposób wyznaczania charakterystyki trakcyjnej napędów asynchronicznych, stosowanych w pojazdach kolejowych. Do wyznaczenia charakterystyki trakcyjnej niezbędne są charakterystyki mechaniczne silnika trakcyjnego oraz parametry trasy i pojazdu, określone przez charakterystykę maksymalnej siły przyczepności koło – szyna oraz opory ruchu pojazdu. Charakterystyka trakcyjna pojazdu jest konieczna do wyznaczenia podstawowych parametrów statycznych i dynamicznych pojazdu.

## 6. Literatura

- [1]. Filipović Ž.: *Elektrische Bahnen. Grundlagen, Triebfahrzeuge, Stromversorgung*. 4., überarbeitete Auflage mit 150 Abbildungen, Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York 2005.
- [2]. Kacprzak J.: *Teoria trakcji elektrycznej. Materiały do projektowania*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 1996.
- [3]. Leonhard W.: *Control of Electrical Drives*. 3<sup>rd</sup> Edition. Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York 2001.
- [4]. Steimel A.: *Electric Traction – Motive Power and Energy Supply. Basics and Practical Experience*. Oldenbourg Industrieverlag GmbH, München 2008.
- [5]. Wende D.: *Fahrdynamik der Schienenverkehrs*. B. G. Teubner Verlag/GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden 2003
- [6]. Zhang W. et al.: *Wheel/rail adhesion and analysis by using full scale roller rig*. WEAR 253, 2002, pp. 82-88.
- [7]. Wolfram T.: *Elektryczne lokomotywy pociągowe – stan rozwoju*. Technika Transportu Szynowego nr 11, 2003, ss. 17-32

## Autorzy

mgr inż. Lech Lipiński  
e-mail: lech.lipinski@pesa.pl  
tel. (0)52 339 13 70  
dr inż. Mirosław Miszewski  
e-mail: miroslaw.miszewski@pesa.pl  
tel. (0)52 339 13 77  
Pojazdy Szynowe PESA Bydgoszcz SA  
ul. Zygmunta Augusta 11, 85-082 Bydgoszcz