

Współpraca pantografu z siecią trakcyjną tramwajową na skrzyżowaniu

Streszczenie W artykule przedstawione zostało nowe rozwiązanie konstrukcji skrzyżowania sieci trakcyjnej górnej. Skrzyżowanie wydłużone porównane zostało z rozwiązaniem klasycznym. Przeprowadzona została analiza funkcjonowania skrzyżowania we współpracy z odbierakiem. Przeprowadzone symulacje wykazały na możliwości współpracy nowego skrzyżowania z większą prędkością niż skrzyżowania klasycznego.

Abstract In this paper a new type of tramway overhead catenary contact line crossing with extended guidance area has been proposed. The new type of crossing has been described and simulated in comparison to conventional solution. The comparison includes description of pantograph-contact wire cooperation mathematical models as well as basic construction analysis. **Pantograph-tram catenary cooperation at crossing**

Słowa kluczowe: pantograf, sieć trakcyjna, współpraca sieć-pantograf, skrzyżowanie sieci trakcyjnej

Keywords: pantograph, overhead catenary, catenary-pantograph interaction, contact line crossing

doi:10.12915/pe.2014.01.82

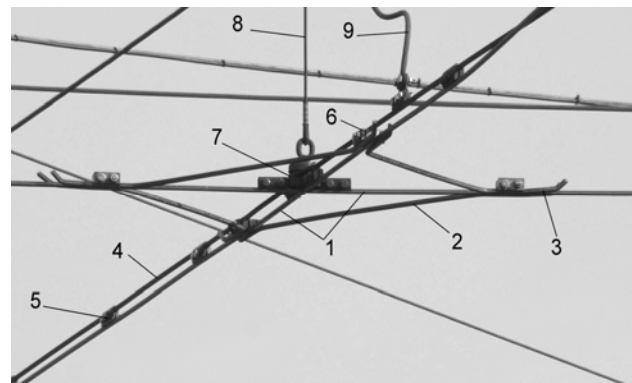
Wstęp¹

Od szybkości przejazdu pojazdu szynowego przez skrzyżowanie zależy przepustowość danej drogi transportowej, zwłaszcza w ruchu miejskim o dużym natężeniu. Szybkość przejazdu zależy między innymi od współpracy koło-szlina na krzyżownicach torowych oraz współpracy odbieraka prądu z siecią jezdnią w momencie mijania przewodu prostopadłego. Skrzyżowanie prostopadłe sieci jezdnych jest charakterystyczne dla naziemnych miejskich systemów transportowych, którymi najczęściej są tramwaje. Podstawowym problemem w przypadku przechodzenia odbieraka prądu przez obszar krzyżujących się przewodów jest ustawienie ślizgacza w takiej płaszczyźnie, aby nie zahaczył o przewód poprzeczny. W tym celu stosowane są rozwiązania z dodatkowymi prowadnicami.

Skrzyżowanie klasyczne

Jednym z typowych rozwiązań stosowanych w sieci tramwajowej jest zastosowanie czterech krótkich przewodów z metalowych prętów. Prowadnice te mogą być położone nieco niżej niż przewody i zakończone nabeżnikami równoległymi do tych przewodów. Skośne prowadnice mają na celu ułożenie ślizgacza w płaszczyźnie wyznaczonej przez obydwa przewody jezdne. Długość tych przewodów ograniczona jest kwadratem obszaru skrzyżowania determinowanym przez wymiar części roboczej ślizgacza i wynosi ok. 0,8 m. Skrzyżowanie przedstawione jest na rysunku 1. W środkowej części skrzyżowania występuje punkt nieciągłości układu przewodnic, stanowiący jedną z wad rozwiązania. Ślizgacz pokonuje w tym miejscu poprzeczną przerwę. Niedogodność ta jest częściowo rekompensowana dzięki okrągłemu przekrojowi przewodów i prowadnic. Omawiane skrzyżowanie ze względu na zwartą budowę stanowi znaczną masę punktową zmniejszającą elastyczność sieci, co niekorzystnie wpływa na jakość jej współpracy z odbierakiem. Jeśli skrzyżowanie dotyczy dwóch linii dwutorowych, istnieje możliwość połączenia drugim przewodem wszystkich czterech skrzyżowań sieciowych ułożonych na planie kwadratu. Połączenie to pomaga w osiągnięciu wzajemnego usztywnienia i ułożenia wszystkich skrzyżowań w jednej płaszczyźnie, także w stanach dynamicznych. Ponieważ prowadnice ukośne ustawione są pod kątem 45°, to obliczana dla nich prędkość wślizgu równa jest prędkości jazdy wagonu. Oznacza to, że jeśli ślizgacz nie jest uprzednio ustawiony w pożądaną

płaszczyźnie, to zostanie poddany dużym przyspieszeniom kątowym, wynikającym z momentów siły na niego działających. Przyspieszenia te będą osiągały dużą wartość nawet przy niewielkich prędkościach jazdy, albowiem ustawienie ślizgacza musi odbyć się na stosunkowo krótkim odcinku około 0,4 m. Decydujący wpływ na siły dynamiczne ma czas w jakim musi nastąpić wzajemne ustawienie ślizgacza i konstrukcji skrzyżowania. Zbyt krótki czas doprowadza do powstawania drgań (powodujących przyspieszone zużycie mechaniczne) i zwiększa ryzyko tworzenia się przerwy stykowej (powodujące zużycie elektryczne łukowe). W efekcie prowadzi to do konieczności znacznego ograniczenia prędkości pojazdów na skrzyżowaniach. Poszukiwane są rozwiązania mające na celu zwiększenia trwałości konstrukcji, podniesienie prędkości przejazdu. Zastosowanie skrzyżowania tarczowego w postaci okrągłej tarczy eliminuje punkt nieciągłości na środku skrzyżowania ale nie zwiększa długości obszaru ustawiania ślizgacza.



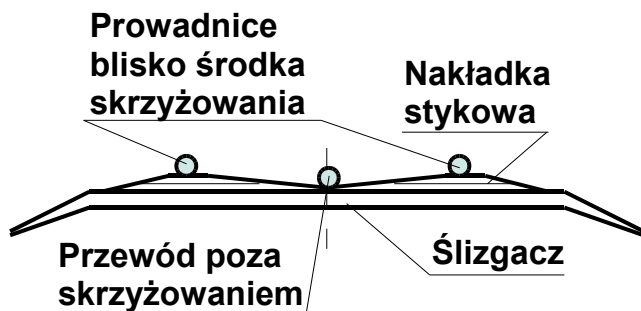
- 1 – przewody jezdne leżące w jednej płaszczyźnie
- 2 – prowadnica ukośna
- 3 – nabeżnik prowadnicy
- 4 – dodatkowy przewód jezdny
- 5 – pionowy uchwyt dystansowy
- 6 – uchwyt dystansowy łączący przewód z prowadnicą
- 7 – uchwyt wieszakowy spajający skrzyżowanie przewodów
- 8 – wieszak
- 9 – połączenie elektryczne przewodu jezdnego i liny nośnej

Rys.1. Klasyczne skrzyżowanie sieciowe. Warszawa, skrzyżowanie Al. „Solidarności” i ul. Gen. Andersa

Dodatkowo oddziaływania dynamiczne wzrastają w przypadku zużytych nakładek stykowych pantografu jak na rysunku 2. Nakładki w trakcie eksploatacji ulegają większemu wytarciu w części środkowej i tworzy się

¹ Referat wygłoszony na konferencji MET'2013 - Nowoczesna Trakcja Elektryczna 10-12 X 2013

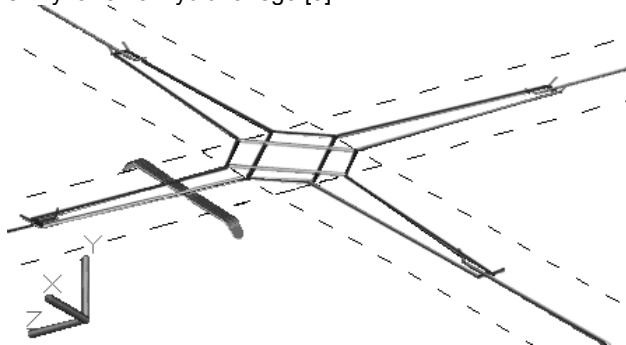
wgłębienie. W częściach bocznych nakładki powierzchnia ślizgowa znajduje się wyżej. Jest to objaw dotyczący wszystkich nakładek stykowych. Dopiero powyżej pewnego stopnia zużycia nakładki są wymieniane [2]. Podczas przejazdu przez skrzyżowanie w krótkim czasie nakładka i wraz z nią ślizgacz musi obniżyć wysokość na odcinku od początku rozjazdu do jego środka. Obniżenie to wymuszane jest przez przesunięcie na bok prowadnice ukośne 2 (rys. 1) w obszarze skrzyżowania. Następnie ślizgacz podnosi się gdyż prowadnice zbiegają się do środka. Gdy nakładki są nowe to efekt różnicy wysokości nie występuje. Prowadnice ukośne mogą być ustawione tylko w poziomie gdyż w innym przypadku nie byłaby możliwa współpraca z nakładkami nowymi. Efekt dodatkowego wymuszenia dynamicznego jest tym silniejszy im nakładka jest bardziej zużyta.



Rys. 2. Położenie przewodów i prowadnic na nakładce ze znacznym stopniem zużycia

Skrzyżowanie o wydłużonym prowadzeniu pantografu

Jednym z rozwiązań eliminującym powyższe wady konstrukcji klasycznej jest opracowany nowy typ skrzyżowania wydłużonego [9].



Rys. 3. Widok ogólny proponowanego skrzyżowania o wydłużonych prowadnicach

W rozwiązaniu prowadnice są wyprowadzone od środka skrzyżowania na dowolną odległość - wielokrotnie większą, niż wynosi długość robocza ślizgacza (rys.3). Dzięki temu można osiągnąć relatywnie małe prędkości wślizgu, a tym samym efekt płynnego naprowadzania ślizgacza do płaszczyzny wyznaczonej przez obydwie krzyżujące się przewody jezdne. Drugim istotnym celem jest zastosowanie układu prowadnic ukośnych w taki sposób, aby wyeliminować punkty nieciągłości. Prowadnice te, wykonane ze standardowych przewodów jezdnych, umieszczone są na poziomie przewodów jezdnych. Każda z nakładek ślizgacza w każdym punkcie skrzyżowania styka się z elementami skrzyżowania w co najmniej dwóch szeroko rozstawionych punktach, co pozwala na utrzymanie ślizgacza w pożądanej płaszczyźnie nieprzerwanie w całym obszarze skrzyżowania. Istotnym elementem są co najmniej 4 dodatkowe łączniki prostopadłe mocowane do prowadnic.

Łączniki te lżejsze od przewodów - wykonane ze stali nierdzewnej, mocowane są do przewodów w sposób zapewniający płynne przejście ślizgacza.

Przyspieszenia kątowe osiągnięte przez ślizgacz będą mniejsze, niż w przypadku konstrukcji klasycznej, zmniejszą się siły dynamiczne między ślizgaczem a konstrukcją skrzyżowania. Maleje prawdopodobieństwo powstawiania przerw łukowych oraz eliminowane są uderzenia o przewód poprzeczny w punktach nieciągłości. Elastyczność sieci w środku skrzyżowania wzrośnie.

Cechy te pozwolą na zwiększenie prędkości przejazdu przez skrzyżowanie oraz większą niezawodność i mniejsze zużycie elementów infrastruktury.

Analiza współpracy odbieraka z siecią w obszarze skrzyżowania

Model matematyczny powstał poprzez dyskretyzowanie parametrów masy, sprężystości i tłumienia sieci trakcyjnej i odbieraka. Do analizy został wykorzystany model jednowymiarowy wielomasowy [8] i jego opis matematyczny. Ze względu na symetrię środkową konstrukcji uznano za wystarczające, aby symulacja odbywała się dla jednego punktu. Zróżnicowane dla obu rodzajów skrzyżowań są czasy przejścia, masy zastępcze oraz elastyczności współpracujących ze sobą elementów. Modelowanie pantografów i sieci trakcyjnych jest podstawową metodą stosowaną w analizie ich współpracy, podobnie jak w analizach innych podsystemów systemu trakcji elektrycznej [1,3,5,6]. Typowo regulowane skrzyżowania mają niewielkie zmiany położenia. Podczas przejazdu pod skrzyżowaniem sieci trakcyjnej położenia ramion pantografu praktycznie nie powinny się zmieniać. Model wykorzystany do analizy współpracy z siecią trakcyjną w obszarze skrzyżowania został więc ograniczony do ślizgacza i sieci trakcyjnej. Do wstępnej oceny funkcjonowania skrzyżowania sieci trakcyjnej we współpracy ze ślizgaczem pantografu, szczególnie w okresach krótkich przerw stykowych, jest to model wystarczający. Pozostałe elementy pantografu nie wpływają w istotny sposób na krótkookresowe zjawiska w punkcie styku przy małych amplitudach ruchu ślizgacza. Wykorzystany model uwzględnia również stany dynamicznej utraty styku (rys.4). Podstawowym parametrem mechanicznym opisującym wynikowo współpracę nakładki stykowej ślizgacza z przewodem jezdny jest siła stykowa F nacisku nakładki na przewód. Zachowania dynamiczne modelu opisują poniższe układy równań.

$$(1) \quad M_s \ddot{Y}_s + C_n (\dot{Y}_s - \dot{Y}_n) + C_s (\dot{Y}_s - \dot{Y}_p) + K_n (Y_s - Y_n) + K_s (Y_s - Y_p) + M_s g = 0$$

gdzie: g – przyspieszenie ziemskie, M_s – masa ślizgacza, K_s – sztywność zawieszenia ślizgacza, C_s – tłumienie wiskotyczne zawieszenia ślizgacza, Y_s – położenie ślizgacza, K_n – sztywność nakładki stykowej, C_n – tłumienie wiskotyczne nakładki stykowej, Y_n – położenie nakładki stykowej, Y_p – położenie punktu podstawy zawieszenia ślizgacza.

Równanie (1) wykorzystywane jest w analizie obu stanów modelu, tj. w czasie trwania styku i w czasie przerwy stykowej, zaś równania (2) i (3) tylko w czasie trwania styku.

$$(2) \quad M_d \ddot{Y}_d + C_d (\dot{Y}_d - \dot{Y}_z) + C_c (\dot{Y}_d - \dot{Y}_n) + K_d (Y_d - Y_z) + K_c (Y_d - Y_n) + M_d g = 0$$

gdzie: M_d – masa zastępcza przewodu, K_d – sztywność podwieszenia przewodu, C_d – tłumienie wiskotyczne podwieszenia przewodu, Y_d – położenie przewodu, K_c – sztywność warstw stykowych, nakładki i przewodu, C_c – tłumienie wiskotyczne warstw stykowych, nakładki i przewodu, Y_c – położenie podwieszenia przewodu

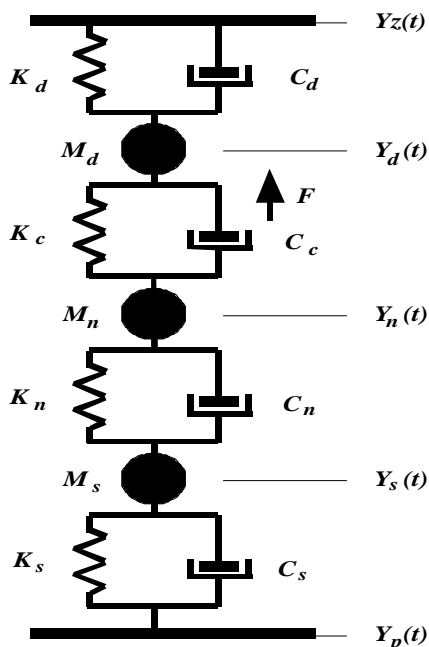
$$(3) \quad M_n \ddot{Y}_n + C_c (\dot{Y}_n - \dot{Y}_s) + C_n (\dot{Y}_n - \dot{Y}_s) + K_c (Y_n - Y_d) + K_n (Y_n - Y_s) + M_n g = 0$$

gdzie: M_n - masa nakładki.

Równania (1), (4) i (5) opisują zachowanie się układu w czasie przerwy stykowej.

$$(4) \quad M_d \ddot{Y}_d + C_d (\dot{Y}_d - \dot{Y}_z) + K_d (Y_d - Y_z) + M_d g = 0$$

$$(5) \quad M_n \ddot{Y}_n + C_n (\dot{Y}_n - \dot{Y}_s) + K_n (Y_n - Y_s) + M_n g = 0$$



Rys.4. – Model ślizgacza i przewodu [8]

Elementy występujące w modelu i opisane indeksami:

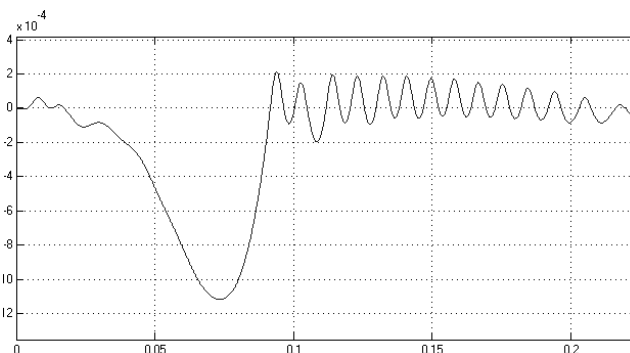
- d – przewód jezdny
- c – warstwa stykowa przewodu i nakładki
- n – nakładka
- s – ślizgacz

Parametry sieci trakcyjnej

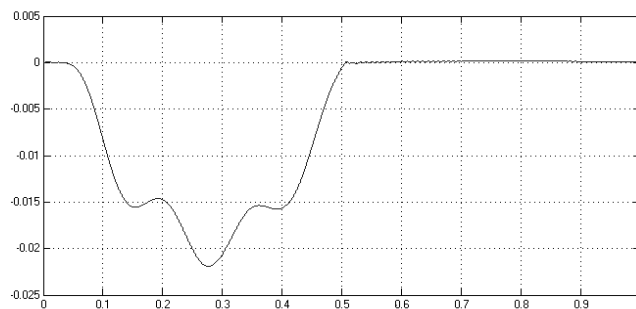
Analizie została poddana dynamiczna współpraca skrzyżowań sieci trakcyjnej ze ślizgaczem. W obu przypadkach, parametry ślizgacza, statyczna siła nacisku i amplituda wymuszenia były identyczne. Do obliczeń zachowań modelu zostały wybrane typowe parametry na podstawie literatury [1,4,5,8] i analiz własnych. Skrzyżowania różniły się sztywnością i masą zastępczą kontaktującą się z nakładką stykową ślizgacza. Analiza została przeprowadzona z wykorzystaniem programu Matlab jako podstawowego narzędzia obliczeniowego [6,8]. Przyjęto że:

- skrzyżowanie klasyczne jest konstrukcją na tyle zwartą, że można je traktować jako ciało sztywne, elastycznie podwieszone,
- skrzyżowanie o wydłużonych prowadnicach jest konstrukcją o pewnej elastyczności

Newralgiczne dla współpracy pantografu w obszarze skrzyżowania klasycznego ze względu na występujące siły jest przejście ślizgacza od miejsca zamocowania prowadnic do środka skrzyżowania. Po minięciu środka często występują oderwania ślizgacza od sieci. Wartość Y_n (nakładki) większa od wartości Y_d (przewodu) wskazuje na styk nakładki z przewodem jezdny i sprężyste ściśnięcie warstwy powierzchniowej nakładki. Jednocześnie wskazuje na wielkość sił stykowych z przewodem jezdny na powierzchni nakładek. Obniżenie wartości Y_n poniżej wartości Y_d wskazuje na przerwę stykową. Analizowane były drgania układu ślizgacz-konstrukcja skrzyżowania, które wywołują krótkotrwałe oderwania. Na rysunkach 5 i 6 przedstawione zostały odchylenia ślizgacza od sieci trakcyjnej dla obu rodzajów skrzyżowań przy prędkości 15km/h i jednakowego wymuszenia - opuszczenia środka rozjazdów względem początku o 0,03 m.



Rys. 5. – Przebieg przemieszczenia $Y_n - Y_d$ dla skrzyżowania wydłużonego



Rys. 6. – Przebieg przemieszczenia $Y_n - Y_d$ dla skrzyżowania klasycznego

Podczas współpracy ślizgacza z siecią trakcyjną, w obszarze skrzyżowania przy dużych nierównościach ustawienia nawet przy niewielkich prędkościach 15km/h następują oderwania ślizgacza. Amplituda oderwania ślizgacza od sieci w przypadku skrzyżowania klasycznego jest 20 razy większa niż w przypadku skrzyżowania wydłużonego. Czas oderwania nakładki ślizgowej od przewodu wynosi około 50 ms w pierwszym przypadku a w drugim przypadku około 40 ms jest więc ośmiokrotnie dłuższy. W efekcie łuk elektryczny występujący w czasie przerw stykowych, podczas współpracy, może powodować w eksploatacji uszkodzenia przewodów na dłuższych odcinkach niż w przypadku współpracy ze skrzyżowaniem wydłużonym. Przy rozregulowaniu skrzyżowania w drugą stronę - z podniesieniem środka rozjazdu względem

początku o 0,03 m amplituda odchylenia ślizgacza w stosunku do sieci przedstawiona jest w tabeli nr.1. poniżej. Rozregulowania do 0,03 m stanowiące wymuszenie dla ślizgacza praktycznie nie wpływają na pracę skrzyżowania wydłużonego. W takim zakresie mieszczą się zmiany związane ze zużyciem nakładki stykowej. Większe rozregulowania np. 0.05 m wywołują większe odchylenia i oderwania ślizgacza od przewodu. Dla przejazdu z prędkością mniejszą od 30 km/h w przypadku skrzyżowania klasycznego będą one większe niż przy przejeździe w przypadku skrzyżowania wydłużonego

Tabela 1. Odchylenia ślizgacza od sieci trakcyjnej dla obu typów rozjazdów przy różnych prędkościach dla wymuszenia 0,03m

Prędkość przejazdu [km/h]	Odchylenie [m]	
	Skrzyżowanie klasyczne	Skrzyżowanie wydłużone
5	0,030	0
10	0,040	0
15	0,040	0
20	0,035	0,001
25	0,025	0,001
30	0,022	0,002

Tabela 2. Odchylenia ślizgacza od sieci trakcyjnej dla obu typów rozjazdów przy różnych prędkościach dla wymuszenia 0,05m

Prędkość przejazdu [km/h]	Odchylenie [m]	
	Skrzyżowanie klasyczne	Skrzyżowanie wydłużone
5	0,054	0,016
10	0,074	0,023
15	0,073	0,029
20	0,066	0,032
25	0,057	0,034
30	0,048	0,033

Podsumowanie

Przedstawione wyniki analizy wskazują na zalety skrzyżowania wydłużonego w stosunku do skrzyżowania klasycznego. Podczas przejazdu z prędkością 15 km/h przy małych odchyłkach w regulacji skrzyżowań – 0,03 m w przypadku skrzyżowania wydłużonego nie występują drgania sieci podczas gdy skrzyżowanie klasyczne wykazuje drgania o amplitudzie do 0,04 m. Dla większego rozregulowania 0,05 m skrzyżowanie wydłużone drga z amplitudą ponad cztery razy mniejszą. Istnieje możliwość przejazdu pod skrzyżowaniem wydłużonym z większą prędkością niż pod skrzyżowaniem klasycznym. Prędkość przejazdu ograniczana jest do 15 km/h wymaganiami technicznymi. W przypadku nawet dobrze wyregulowanych skrzyżowań przy przejeździe ślizgacza z silnie zużytą

nakładką będą występowały oderwania. Możliwe jest wyeliminowanie tych oderwań przy zastosowaniu skrzyżowania wydłużonego.

LITERATURA

- [1] Dudzik M., Jagiełło A.S., Dynamiczne aspekty współpracy odbierak prądu – sieć trakcyjna, *SEMTRAK Ogólnopolska Konferencja Naukowa Trakcji Elektrycznej*, XV (2012), 123-134
- [2] Karkosiński D., Karwowski K., Mizan M., Monitoring odbieraków prądu w warunkach eksploatacyjnych na linii kolejowej *Przegląd Elektrotechniczny* 12/2013, 154-160
- [3] Jan Awryjewicz, Wadim A. Krysko, Drgania układów ciągłych, *WNT* 2000 r.
- [4] Kawecki A., Knych T., Auguściuk M., Dziedzic E., Kaniewski M., Kieniewicz P., Kuca M., Kwaśniewski P., Maciołek T., Majewski W., Mamala A., Mierzejewski L., Rojek A., Woźniak K., Zasadziński K., Nowa generacja wysokoobciążalnych sieci trakcyjnych –YC120-2CS150 i YC150-2CS150 (2) Właściwości mechaniczne przewodów jezdnych z miedzi srebrowej, *Technika Transportu Szynowego*, (2007), nr 3, 52-59
- [5] Kumaniecka A., Prącik M., Modelling and Identification of Catenary-Pantograph System *Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, Warsaw 41 (2003), 887-901
- [6] Lewandowski M., Method of calculations of current harmonics in a current taken from 3kV DC network by a traction vehicle with asynchronous drive, *Przegląd Elektrotechniczny*, 86 (2010), nr 6, 27-275
- [7] Maciołek T., Zmniejszanie zużycia przewodów sieci trakcyjnej dużych prędkości poprzez zmiany konstrukcji pantografów i sieci trakcyjnej, *Technika Transportu Szynowego*, (2007), nr 12, 55-58
- [8] Maciołek T. Elastyczna nakładka poprawiająca współpracę pantografu z siecią trakcyjną, *Przegląd Elektrotechniczny* 2013 R89 nr1a/2013 ISSN 0033-2097 str. 12-16
- [9] Maciołek T. Skrzyżowanie sieci trakcyjnej górnej, *zgłoszenie patentowe* nr PL396123
- [10] Rachid A., Pantograph Catenary Control and Observation using the LMI Approach, *EEE Conference on Decision and Control and European Control Conference (CDC-ECC) Orlando USA*, 50 (2011), 2287-2292
- [11] Ramos J., Such M., Carnicero A., Sánchez C., Dynamic simulation of the system pantograph-catenary-vehicle-track, *World Congress Railway Research, Lille France* 9 (2011)
- [12] Szeląg A., Zagadnienia analizy i projektowania systemu trakcji elektrycznej prądu stałego z zastosowaniem technik modelowania i symulacji, *Prace Naukowe PW, Seria Elektryka*, z. 123 (2002), 178

Autorzy: dr inż. Tadeusz Maciołek, Politechnika Warszawska Instytut Maszyn elektrycznych pl. Politechniki 1 00-661 Warszawa, E-mail: tadeusz.maciolek@ee.pw.edu.pl; inż. Michał Głowacz, Instytut Kolejnictwa, ul. Chłopickiego 50, 04-275 Warszawa, E-mail: mglowacz@ikolej.pl