

WALDEMAR ZAJĄC, WOJCIECH CZUCHRA*

IMPEDANCJA WEJŚCIOWA POJAZDÓW TRAKCYJNYCH W ASPEKTCIE DOPUSZCZALNYCH POZIOMÓW ZAKŁÓCEŃ W SIECI TRAKCYJNEJ

INPUT IMPEDANCE OF TRACTION VEHICLES IN ASPECT OF LIMITS OF INTERFERENCES IN OVERHEAD CONTACT LINE

Streszczenie

Pojazdy trakcyjne z przetwornicami statycznymi wyposażone są w filtr wejściowy. W artykule przedstawiono kilka filtrów wejściowych dla wybranych pojazdów trakcyjnych. Obliczono impedancję wejściową dla obciążenia silnikami szeregowymi i asynchronicznymi oraz impedancję wejściową dla biegu jałowego. Wyniki uzyskane na podstawie obliczeń porównano z pomiarami przeprowadzonymi na rzeczywistych pojazdach trakcyjnych podczas normalnej pracy oraz z wymogami obowiązującymi w niektórych krajach. Autorzy artykułu uważają, że obowiązek wprowadzenia minimalnej wartości impedancji wejściowej pojazdu może być sposobem na zmniejszenie poziomu harmonicznych generowanych przez podstacje trakcyjne obciążone lokomotywą przekształtnikową.

Słowa kluczowe: trakcja elektryczna; harmoniczne prądu; impedancja wejściowa

Abstract

Modern traction vehicles with static inverters are furnished with input filter. A few input filters of chosen traction vehicles are considered in this paper. The following were calculated: input impedance for load with series and asynchronous motors, impedance for idle operation. These impedances were compared with requirements in force in some countries. The authors of the paper think, that obligatory implementation of minimal value of input impedance of vehicle may be a method of decreasing harmonics level generated by traction substation loaded with inverter locomotive.

Keywords: electric traction; current harmonics; input impedance

* Dr inż. Waldemar Zajęc, dr inż. Wojciech Czuchra, Katedra Trakcji i Sterowania Ruchem, Wydział Inżynierii Elektrycznej i Komputerowej, Politechnika Krakowska.

1. Wstęp

Współczesne pojazdy trakcyjne z przekształtnikami statycznymi posiadają zawsze filtr wejściowy. Filtr ten umożliwia współpracę bezpośrednią przekształtnika z siecią trakcyjną. Pojemność filtru powinna gwarantować możliwość odbioru co najmniej połowy energii z kondensatora przez odbiornik. Kondensator ten połączony jest z dławikiem, który „odcina” układ napędowy od sieci trakcyjnej. Ze względu na wymagania dotyczące dopuszczalnych wartości harmonicznych w sieci trakcyjnej, oddziałujących na układy sterowania ruchem, filtry te mają o wiele bardziej skomplikowaną strukturę i większe parametry od tych, które wynikają z potrzeby impulsowego poboru prądu przez przekształtnik.

W artykule omówiono kilka filtrów wejściowych dla wybranych pojazdów trakcyjnych. Zostały wyznaczone: impedancja wejściowa filtru (czyli impedancja pomiędzy pantografem a kołem) z uwzględnieniem obciążenia przekształtnikiem z silnikami indukcyjnymi i szeregowymi, a następnie tylko impedancja wejściowa dla biegu jałowego. Impedancje te zostały porównane z wymaganiami obowiązującymi w niektórych krajach. Autorzy artykułu uważają, że obligatoryjne wprowadzenie minimalnej wartości impedancji wejściowej pojazdu może być metodą obniżającą harmoniczne generowane przez podstacje trakcyjne obciążone lokomotywą przekształtnikową.

2. Wyznaczenie impedancji wejściowej dla pojazdu trakcyjnego

Obliczenia impedancji wejściowej obwodu elektrycznego dla pojazdu z napędem asynchronicznym przeprowadzono dla zespołu trakcyjnego ACATUS, w skład którego wchodzi połączone równolegle cztery układy napędowe o mocy 500 kW każdy oraz filtr wejściowy o parametrach $L = 54$ mH i $C = 2$ mF [7]. Schemat układu napędowego elektrycznego zespołu trakcyjnego ACATUS pokazano na rys. 1. Impedancję wejściową, czyli impedancję pomiędzy pantografem a kołem, obliczono jako wynik połączenia równoległego impedancji wejściowych poszczególnych układów napędowych. Impedancję wejściową wyznaczono przez odpowiednie zsumowanie impedancji filtru wejściowego i przeniesionej przez przekształtnik trójfazowy impedancji silnika asynchronicznego [5, 6].

Równanie na impedancję całego napędu przyjmuje postać (1)

$$Z_{in}(\lambda, f_1) := \left[Z_{we_\lambda} + \frac{1}{Y_{dc_\lambda} + 1(Y_{uas}(\lambda, f_1))} \right] \frac{1}{4} \quad (1)$$

gdzie:

Z_{we_λ} – impedancja dławika filtru,

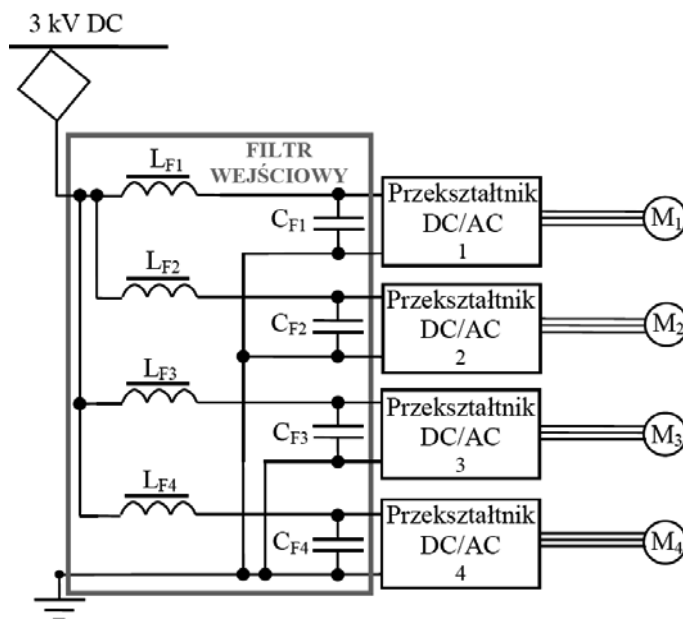
Y_{dc_λ} – admitancja obwodu pośredniego (kondensatora filtru),

Y_{uas} – przeniesiona admitancja silnika asynchronicznego widziana z zacisków kondensatora filtru,

λ – numer harmonicznej okna,

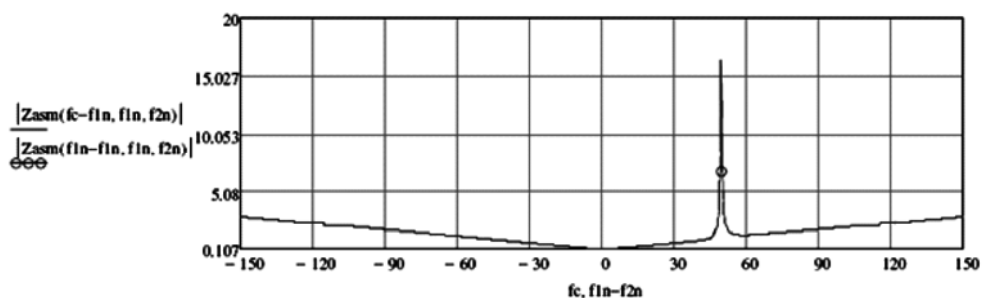
f_1 – częstotliwość stojana silnika asynchronicznego.

Impedancja silnika asynchronicznego w funkcji częstotliwości skanowania przedstawiona została na rys. 2.



Rys. 1. Struktura układu napędowego elektrycznego zespołu trakcyjnego ACATUS

Fig. 1. Drive system structure of electrical multiple unit ACATUS

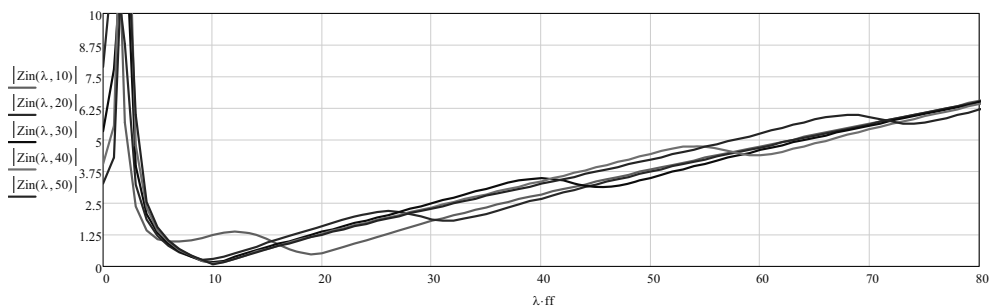


Rys. 2. Impedancja silnika asynchronicznego w funkcji częstotliwości skanującej

Fig. 2. Asynchronous motor impedance in function of scanning frequency

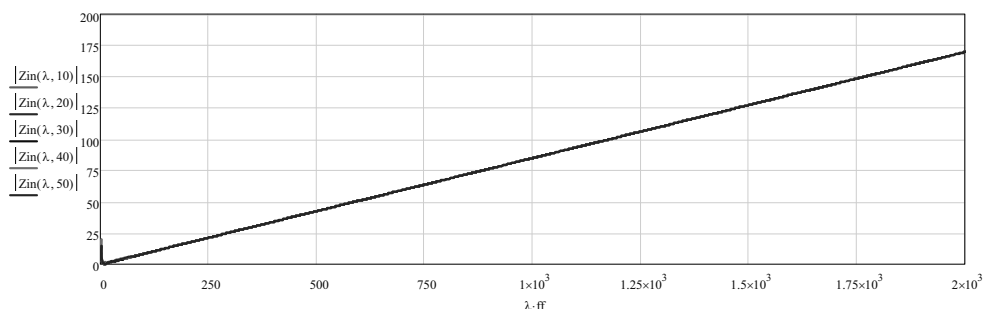
Na rys. 3 i 4 przedstawiono wykres obliczonej impedancji wejściowej w funkcji częstotliwości dla całego pojazdu dla różnych częstotliwości pracy silnika (10 Hz, 20 Hz, 30 Hz, 40 Hz i 50 Hz).

Dla częstotliwości 50 Hz impedancja wejściowa pojazdu zawiera się w przedziale od 3,75 do 4,46 Ω w zależności od częstotliwości pracy silnika, a dla częstotliwości 1500 Hz ma wartość 127,22 Ω .



Rys. 3. Wykres impedancji wejściowej w zakresie częstotliwości 0–80 Hz

Fig. 3. Input impedance plot for frequency range 0–80Hz



Rys. 4. Wykres impedancji wejściowej w zakresie częstotliwości 0–2000 Hz

Fig. 4. Input impedance plot for frequency range 0–2000Hz

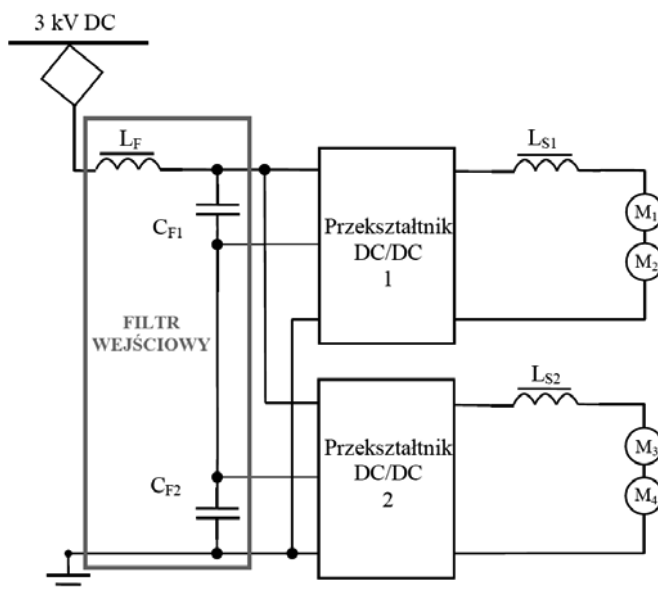
Obliczenia impedancji wejściowej pojazdu z napędem czopierowym przeprowadzono na podstawie lokomotywy manewrowej EM10. Lokomotywa posiada dwa układy napędowe o mocy 470 kW każdy, z czterema silnikami prądu stałego, pracujące w układzie dwutaktowym. Lokomotywa wyposażona jest w filtr wejściowy o parametrach $L = 18$ mH i $C = 2 \cdot 5,6$ mF. Schemat układu napędowego lokomotywy EM10 pokazano na rys. 5.

Impedancja wejściowa pojazdu dana jest wzorem (2):

$$Z_{IN}(\lambda, m_0) := \left(Z_{1_k} + \frac{2}{Y_{E_k} + Y_{A_k} \cdot m_0^2} \right) \quad (2)$$

gdzie:

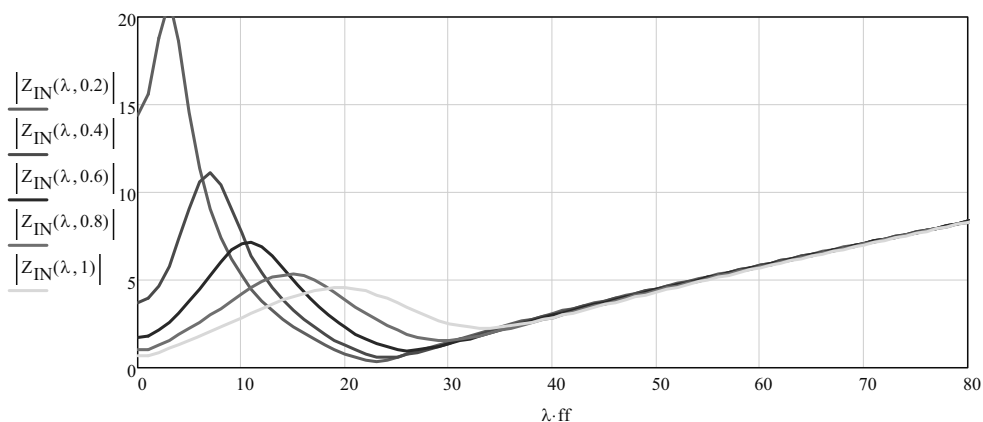
- Z_{1_k} – impedancja dławika filtru,
- Y_{E_k} – admitancja kondensatora filtru,
- $Y_{A_k} \cdot m_0^2$ – przeniesiona admitancja silników prądu stałego na stronę kondensatora.



Rys. 5. Struktura układu napędowego lokomotywy EM10

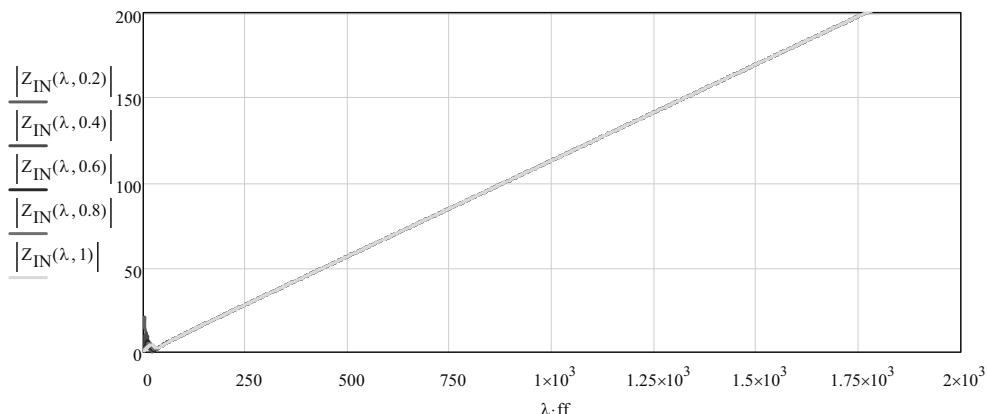
Fig. 5. Drive system structure of locomotive EM10

Na rys. 6 i 7 przedstawiono wykres impedancji wejściowej w funkcji częstotliwości dla całego pojazdu przy różnych współczynnikach wypełnienia przerywaczy (0,2; 0,4; 0,6; 0,8; 1,0).



Rys. 6. Wykres impedancji wejściowej w zakresie częstotliwości 0–80 Hz

Fig. 6. Input impedance plot for frequency range 0–80Hz



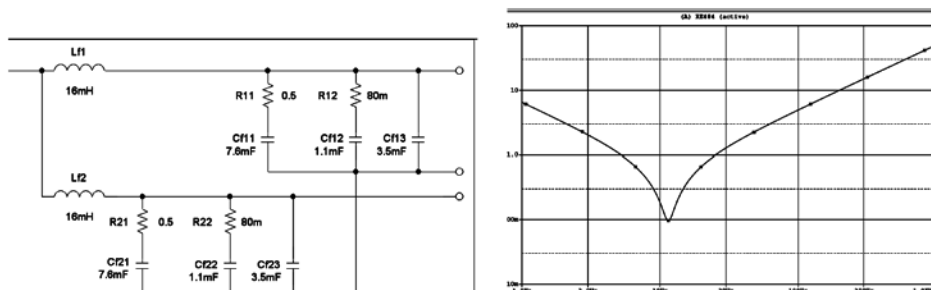
Rys. 7. Wykres impedancji wejściowej w zakresie częstotliwości 0–2000 Hz

Fig. 7. Input impedance plot for frequency range 0–2000Hz

Dla częstotliwości 50 Hz impedancja wejściowa pojazdu zawiera się w przedziale od 4,03 do 4,52 Ω w zależności od współczynnika wypełnienia, a dla częstotliwości 1500 Hz ma wartość 169,60 Ω .

3. Wyznaczenie impedancji wejściowej filtrów wybranych pojazdów trakcyjnych

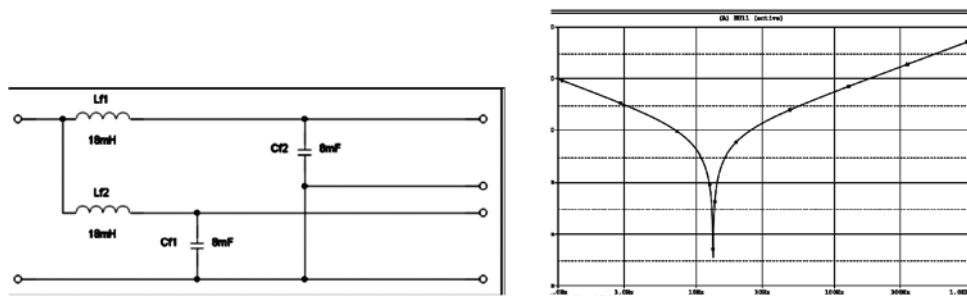
W zależności od struktury układu napędowego pojazdu z napędem przekształtnikowym układy filtrów wejściowych mogą posiadać różne konfiguracje. Dla przykładu przedstawiono kilka filtrów wejściowych dla wybranych pojazdów trakcyjnych. Po wykonaniu w pakiecie Pspice analiz małosygnalowych (częstotliwościowych) dla każdego z nich wyznaczono impedancję wejściową bez obciążania filtra (bieg jałowy). Na rys. 8 przedstawiono schemat filtra wejściowego dla lokomotywy RE484 oraz jego charakterystykę impedancji w funkcji częstotliwości. Układ napędowy lokomotywy o mocy 5,6 MW stanowią dwa przekształtniki zasilające cztery silniki asynchroniczne o mocy 1428 kW każdy.



Rys. 8. Schemat filtra wejściowego lokomotywy RE484 oraz charakterystyka impedancji

Fig. 8. Scheme of input filter of locomotive RE484 and input impedance plot

Na rys. 9 przedstawiono schemat filtra wejściowego dla lokomotywy EU11 oraz jego charakterystykę impedancji w funkcji częstotliwości. Lokomotywa wyposażona jest w dwa osobne napędy dla każdego wózka, zasilające po dwa silniki asynchroniczne o mocy 1500 kW każdy.



Rys. 9. Schemat filtra wejściowego lokomotywy EU11 oraz charakterystyka impedancji

Fig. 9. Scheme of input filter of locomotive EU11 and input impedance plot

Identyczne analizy symulacyjne przeprowadzono dodatkowo dla elektrycznego zespołu trakcyjnego ACATUS oraz lokomotywy EM10, a zestawienie wybranych parametrów uzyskane w trakcie badań symulacyjnych przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1

Pojazd	fr [Hz]	Z (50 Hz) w [Ω]	Z (1500 Hz) w [Ω]	Z (1800 Hz) w [Ω]
RE484	11,5	2,3	75,4	90,5
EU11	13,3	2,6	84,8	101,8
ACATUS	15,3	3,9	127,2	152,7
EM 10	22,4	4,5	169,7	203,5

4. Wymagania według norm i przepisów

Wymagania różnych krajów, dotyczące oddziaływań zakłócających dla trakcji prądu stałego, mówią też o impedancji wejściowej obwodu elektrycznego pojazdu. Wymagania na wartość impedancji wejściowej są różne, zależy to bowiem od zastosowanych systemów sterowania ruchem w danym kraju. Według włoskich przepisów impedancja dla 50 Hz wynosi minimum 2,5 Ω (ponadto dla częstotliwości większych do 34 Hz powinna mieć charakter indukcyjny), według belgijskich – 1,5 Ω , a według holenderskich – 0,64 Ω (dla 75 Hz). W przepisach rosyjskich określono wartość impedancji na 2,5 Ω przy częstotliwości granicznej 17 Hz.

Norma PN-EN 50388 [2] zaleca, aby impedancja wejściowa dla 50 Hz była większa od 2 Ω , a częstotliwość rezonansowa filtrów mieściła się w przedziale 10–40 Hz w zależności od typu zastosowanego napędu. Konieczne jest ustalenie wartości impedancji wejściowej pojazdu dla 50 Hz, a nawet konkretnych wartości impedancji dla różnych częstotliwości wzorem normy dla przetwornic wagonowych [3, 4], które wynikałyby z przewidywanych

harmonicznym w napięciu wyjściowym podstacji trakcyjnej. Wymagania te dotyczą pojedynczego pojazdu, nie są natomiast sprecyzowane dla pojazdów w trakcji ukrotnionej. Autorzy uważają, że dla trakcji ukrotnionej powinny być takie same wymagania na impedancję wejściową jak dla pojedynczego pojazdu w warunkach zasilania PKP. Odstępstwa od tych wymagań mogłyby być możliwe dla konkretnego ocenionego indywidualnie odcinka systemu zasilania.

5. Podsumowanie

W artykule przedstawiono impedancje wejściowe (impedancje filtrów) wyznaczone dla kilku pojazdów trakcyjnych. Podano wartości dla częstotliwości 50 Hz, 1500 Hz i 1800 Hz.

Z przeprowadzonych obliczeń porównawczych wynika, że dla częstotliwości 1500 Hz otrzymuje się wyniki identyczne zarówno dla impedancji wejściowej pojazdu, jak i dla impedancji nieobciążonego filtra. Natomiast dla częstotliwości 50 Hz impedancja wejściowa samego filtra może być ok. 10% niższa od impedancji wyznaczonej z uwzględnieniem obciążenia filtra napędem przekształtnikowym.

Autorzy uważają, że uproszczona metoda obliczeń jest wystarczająco dokładna do oszacowania wartości impedancji wejściowej w funkcji częstotliwości. Autorzy poddają pod dyskusję tezę, że należałoby określić minimalną wartość impedancji wejściowej pojazdów trakcyjnych w funkcji częstotliwości dopuszczalnych do eksploatacji na PKP.

W ramach dyskusji nad zmianami programu badań dopuszczających, wynikających z Rozporządzenia Ministra Infrastruktury z dnia 12 października 2005 r. (Dz. U. Nr 212 poz. 1772), proponujemy wprowadzić ocenę kompatybilności pojazdu trakcyjnego z systemem zasilania wg normy PN-EN 50388:2006 [2], wprowadzonej w Polsce 15 maja 2006 roku, i w ramach tych wymagań uwzględnić proponowaną minimalną wartość impedancji wejściowej dla pojedynczego pojazdu.

Referat został przygotowany w ramach projektu nr 2940/B/T02/2008/35.

Literatura

- [1] PN-EN 50121-3-1: Zastosowania kolejowe. Kompatybilność elektromagnetyczna. Część 3-1: Tabor – Pociąg i kompletny pojazd.
- [2] PN-EN 50388: Zastosowania kolejowe. System zasilania i tabor. Warunki techniczne koordynacji pomiędzy systemem zasilania (podstacja) i taborem w celu osiągnięcia interoperacyjności.
- [3] Karta UIC 550-3: Urządzenia zasilające w energię elektryczną pojazdy pasażerskie. Oddziaływanie na instalacje elektryczne znajdujące na zewnątrz wagonów.
- [4] PN-K-23011: Tabor kolejowy. Elektryczna instalacja zasilania urządzeń wagonowych. Wymagania ogólne.
- [5] Skarpetowski G., Zając W., Czuchra W., *Analytical Calculation of Supply Current Harmonics Generated by Train Unit*, EPE-PEMC Conference, Portorož 2006.
- [6] Skarpetowski G., *The analytical description of impedance conversion in the static converter by means of distribution theory*, EPE Conference, Trondheim 1997.

- [7] Skarpetowski G., Zając W., Czuchra W., *Wyznaczenie metodami analitycznymi harmonicznych generowanych do sieci trakcyjnej przez analizowany zespół trakcyjny*, KBN nr 6T12 2004 C/06368: Czterowagonowy ezt nowej generacji do obsługi przewozów międzyregionalnych, niepublikowane.
- [8] Czuchra W., Woszczyzna W., Zając W., *Badanie oddziaływań podstacji trakcyjnych na urządzenia srk*, Eighth International Conference Modern Electric Traction in Integrated XXI Century Europe MET 2007, September 27–29, Warsaw.