

Jan Anuszczyk, Kacper Sokół, Adam Wawrzyniak
Politechnika Łódzka, Łódź

ANALIZA PARAMETRÓW TRAKCYJNYCH POCIĄGÓW DUŻYCH PRĘDKOŚCI

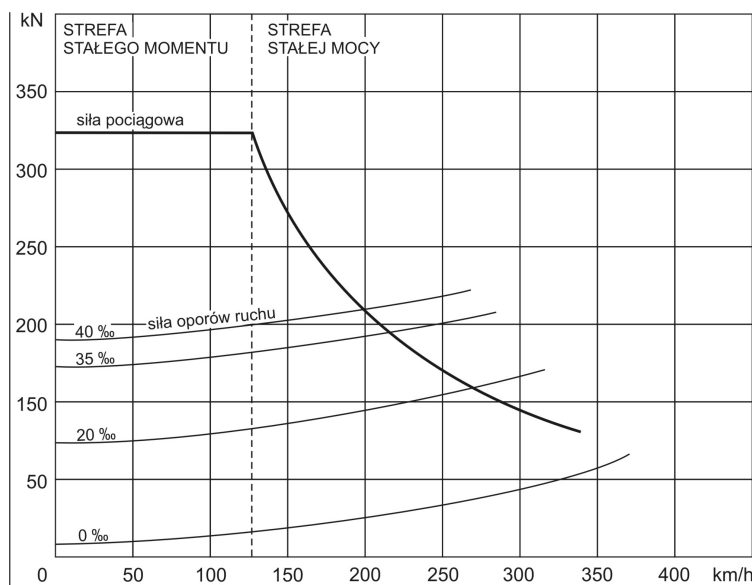
ANALYS OF TRACTION PARAMETERS OF HIGH SPEED TRAINS

Abstract: The current “Governmental Program of Construction and Operation of High Speed Railway in Poland” develops. Is analyzed for routing high-speed rail and widely understood aspects of power and infrastructure. Next steps include selection of stock for a new line (the line Y). Worldwide industry today has a wide range of high-speed trainsets. The article presents an analysis of traction characteristics of existing stock.

1. Wstęp

Charakterystyka trakcyjna pociągu przedstawia przebieg zakresu dostępnego momentu (lub siły pociągowej) w funkcji jego prędkości, (rys. 1). Jest to podstawowa zależność służąca do oceny właściwości pojazdu szynowego. Dodatkowo na charakterystykach trakcyjnych nanosi się krzywe oporów ruchu obrazujące sumaryczną siłę oporów wynikającą z oporów toczenia na styku koło-szyna, oporów w łożyskach osiowych i łożyskach napędów trakcyjnych, oporów w przekładniach, oporów profilu linii (podjazdy i spadki, łuki) oraz oporów aerodynamicznych. Krzywe oporów ruchu mają kształt paraboli. Wynika to z przeważającej roli oporów aerodynamicznych proporcjonalnych

do kwadratu prędkości pociągu. Obliczając ogólne krzywe oporów ruchu przyjmuje się wartość prędkości wiatru czołowego równą 0 m/s. Krzywe oporów różnicuje się w zależności od profilu podłużnego linii (podjazdy i spadki) wyrażanego w promilach. Wartość pochylenia podłużnego określa się jako stosunek wzniosu lub spadku linii kolejowej podanego w metrach do długości tego odcinka w kilometrach. Np. tor wznoszący się o 10 m na długości 0,5 km ma pochylenie o wartości 20‰. Pochylenia podłużne linii dużych prędkości zazwyczaj nie przekraczają wartości 40‰. Nadwyżka siły pociągowej ponad siłę oporów ruchu jest wykorzystana do przyspieszenia pojazdu.



Rys. 1. Przykładowa charakterystyka trakcyjna pociągu dużych prędkości

W punkcie przecięcia krzywej siły oporów poruszał się z maksymalną prędkością możliwą do osiągnięcia na torze o danych parametrach.

Każdą charakterystykę trakcyjną możemy podzielić na dwie strefy: strefę stałego momentu i strefę stałej mocy. W strefie stałego momentu siła pociągowa nie zmienia się lub maleje liniowo (w przypadku nieliniowej charakterystyki momentu w funkcji prądu). W strefie tej wraz ze wzrostem prędkości napędów wzrasta moc przekazywana na koła aż do pewnej prędkości granicznej przy której moc osiąga swoje maksimum. W strefie stałej mocy siła pociągowa (także moment napędów) maleje według krzywej hiperbolicznej, co jest spowodowane utrzymaniem stałej mocy przy wciąż rosnącej prędkości (moment maleje proporcjonalnie do wzrostu wartości prędkości).

Dla pociągów wielosystemowych przedstawiane są wariantowe krzywe siły pociągowej dla zasilania z sieci trakcyjnych o różnych wartościach (1,5 kV, 3 kV, 15 kV i 25 kV) i charakterze napięcia (AC, DC).

2. Przegląd charakterystyk istniejących pojazdów

Poniżej przedstawiono opis wybranych zespołów trakcyjnych dużych prędkości wraz z ich charakterystykami trakcyjnymi.

2.1. Pociągi ETR 500



Rys. 2. Pociąg ETR 500, [1]

Rodzina pociągów ETR 500 (Pendolino) – rysunek 2, jest produkowana przez włoską fabrykę Pininfarina od 1992 roku. Najnowsze składy produkowane od 2000 roku składają się z 12 wagonów i posiadają 671 miejsc siedzących. Prędkość konstrukcyjna zestawu wynosi 300 km/h. Pociąg przystosowany jest do współ-

pracy z siecią trakcyjną o napięciu 3 kV DC oraz 25 kV 50 Hz AC. Charakterystykę trakcyjną tego zespołu prezentuje rysunek 10a).

2.2. Pociągi AGV



Rys. 3. Pociąg AGV, [2]

Pociąg AGV to prototypowa konstrukcja koncernu Alstom o prędkości konstrukcyjnej 360 km/h. Skład nawiązuje do poprzednich francuskich rozwiązań (m.in. wózki Jacobsa). Posiada on jednak bardzo charakterystyczny wyróżnik jakim jest napęd rozproszony tzn. osie napędzane w całym składzie pociągu (w rozwiązaniach poprzednich napęd był skupiony w wagonach silnikowych na początku i końcu składu). Nowatorskie jest także zwiększenie liczby systemów hamulcowych o hamulec wiroprądowy wytracający energię hamowania poprzez indukcyjne nagrzewanie szyn pod pociągiem.

Zgodnie z założeniami skład powinien posiadać 460 miejsc siedzących i być dostosowany do współpracy z siecią trakcyjną o napięciu 1,5 kV i 3 kV DC oraz 15 kV i 25 kV 50 Hz AC. Charakterystykę trakcyjną tego zespołu prezentuje rysunek 10 b).

2.3. Pociągi ICE 3

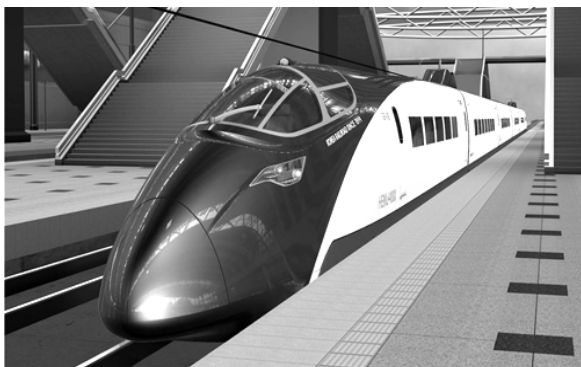


Rys. 4. Pociąg ICE 3, [3]

Konstrukcja pociągu ICE 3 produkcji koncernu Siemens była wzorcem do projektu składów VELARO. Zespoły o prędkości konstrukcyjnej

330 km/h są produkowane od 1997 roku i posiadają 425 miejsc siedzących (91 miejsc w pierwszej klasie i 334 w drugiej klasie). Charakterystykę trakcyjną tego zespołu prezentuje rysunek 10 c).

2.4. Pociągi HEMU-400X



Rys. 5. Pociąg HEMU-400X, [4]

Pociąg HEMU-400X to prototypowy skład produkowany przez Koreę Południową dla potrzeb sieci KTX (Korea Train Express). Projekt rozpoczął się w lipcu 2007 roku. Pociąg ma napędzane wszystkie zestawy kołowe czterech środkowych członów. Ośmio-wagonowy skład mierzy 197,6 m długości i zawiera 378 miejsc siedzących. Pociąg jest przystosowany do współpracy z siecią trakcyjną o napięciu 25 kV 50 Hz AC. Charakterystykę trakcyjną tego zespołu prezentuje rysunek 10d).

2.5. Pociągi TGV POS



Rys. 6. Pociąg TGV POS, [5]

Na kolejach francuskich (SNCF) zespoły te są oznaczone jako klasa TGV 384000 – rysunek 6. Jest to trzecia generacja pociągów TGV. Składy są budowane przez firmę Alstom. Pierwszy z pociągów został wyprodukowany w 2006 roku. Pociągi obsługują linię LGV Est européenne pomiędzy Paryżem a Nancy, Metz i Strasburgiem. Skład posiada dwa wagony

silnikowo-sterownicze na końcach, oraz osiem wagonów doczepnych wewnątrz składu. Skład jest wielosystemowy i może współpracować z sieciami trakcyjnymi prądu stałego – 1,5 kV, oraz prądu przemiennego 15 kV, 16,7 Hz oraz 25 kV 50 Hz AC. Całkowita długość składu wynosi 202,2 m. Pociąg posiada 120 miejsc siedzących pierwszej klasy i 257 miejsc siedzących drugiej klasy. Charakterystykę trakcyjną tego zespołu prezentuje rysunek 10e).

2.6. Pociągi VELARO CN, D i RUS

Produkowana przez firmę Siemens rodzina pociągów Velaro jest rozwiniętą wersją składów ICE 3. Obecnie istnieje kilka odmian typu Velaro. W niniejszym artykule zostały omówione trzy: VELARO CN produkowane dla Chin, VELARO D dla Niemiec oraz VELARO RUS dla Rosji.



Rys. 7. Pociąg VELARO CN, [6]

W listopadzie 2005 roku Koleje Chińskie zamówiły 60 składów VELARO CN (rysunek 7) do obsługi linii Beijing–Tianjin Intercity Railway. Montaż pierwszego składu VELARO CN został zakończony 11 kwietnia 2008 roku. Pociągi produkowane są jako zwarte szesnastowagonowe składy. Montaż odbywa się w dwóch chińskich fabrykach CNR Tangshan i CNR Changchun. Siemens jest tylko dostawcą gotowych części. Pudła wagonów są szersze o 300 mm w stosunku do pozostałych pociągów VELARO i posiadają zwiększoną pojemność (rzędy 2 + 3) wynoszącą łącznie 601 miejsc siedzących. Prędkość konstrukcyjna wynosi 300 km/h. Pociąg jest zasilany z sieci trakcyjnej o napięciu 25 kV 50 Hz AC. Charakterystykę trakcyjną tego zespołu prezentuje rysunek 10 f).



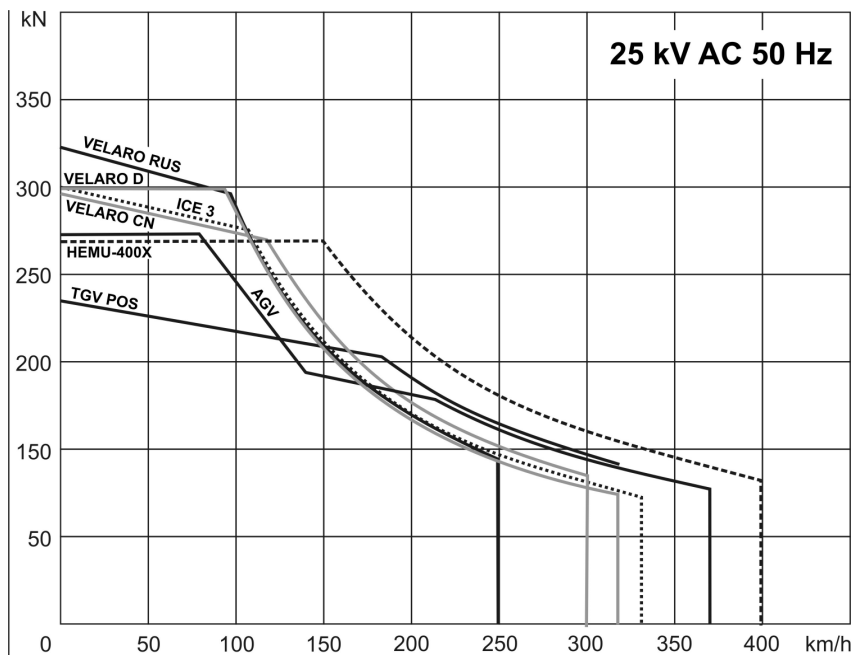
Rys. 8. Pociąg VELARO D, [3]

Odmiana VELARO D została opracowana specjalnie na potrzeby Kolei Niemieckich (DB) które zamówiły 15 takich składów – rysunek 8. Pierwszy pociąg został oddany do użytku 28 kwietnia 2010 roku. Składy będą obsługiwały pociągi międzynarodowe łączące Niemcy z Francją, Hiszpanią, Belgią i Holandią. Pociągi te są także dopuszczone do kursowania w Eurotunelu łączącym Francję z Wielką Brytanią. Prędkość konstrukcyjna wynosi 330 km/h. Pociąg jest czterosystemowy i może współpracować z siecią trakcyjną o napięciu 1,5 kV i 3 kV DC oraz 15 kV i 25 kV 50 Hz AC. Posiada 485 miejsc siedzących. Charakterystykę trakcyjną tego zespołu prezentuje rysunek 10 g).

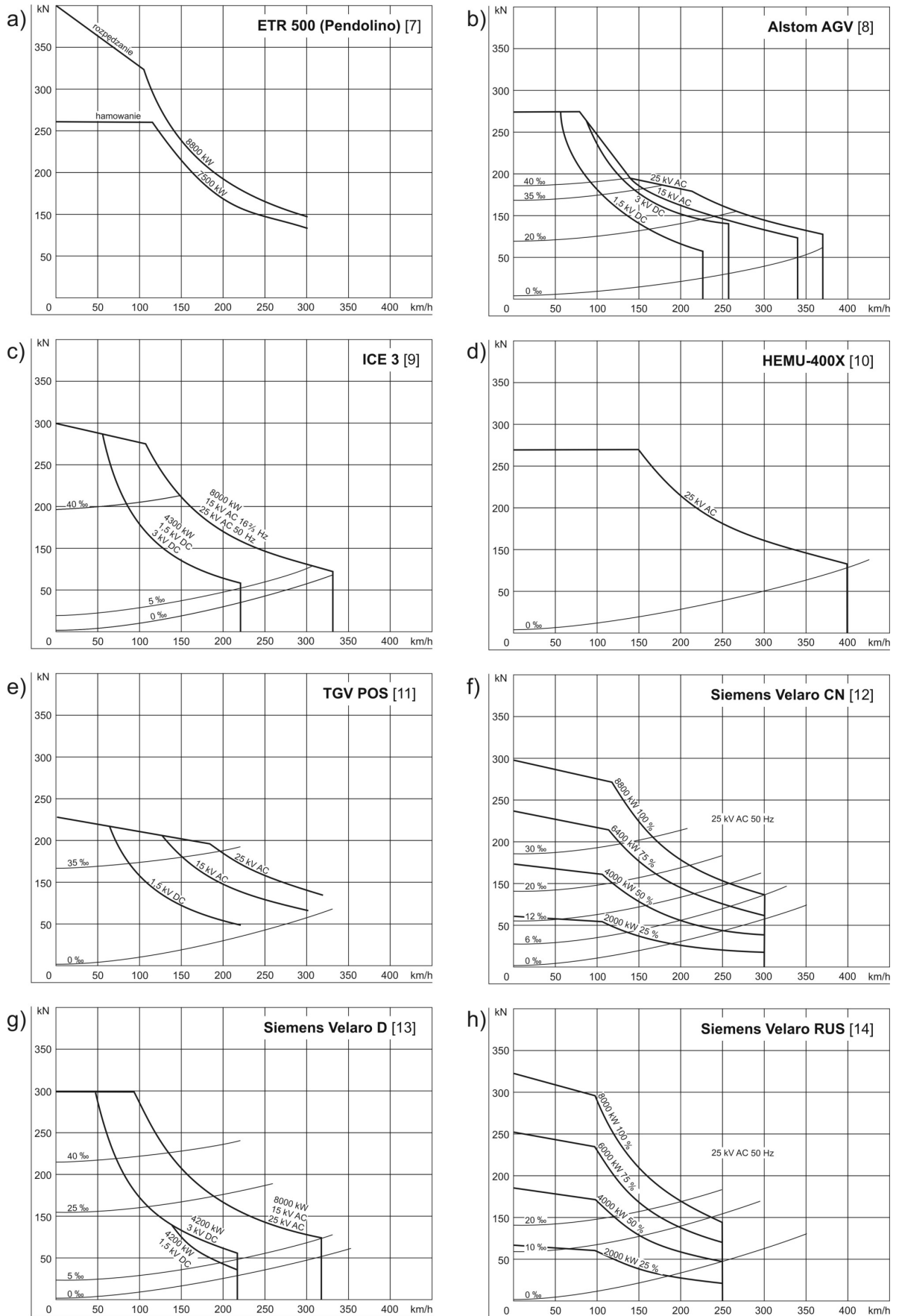


Rys. 9. Pociąg VELARO RUS, [3]

19 maja 2006 roku Koleje Rosyjskie (RZD) podpisały z firmą Siemens umowę na dostawę ośmiu składów pociągów dużych prędkości wraz 30-letnią obsługą serwisową. Odmiana VELARO RUS (rysunek 2.8.) została zakupiona specjalnie do obsługi linii Moskwa – Sankt Petersburg z prędkością 250 km/h. Pudła zostały poszerzone o 330 mm i zawierają łącznie 604 miejsca siedzące. Pociąg jest dostosowany do współpracy z siecią 25 kV AC 50 Hz. Charakterystykę trakcyjną tego zespołu prezentuje rysunek 10 h).



Rys. 11. Zestawienie charakterystyk trakcyjnych prezentowanych składów dla wariantu zasilania z sieci 25 kV 50Hz AC



Rys. 10. Charakterystyki trakcyjne opisywanych pociągów

3. Porównanie parametrów pociągów

Napędy przedstawionych pociągów dużych prędkości mają zbliżoną moc ($8 \div 10$) MW, oraz porównywalny zakres prędkości maksymalnych ($300 \div 400$) km/h. Zestawienie charakterystyk trakcyjnych przedstawionych pociągów dla pracy przy napięciu sieci trakcyjnej 25 kV 50 Hz AC przedstawiono na rysunku 11. Analizując powyższy rysunek można zauważyć że prze-

bieg charakterystyk jest podobny. Różnice poziomu siły pociągowej w strefie stałej mocy wynikają bądź z charakteru trasy na którą dedykowany jest dany pociąg (pochylenia podłużne) bądź z masy składu (najcięższy pociąg VELARO RUS ma największą początkową siłę pociągową, najlżejszy TGV POS – najmniejszą). Zestawienie parametrów pociągów prezentuje Tablica 1.

Tablica 1. Zestawienie parametrów pociągów [15]

oznaczenie kraj producenta	moc [kW]	masa [t]	v_{\max} [km/h]	F_{\max} [kN]	a_{\max} [m/s ²]	v_{SM} [km/h]	F_{SM} [kN]
ETR 500 Włochy	8800	598	300	400	0,668	105	310
AGV Francja	9600	395	360	270	0,684	75	270
ICE 3 Niemcy	8000	409	330	300	0,773	105	270
HEMU-400X Korea Płd.	9840	448	400	235	0,525	150	240
TGV-POS Francja	9280	383	320	220	0,574	180	185
VELARO CN Niemcy	8800	447	300	300	0,671	115	260
VELARO D Niemcy	8000	454	300	300	0,660	95	300
VELARO RUS Niemcy	8000	667	250	328	0,491	97	296

W celu umożliwienia porównania właściwości poszczególnych składów autorzy proponują wprowadzenie trzech wskaźników oceniających:

PP – moc na jednego pasażera
(sumaryczna moc napędu / liczba miejsc siedz.)

MP – masa na jednego pasażera
(całkowita masa pociągu / liczba miejsc siedz.)

WES – wskaźnik efektywności składu
(v_{\max} / PP)

Wskaźnik pierwszy PP uwidacznia moc jednostkową pociągu w stosunku do jednego pasażera. Wskaźnik ten można ogólnie potraktować jako parametr wskazujący średni koszt zużytej energii w stosunku do przychodu z biletu. Im niższa wartość tego wskaźnika tym lepsze jest wykorzystanie mocy zainstalowanej pojazdu na jednego pasażera.

Drugi wskaźnik MP charakteryzuje pojazd pod względem „ciężkości” konstrukcji pokazując jaka masa pociągu odpowiada jednemu pasażerowi. Im mniejsza wartość wskaźnika tym lżej-

sza konstrukcja składu i tym mniej energii należy zużyć do jego rozpędzenia.

Trzeci wskaźnik WES jest parametrem syntetycznym odzwierciedlającym wzajemny stosunek liczby miejsc, mocy zainstalowanej i prędkości maksymalnej pociągu. Wartość tego wskaźnika jest tym wyższa im mniejsza jest moc zainstalowana przypadająca na jednego pasażera i im wyższa jest prędkość maksymalna pociągu.

Wartości opisanych wskaźników dla rozpatrywanych w niniejszym artykule pociągów prezentuje Tablica 2.

4. Podsumowanie

Zaprezentowane w niniejszym artykule zespoły trakcyjne dużych prędkości charakteryzują się zbliżonymi parametrami trakcyjnymi. Dogłębna analiza ich charakterystyk jest możliwe tylko na podstawie wykonania serii przejazdów teoretycznych.

Tablica 2. Wskaźniki porównawcze analizowanych pociągów

oznaczenie kraj producenta	liczba miejsc	PP [kW/pas]	MP [t/pas]	v_{max} [km/h]	WES [(km/kWh)/pas]
ETR 500 Włochy	671	13,1	0,89	300	22,9
AGV Francja	460	20,9	0,86	360	17,3
ICE 3 Niemcy	425	18,8	0,96	330	17,5
HEMU-400X Korea Płd.	378	26,0	1,19	400	15,4
TGV-POS Francja	377	24,6	1,02	320	13,0
VELARO CN Niemcy	601	14,6	0,74	300	20,5
VELARO D Niemcy	485	16,5	0,94	300	18,2
VELARO RUS Niemcy	604	13,2	1,10	250	18,9

Możliwe jest też uproszczone porównanie właściwości trakcyjnych pojazdów na podstawie podstawowych wskaźników zaproponowanych przez autorów wykorzystujących parametry techniczne takie jak moc zainstalowana, masa pociągu, liczba miejsc siedzących i prędkość maksymalna. Rozpatrując powyższe wskaźniki w stosunku do przedstawionych w artykule składów najmniejszą moc zainstalowaną przypadającą na jednego pasażera ma włoski zespół ETR 500 (PP = 13,1) oraz niemiecki zespół VELARO RUS (PP = 13,2). Najmniejszą masę w przeliczeniu na jednego pasażera ma niemiecki zespół VELARO CN produkowany dla Kolei Chińskich (MP = 0,74), co jest wynikiem poszerzenia pudła i umieszczenia 5 rzędów foteli (układ 2 + 3). Najwyższą wartością WES cechuje się włoski skład ETR 500.

Literatura

- [1]. <http://www.bahnbilder.de/>.
- [2]. <http://de.academic.ru/>.
- [3]. <http://en.wikipedia.org/>.
- [4]. <http://www.krri.re.kr/>.
- [5]. <http://www.nationalcorridors.org/>.
- [6]. <http://www.siemens.com/>.
- [7]. www.amicitreni.it/articoli/etr500y.htm.
- [8]. AGV – Full speed ahead into the 21th century; www.transport.alstom.com.
- [9]. ICE 3 Multiple Unit for the European High Speed Rail Services; <http://www.siemens.cz>.
- [10]. High Speed Trains – Hyundai Rotem Company; <http://dasan.kofst.or.kr>.
- [11]. Evolution des technologies utilisees en traction ferroviaire, Part II: TGV POS; <http://sciences-physiques.ac-dijon.fr>.

[12]. High speed train set Velaro CN; www.siemens.com.

[13]. Data sheet – Siemens Velaro D; www.siemens.com

[14]. High speed train set Velaro RUS; www.siemens.com.

[15]. K. Sokół, Praca dyplomowa inżynierska, Analiza rozwiązań napędów lokomotyw w kolejach dużych prędkości, Politechnika Łódzka, Łódź 2011 (opiekun prof. J. Anuszczyk).

Autorzy

dr hab. inż. Jan Anuszczyk, prof. PŁ:

Kierownik Zakładu Transportu i Przetwarzania Energii w Instytucie Elektroenergetyki Politechniki Łódzkiej.

mgr inż. Adam Wawrzyniak:

Doktorant w Zakładzie Transportu i Przetwarzania Energii w Instytucie Elektroenergetyki Politechniki Łódzkiej.

inż. Kacper Sokół:

absolwent kierunku Transport, PŁ.