

ANALIZA RUCHOWA POJAZDÓW SZYNOWYCH Z UWZGLĘDNIENIEM ZMIAN NAPIĘCIA NA ODBIERAKU PRĄDU

Leszek JARZĘBOWICZ¹, Sławomir JUDEK²

1. Miejsce pracy: Politechnika Gdańska, Wydział Elektrotechniki i Automatyki
tel.: +48 58 347 21 49 e-mail: leszek.jarzebowicz@pg.edu.pl
2. Miejsce pracy: Politechnika Gdańska, Wydział Elektrotechniki i Automatyki
tel.: +48 58 347 11 68 e-mail: slawomir.judek@pg.edu.pl

Streszczenie: W artykule zaproponowano metodykę wykonywania analizy ruchowej pojazdów szynowych, która uwzględnia wpływ zmieniającego się napięcia zasilającego pojazd na jego właściwości ruchowe. Wykorzystując model opracowany w programie Simulink wskazano na istotne różnice w czasie przejazdu oraz w wartościach napięcia zasilającego pomiędzy proponowanym sposobem analizy a powszechnie stosowanym podejściem uproszczonym.

Słowa kluczowe: trakcja elektryczna, zasilanie trakcyjne, obliczenia symulacyjne, Simulink.

1. WPROWADZENIE

Przejazd pociągiem z Wilna do Lizbony odbywa się bez żadnej odprawy granicznej, ale wiąże się z kilkukrotną zmianą szerokości toru oraz rodzaju i poziomu napięcia zasilającego lokomotywę. Umożliwienie poruszania się pociągu w krajach o różnej specyfice infrastruktury kolejowej określa się pojęciem interoperacyjności, wprowadzonym w ramach Dyrektywy Unii Europejskiej. Wymagania względem systemu kolejowego w tym zakresie zawarto w Technicznych Specyfikacjach Interoperacyjności (TSI). Zagadnienia związane z pojazdami i ich zasilaniem znajdują się w dwóch powiązanych ze sobą dokumentach, tj. TSI „Tabor – lokomotywy i tabor pasażerski” oraz TSI „Energia”. [1]

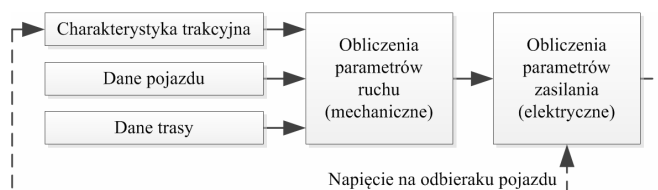
Proces projektowania i analizy sieciowej trakcji elektrycznej musi zapewnić prawidłową i bezpieczną pracę systemu rzeczywistego, zgodnie z przyjętymi zadaniami przewozowymi, z uwzględnieniem technicznej realizowalności, przy minimalizacji nakładów finansowych i oddziaływania na środowisko. Najczęściej realizowany jest on z użyciem metod komputerowego wspomaganie projektowania i symulacji. W szczególności dotyczy to analizy ruchowej wykonywanej poprzez obliczenia tzw. przejazdu teoretycznego [2, 3]. Z punktu widzenia analizy ruchowej istotne są tzw. osiągi trakcyjne, czyli: maksymalna prędkość eksploatacyjna, zależność maksymalnej siły pociągowej od prędkości $F = f(v)$ oraz opory ruchu [4]. Wymienione dane są niezbędne m.in. do ustalenia rozkładu jazdy, umożliwiającego dopasowanie pociągu do ogólnego schematu ruchu na danej linii kolejowej.

Istnieje wzajemna relacja pomiędzy osiąganymi trakcyjnymi a parametrami układu zasilania. W systemach zasilania elektrotrakcyjnego o relatywnie niskim napięciu, jak na przykład w polskim 3-kilowoltowym systemie, relacja

ta jest bardzo wyraźna z uwagi na fakt, iż elektryczne pojazdy kolejowe o mocy większej niż 2 MW muszą być wyposażone w funkcję samoczynnego ograniczania pobieranej mocy lub prądu, gdy napięcie na odbieraku prądu pojazdu wykracza poza zdefiniowany zakres wartości. Ograniczenie pobieranej mocy dotyczy praktycznie wszystkich typów lokomotyw eksploatowanych przez krajowych przewoźników. W odniesieniu do elektrycznych zespołów trakcyjnych problem ten występuje w przypadku łączenia pociągów z kilku pojedynczych zespołów. Trakcja ukrotzona jest standardowo wykorzystywana w obsłudze ruchu aglomeracyjnego i podmiejskiego [2, 5]. Ponadto, w przypadku gdy pojazd ma możliwość zwrotu energii elektrycznej do sieci trakcyjnej poprzez zastosowanie hamowania odzyskowego, musi istnieć możliwość sterowania tym procesem. Szczegółowe wytyczne w tym zakresie można znaleźć w PN-EN 50388 [1, 6, 7].

2. PROBLEMATYKA ANALIZY RUCHOWEJ

Analizę ruchową pojazdu oraz obliczenia parametrów zasilania elektrotrakcyjnego standardowo wykonuje się w dwóch krokach (rys. 1) [8].



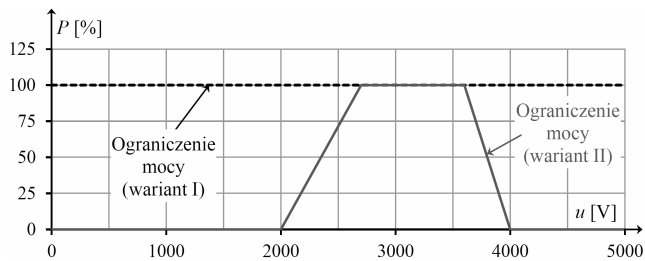
Rys. 1. Struktura obliczeń związanych z analizą ruchową pojazdu

W pierwszej kolejności wykonywane są obliczenia oparte na równaniu ruchu pojazdu, w których jedną z danych wejściowych jest charakterystyka trakcyjna pojazdu, określająca maksymalną siłę pociągową lub hamującą w funkcji prędkości pojazdu, wyznaczona z założeniem znamionowego napięcia zasilającego pojazd. Wynikiem tych obliczeń są przebiegi mechanicznych zmiennych ruchu takich jak siła pociągowa, prędkość, czy droga.

W drugim kroku realizowane są obliczenia zasilania elektrotrakcyjnego, które rozpoczynają się od wyznaczenia przebiegu prądu pobieranego przez pojazd. Wykonuje się to korzystając z przebiegów wielkości mechanicznych oraz

zakładając jako stałe: sprawność napędu, prąd potrzebny trakcyjny oraz napięcie zasilające pojazd. Obliczony przebieg prądu, wraz z wyliczonym wcześniej przebiegiem pokonanej drogi, są punktem wyjścia do wyliczenia pozostałych parametrów zasilania, jak na przykład napięcie na odbieraku pojazdu uwzględniające spadek napięcia na sieci trakcyjnej, prądy podstacji trakcyjnych itp.

Istotnym uproszczeniem w opisanym standardowym procesie obliczeń jest założenie stałego napięcia na odbieraku pojazdu – zarówno na etapie obliczeń mechanicznych parametrów ruchu jak i przy wyliczaniu pobieranego przez niego prądu. W rzeczywistości napięcie to zmienia się, a zmiany te z kolei determinują moc maksymalną pojazdu, a więc wpływają na charakterystykę trakcyjną, co zobrazowano linią przerywaną na rys. 1. Napięcie na odbieraku determinuje, dla określonej mocy, wartość pobieranego przez pojazd prądu. Zależność mocy pojazdu od napięcia zasilającego przedstawiono na rys. 2 w dwóch wariantach: I – dla standardowego procesu obliczeń oraz II – z uwzględnieniem ograniczeń, o których mowa w Technicznych Specyfikacjach Interoperacyjności.



Rys. 2. Zależność maksymalnej mocy pojazdu od napięcia na odbieraku prądu [4]

Ponadto, zgodnie z zaleceniami normatywnymi, częstość występowania ograniczeń ruchowych, zarówno z punktu widzenia układu zasilania, jak i pojazdów, powinna być oceniana. W tym celu wyznacza się tzw. napięcie średnie użyteczne:

$$U_{\text{śr}} = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{1}{T_i} \int_0^{T_i} U_{pi} \cdot |I_{pi}| dt}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{T_i} \int_0^{T_i} |I_{pi}| dt} \quad (1)$$

gdzie: T_i – czas jazdy i -tego pociągu, n – liczba pociągów w czasie symulacji (przy wyznaczaniu napięcia użytecznego dla obszaru zasilania; $n = 1$ przy wyznaczaniu napięcia użytecznego dla danego pojazdu), U_{pi} – napięcie na odbieraku i -tego pojazdu, I_{pi} – prąd płynący przez odbierak i -tego pojazdu.

Stosowanie do oceny układu zasilania wartości średniego napięcia użytecznego ma następujące zalety:

- pozwala pojazdom trakcyjnym funkcjonować przy napięciu bliskim znamionowemu, a tym samym optymalizuje sprawność i wydajność,
- zapewnia przestrzeganie wartości minimalnego napięcia określonego przez PN-EN 50388,
- zapewnia zachowanie marginesu bezpieczeństwa dla urządzeń zasilania trakcji elektrycznej, co daje możliwość rozważenia zwiększenia natężenia ruchu bez konieczności rozbudowy podstacji trakcyjnych,
- uelastycznia system zasilania w celu zapewnienia jego ciągłości w sytuacjach awaryjnych.

Z przedstawionych powyżej przyczyn, zarówno w analizie ruchowej jak i przy ocenie parametrów zasilania

wyliczanie napięcia na odbieraku pojazdu powinno odbywać się równoległe z pozostałymi obliczeniami i wpływać na te obliczenia. Takie sprzęgnięcie modułów obliczeniowych wymaga jednak wykorzystania odpowiednich narzędzi symulacyjnych oraz sposobu modelowania.

W artykule zaproponowano sposób modelowania pozwalający na analizę ruchową pojazdu z uwzględnieniem zmiennego napięcia na odbieraku pojazdu. Poprzez studium przykładowego przypadku wykazano, iż uwzględnienie zmiennego napięcia znacząco wpływa na parametry takie jak czas przejazdu, dynamika ruchu, zmiany napięcia zasilającego czy średnie napięcie użyteczne.

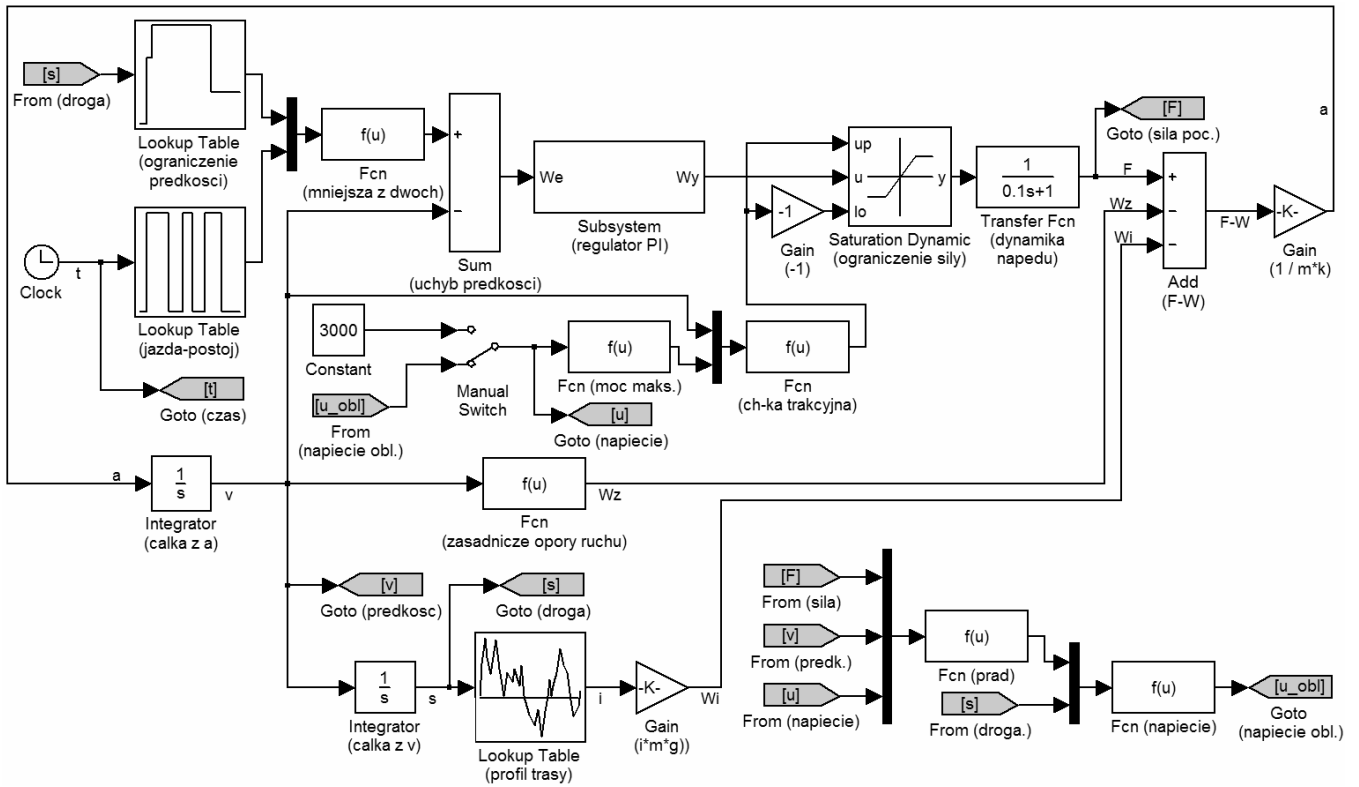
3. PROPONOWANY MODEL SYMULACYJNY

Proponowany model do analizy ruchowej pojazdu szynowego opracowano w środowisku Simulink (rys. 3). W modelu przewidziano dwa warianty obliczeń. Wariant I reprezentuje podejście standardowe, w którym obliczenia parametrów mechanicznych oraz prądu pobieranego przez zespół trakcyjny odbywają się z założeniem niezmiennego napięcia zasilającego [8, 9, 10]. Wariant II to proponowana metoda obliczeń, w której uwzględniono zmiany napięcia na odbieraku pojazdu. Wybór wariantu odbywa się za pomocą przełącznika *Manual Switch* umiejscowionego w środkowej części modelu.

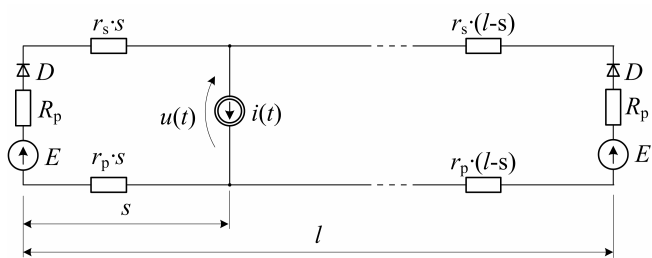
Równanie ruchu [10] pojazdu odwzorowano za pomocą bloków *Add (F-W)* oraz *Gain (1/m*k)* umieszczonych w prawym górnym rogu modelu. Opory zasadnicze ruchu W_z opisano wielomianową funkcją prędkości. Opory dodatkowe W_i uwzględniają nachylenie wzdłużne trasy. Wartość siły pociągowej F obliczana jest z wykorzystaniem proporcjonalno-całkującego regulatora prędkości. Wartość wyjściowa z regulatora podlega ograniczeniu do maksymalnej siły wynikającej z charakterystyki trakcyjnej pojazdu – realizuje to blok *Fcn (mniejsza z dwóch)*. Charakterystyka wyliczana jest z uwzględnieniem napięcia zasilającego pojazd: stałego – w wariantcie I lub zmieniającego się – w wariantcie II.

Aby umożliwić numeryczne rozwiązanie modelu w wariantcie II, niezbędne jest odwzorowanie ograniczonej dynamiki regulacji siły pociągowej, związanej z napędem elektrycznym. Wykonano je za pomocą inercji pierwszego rzędu (*Transfer Fcn*).

W prawym dolnym fragmencie diagramu znajduje się część modelu obliczająca napięcie na odbieraku pojazdu oparta na analogu obwodowym systemu zasilania elektrotrakcyjnego przedstawionym na rys. 4. Przyjęto model podstacji trakcyjnej jako rzeczywiste źródło napięcia o sile elektromotorycznej E i rezystancji R_p , modelujące charakterystykę zewnętrzną podstacji. Dioda D odwzorowuje brak możliwości zwrotu energii do systemu elektroenergetycznego. Rezystancje jednostkowe r_s oraz r_p , wyrażone w Ω/km , reprezentują oporność sieci jezdnej i powrotnej. Źródło prądu $i(t)$ modeluje pobór prądu przez pojazd. Na podstawie mocy mechanicznej oraz napięcia obliczany jest prąd pobierany przez pojazd, a następnie napięcie na jego odbieraku. Napięcie – w zależności od położenia przełącznika *Manual Switch* – jest wartością stałą przyjętą jako znamionowe napięcie w sieci trakcyjnej równe 3 kV lub wyliczoną w bieżącym kroku symulacji.



Rys. 3. Model symulacyjny do analizy ruchowej pojazdu w programie Simulink



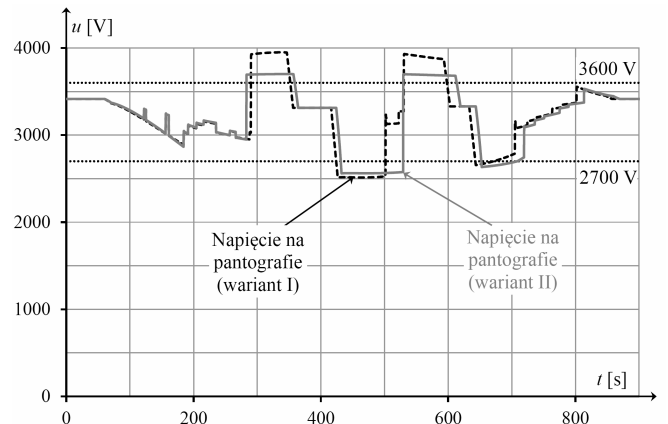
Rys. 4. Model systemu zasilania służący do wyliczenia napięcia $u(t)$ na odbieraku pojazdu

3. ANALIZA PRZYKŁADOWEGO PRZEJAZDU

Dla przedstawienia różnic pomiędzy proponowaną a standardową metodyką posłużono się przykładem obliczeniowym. Rozważono elektryczny zespół trakcyjny typu ED160 przejeżdżający 20-kilometrowy odcinek w trakcji podwójnej. W takiej konfiguracji moc znamionowa składu wynosi 4 MW [5].

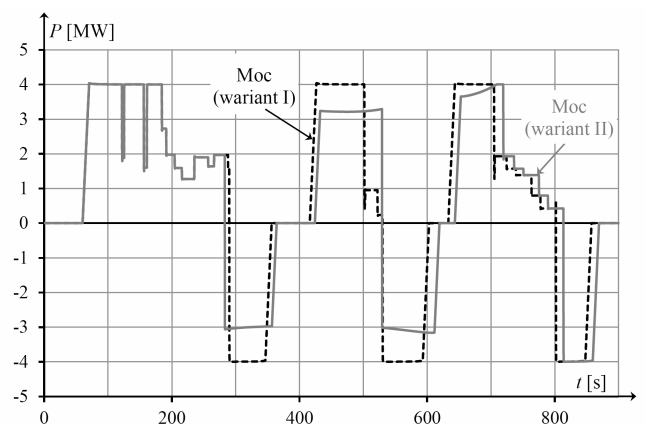
Pojazd pokonuje dystans odpowiadający typowej sekcji zasilania w trakcji prądu stałego, zatrzymując się na przystankach zlokalizowanych w następujących odległościach od punktu rozpoczęcia jazdy: 9,2 km, 14,1 km oraz 20 km. Przyspieszanie i hamowanie odzyskowe odbywa się z wykorzystaniem maksymalnej dostępnej mocy pojazdu. Ograniczenie prędkości na dwóch pierwszych odcinkach międzyprzystankowych wynosi 140 km/h, na trzecim – 120 km/h.

Podstacje zlokalizowano na skrajach odcinka, tj. w zerowym oraz w dwudziestym kilometrze. Przyjęto, że każda podstacja wyposażona jest w trzy zespoły prostownikowe typu PD-17/3,3. Na rozpatrywanym odcinku znajduje się sieć trakcyjna YwsC120-2C-M. Założono, iż rozważany zespół trakcyjny jest jedynym pojazdem znajdującym się na 20-kilometrowym odcinku zasilania. Na rysunku 4 przedstawiono przebieg napięcia na pantografie.



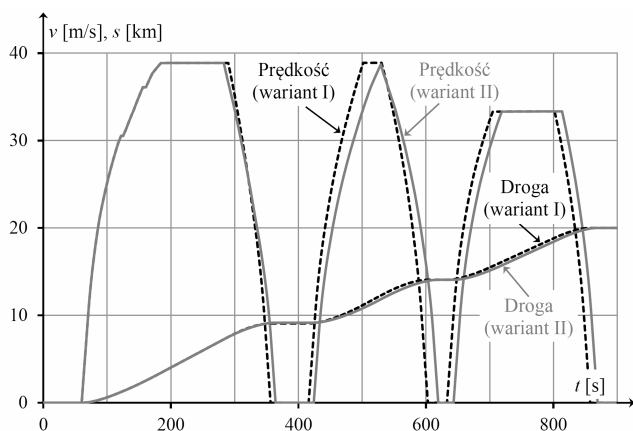
Rys. 5. Przebieg napięcia na odbieraku pojazdu

W obu wariantach obliczeń występują wykroczenia wartości napięcia poza zakres od 2700 do 3600 V (rys. 5), w przypadku wariantu II wykroczenia te są mniejsze za sprawą ograniczenia pobieranej mocy widocznego na rys. 6.



Rys. 6. Przebieg mocy pobieranej przez pojazd

W rezultacie dynamika rozruchu i hamowania dla wariantu II jest ograniczona w relacji do wariantu I, gdy pojazd znajduje się w połowie odcinka pomiędzy podstacjami, kiedy to spadki napięć na sieci trakcyjnej są największe. Związany z tym czas przejazdu jest dla wariantu II dłuższy (870 s) w relacji do przejazdu według wariantu I (859 s), co zobrazowano na rysunku 6.



Rys. 6. Przebieg prędkości i położenia pojazdu

Dla modelowanego przejazdu obliczono dodatkowo wartość średniego napięcia użytecznego na odbieraku prądu pojazdu wg (1), które wyniosło:

- w wariacie I: $U_{\text{śruż}_I} = 3104 \text{ V}$,
- w wariacie II: $U_{\text{śruż}_{II}} = 3014 \text{ V}$.

Powyższa znacząca różnica wskazuje na istotny wpływ metodyki modelowania na obliczenia podstawowych parametrów zasilania.

4. PODSUMOWANIE

Przedstawiona analiza przykładowego przejazdu udowodniła znaczące różnice w czasie przejazdu oraz w wartości średniego napięcia użytecznego pomiędzy proponowanym, a powszechnie stosowanym podejściem do analizy. Przy dostępności odpowiednich narzędzi obliczeniowych, analiza ruchowa powinna zatem brać pod uwagę wpływ zmieniającego się napięcia zasilającego pojazd na jego osiągi trakcyjne oraz pobierany prąd.

ANALYSIS OF RAIL VEHICLE MOTION INCLUDING AN INFLUENCE OF VARYING VOLTAGE ON THE CURRENT COLLECTOR

The paper proposes a novel approach to analyze a rail vehicle motion, which includes an impact of varying voltage at the current collector on the vehicle's dynamics. According to present standards, vehicle's maximal power has to be limited and the value of this limit depends on actual value of vehicle's supplying voltage. This, in turn, affects vehicle tractive effort and its current consumption. A model reflecting vehicle dynamics as well as its supply parameters was designed in Simulink. By a case study, it was proven that neglecting the impact of vehicle varying supply voltage on vehicle dynamics leads to substantial errors in reflecting both vehicle motion and its supply-related parameters.

Keywords: electric traction, traction supply, simulation analysis, Simulink.

5. BIBLIOGRAFIA

1. Commission Decision of 23 July 2012 amending Decisions 2006/679/EC and 2006/860/EC concerning technical specifications for interoperability (notified under document C(2012) 4984) 2012/464/EU
2. Szela A.: Wpływ napięcia w sieci trakcyjnej 3 kV DC na parametry energetyczno-trakcyjne zasilanych pojazdów. Wydawnictwo Instytutu Naukowo-Wydawniczego „SPATIUM”, Radom 2013.
3. Bartłomiejczyk M., Mirchevski S., Jarzębowicz L., Karwowski K., How to choose drive's rated power in electrified urban transport, Proc. of 19th European Conference on Power Electronics and Applications EPE'2017 ECCE Europe, Warsaw 11-15 Sep. 2017.
4. Bartłomiejczyk M., Połom M.: Multiaspect measurement analysis of breaking energy recovery. Energy Conversion and Management, vol. 127, November 2016, pp. 35-42.
5. Lipiński L., Miszewski M.: Performance of EMUs in multiple configuration with limitation on power taken from catenary. in Modern Electric Traction. Vehicles., ed. by K. Karwowski, A. Szela, Gdansk University of Technology, Faculty of Electrical and Control Engineering, Gdańsk 2009.
6. Pawlik M. et al.: Interoperacyjność system kolei Unii Europejskiej. Infrastruktura, sterowanie, energia, tabor. KOW, Warszawa 2015.
7. PN-EN 50388 Zastosowania kolejowe – System zasilania i tabor – Warunki techniczne koordynacji pomiędzy systemem zasilania (podstacja) i taborem w celu osiągnięcia interoperacyjności.
8. Skibicki J., Judek S.: Wyznaczanie parametrów elektrycznych trakcyjnego układu zasilania dla złożonych warunków ruchu przy wykorzystaniu programu PSpice. Przegląd Elektrotechniczny. Nr 12/2009, s. 270-273.
9. Szela A., Maciołek T.: A 3 kV DC electric traction system modernization for increased speed and trains power demand – problems of analysis and synthesis. Przegląd Elektrotechniczny nr 3a/2013, s. x-y.
10. Szela A., Mierzejewski L.: Ground transportation systems. [w:] The Encyclopedia of Electrical and Electronic Engineering, Supplement I, John Wiley & Sons Inc., New York 1999.