

Tadeusz Maciołek

## Skrzyżowanie tramwajowe – newralgiczny punkt sieci trakcyjnej

*Przerwy stykowe między pantografem i siecią trakcyjną przy przepływie prądu wywołują uszkodzenia powierzchni przewodu i nakładki stykowej. Przyspieszają one zużycie eksploatacyjne. W artykule przedstawione zostały efekty przerw stykowych, jak również przyczyny ich powstawania na skrzyżowaniu sieci. Zaprezentowano również rozwiązania konstrukcji skrzyżowania sieci trakcyjnej górnej. Przeprowadzona została analiza funkcjonowania skrzyżowania we współpracy z odbierakiem.*

Trwałość sieci trakcyjnej zależy w istotnym stopniu od eksploatacyjnego zużycia przewodów jezdnych. O trwałości decyduje punktowe nadmierne zużycie przewodu. Zużycie przewodów związane jest z:

- ❖ tarcieniem nakładki ślizgacza. Zmniejszeniu podlega przekrój przewodu jezdny. Po osiągnięciu minimalnych dopuszczalnych wartości, przewód należy wymienić. Decydujące jest miejscowe maksymalne zużycie przewodu lub wartość średnia przekroju przewodu,
- ❖ przegrzaniem powyżej dopuszczalnej temperatury prowadzącym do rekryształizacji miedzi, co obniża jej wytrzymałość,
- ❖ pojawianiem się łuku elektrycznego, występującego podczas przerw stykowych przy przepływie prądu,
- ❖ wystąpieniem uszkodzeń mechanicznych przy skrajnie dużych siłach w przypadku awarii pantografu.

Dla uzyskania dobrej jakości współpracy odbieraka prądu z siecią trakcyjną istotne jest zapewnienie optymalnej, możliwie stałej wielkości siły docisku. Wszelkie nierówności na przewodzie powodują gwałtowne zmiany siły nacisku nakładki stykowej na przewód.

Zbyt mała siła powoduje wzrost strat energii na styku nakładki i przewodów. Gdy siła spada do zera, następuje utrata styku [6, 7, 9, 12]. Utrata styku powoduje przepływ prądu poprzez łuk elektryczny. Wiąże się to z gwałtownym wzrostem napięcia na styku od wartości poniżej 1 V do ponad 40 V. Następuje proces gwałtownego uszkodzenia powierzchni nakładki stykowej i przewodu jezdny. Po nadtopieniach wywołanych łukiem elektrycznym pojawiają się nierówności na przewodzie. Siły nacisku podczas następnych przejazdów w tych obszarach ulegają większym zmianom. Obszary

te ulegają zeszlifowaniu w trakcie kolejnych przejazdów co przyspiesza zużycie przewodu. W części miejsc, w których prędkość przejazdu jest duża, mogą następować zwiększone oderwania nakładki ślizgacza i w krótkim czasie może dojść do granicznego zużycia przewodu. Ważne jest więc zredukowanie liczby punktów utraty styku między nakładkami ślizgacza i przewodem jezdny oraz skrócenie czasu przerw stykowych.

Podczas przejazdu tramwaju przerwy stykowe występują już przy prędkości kilkunastu km/h. Wiąże się to z występowaniem w konstrukcji wielu punktów o obniżonej elastyczności – złączki, izolatory, skrzyżowania.

Dodatkowo skalę uszkodzeń zwiększa wprowadzenie do ruchu tramwajów o większej mocy i z możliwością rekuperacji [14, 15], co zwiększa istotę problemu prawidłowości współpracy przewodów jezdny – nakładka odbieraka. Mimo zmniejszenia ilości pobieranej energii, znacznie wzrasta wartość skuteczna prądu na styku nakładki stykowej i przewodu. Pojawia się przepływ dużego prądu nie tylko w fazie rozruchu, ale również w fazie hamowania.

Dla oceny zjawiska zostały przeprowadzone badania efektu łukowego. Badania przeprowadzono dla nakładki grafitowej metalizowanej miedzią we współpracy z miedzianym przewodem jezdny przy prędkości 1/ms.

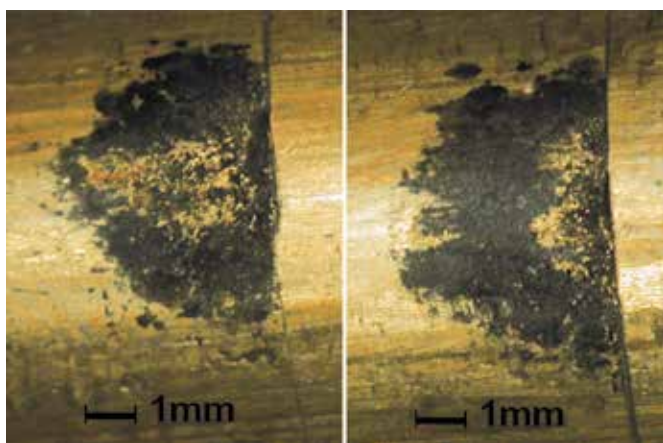
Badania przeprowadzono przy wymuszeniu prądowym krótkotrwałym o czasie 2 ms. Już krótkotrwałe działanie łuku elektrycznego wywołuje nadtopienia powierzchni przewodu. Na powierzchni przewodu pojawił się również grafit pochodzący z rozpylenia materiału nakładki. Większa wartość prądu powoduje wzrost szerokości krateru. Kratery łukowe przy wartościach prądu rzędu 500 A przedstawione zostały na rysunku 1.

Normy nie określają dopuszczalnej ilości przerw stykowych o czasie trwania poniżej 5ms. Mimo że są one dopuszczalne w szerokim zakresie, ich efekt jest szkodliwy. Minimalne uszkodzenia na powierzchni przewodu pogłębiają się przy kolejnych przejazdach.

Dla oceny zjawiska przeprowadzona została analiza na modelu sieci trakcyjnej i odbieraka.

Układ modelowy zawiera dyskretyzowane parametry masy, sprężystości i tłumienia sieci trakcyjnej i odbieraka. Do analizy został wykorzystany model jednowymiarowy wielomasowy [7] i jego opis matematyczny. Modelowanie pantografów i sieci trakcyjnych jest podstawową metodą stosowaną w analizie ich współpracy, podobnie jak w analizach innych podsystemów systemu trakcji elektrycznej [1, 3, 4, 5, 15]. Podczas przejazdu pod punktem sieci trakcyjnej w tak krótkim czasie położenia ramion pantografu praktycznie nie powinny się zmieniać. Model wykorzystany do analizy współpracy z siecią trakcyjną został więc ograniczony do ślizgacza i sieci trakcyjnej [14]. Do wstępnej oceny funkcjonowania 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. 2). 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.



**Rys. 1.** Efekty łukowe na powierzchni przewodu dla średniej wartości prądu 500 A działającego w czasie 2 ms

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

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.

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

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,  
 $Y_z$  – położenie podwieszenia przewodu.

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

gdzie:

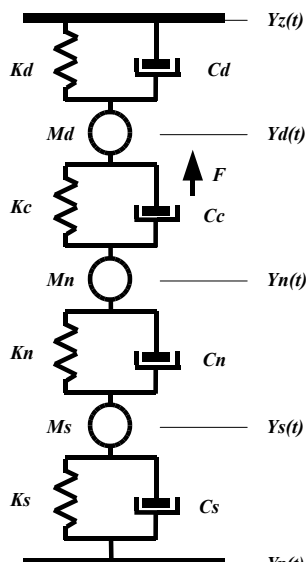
$M_n$  – masa nakładki.

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

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

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

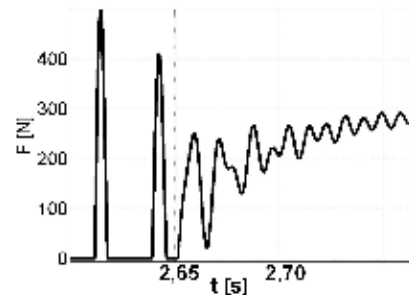
Oderwania nakładki stykowej pantografu od przewodu jezdnego występują najczęściej w punktach nieciągłości sieci trakcyjnej i punktach o podwyższonej sztywności. Takimi miejscami są punkty mocowań (podwieszenia), izolatory sekcyjne, skrzyżowania. Szczególnie newralgicznym obszarem jest skrzyżowanie sieci trakcyjnej. Szybkość przejazdu przez skrzyżowanie zależy między innymi od współpracy odbieraka prądu z siecią jezdną w momencie mijania przewodu prostopadłego. Skrzyżowanie prostopadłe sieci jezdnych jest charakterystyczne dla naziemnych miejskich systemów transportowych, którymi najczęściej są tramwaje. Problemem w przypadku przechodzenia odbieraka prądu przez obszar krzyżujących się przewodów jest ustawienie ślizgacza w takiej płaszczyźnie, aby nie uderzył o przewód poprzeczny. W tym celu stosowane są rozwiązania z dodatkowymi prowadnicami. Istotne jest również przejście nakładki odbieraka z przewodu w punkcie początkowym prowadnic.



Rys. 2. Model ślizgacza i przewodu, gdzie:  $d$  – przewód jezdny,  $c$  – warstwa stykowa przewodu i nakładki,  $n$  – nakładka,  $s$  – ślizgacz



Rys. 3. Ruch nakładki pantografu w trakcie przerwy stykowych



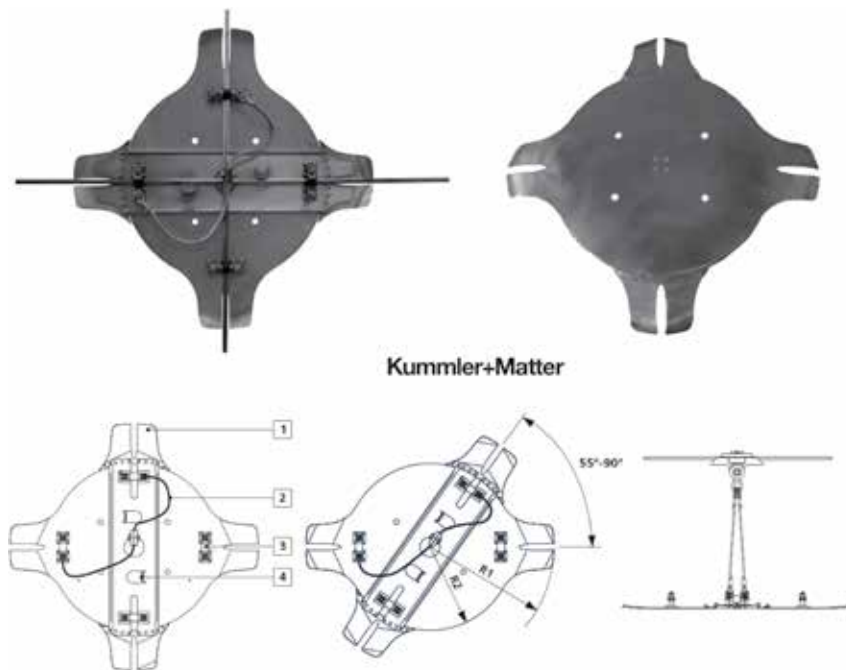
Rys. 4. Siła stykowa w czasie odzyskiwania styku po przerwie stykowej

## Klasyczne skrzyżowanie sieci trakcyjnych

Typowym rozwiązaniem stosowanym w sieci tramwajowej jest zastosowanie czterech krótkich przewodnic z metalowych prętów. Prowadnice te mogą być położone nieco niżej niż przewody i zakończone odgiętymi do góry nabeżnikami równoległymi do tych przewodów. Skośne prowadnice mają na celu ułożenie ślizgacza w płaszczyźnie wyznaczonej przez obydwa przewody jezdne. Długość tych przewodnic ograniczona jest kwadratem obszaru skrzyżowania, determinowanym przez wymiar części roboczej ślizgacza i wynosi ok. 0,8 m. Skrzyżowanie przedstawione jest na rysunku 5. 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, prowadnic i konstrukcji uchwyty mocujących. Klasyczne 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. Jeśli ślizgacz nie jest uprzednio ustawiony w pożądanej płaszczyźnie, zostanie poddany dużym



Rys. 5. Typowe tramwajowe skrzyżowanie sieciowe (Warszawa)



Rys. 6. Prostopadłe skrzyżowanie sieciowe z przewodnicą tarczową [10]

przyspieszeniom kątowym, wynikającym z działających na niego momentów siły. Przyspieszenia te będą osiągały dużą wartość nawet przy niewielkich prędkościach jazdy, bowiem ustawienie ślizgacza musi odbyć się na stosunkowo krótkim odcinku około 0,3 m. Decydujący wpływ na siły dynamiczne ma czas, w jakim musi nastąpić wzajemne ustawienie ślizgacza i konstrukcji skrzyżowania. Krótki czas doprowadza do powstawania drgań i zwiększa ryzyko tworzenia się przerwy stykowej (powodującej zużycie elektryczne łukowe). W efekcie prowadzi to do konieczności znacznego ograniczania prędkości pojazdów na skrzyżowaniach. Poszukiwane są rozwiązania mające na celu zwiększenie trwałości konstrukcji i podniesienie prędkości przejazdu. Jednym z rozwiązań jest skrzyżowanie tarczowe przedstawione na rysunku 6. Eliminuje ono punkt nieciągłości na środku skrzyżowania, ale nie zwiększa długości obszaru ustawiania ślizgacza. Istotną jest również duża masa takiej konstrukcji.

Innym rozwiązaniem jest skrzyżowanie skrzydełkowe o mniejszej masie przedstawione na rysunku 7.

Wszystkie te rozwiązania mają dwie podstawowe wady:

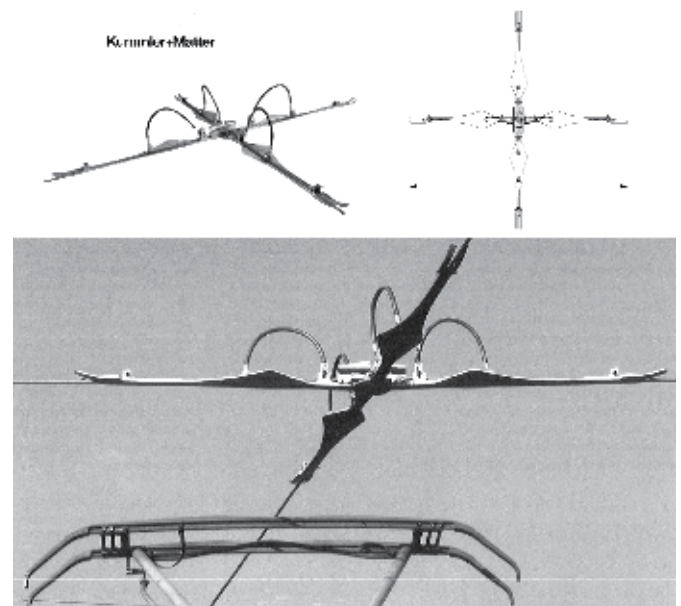
- na niewielkiej długości – kilku cm następuje istotna zmiana szerokości stykowej sieci z nakładką. W początkowym okresie pracy, po regulacji i doszlifowaniu nie stanowi to problemu. Poziom powierzchnię stykowej z obu stron punktu przejścia jest taki sam. W miarę eksploatacji następuje szybsze ścieranie przewodu niż konstrukcji skrzyżowania. Szczególnie silnie efekt ten występuje w przypadku przewodnicy tarczowej. Uderzenia i przerwy stykowe występują w miejscach wejścia ślizgacza pod tarczę na początku skrzyżowania i wyjścia na końcu;
- zmiana szerokości obszaru współpracy między początkiem skrzyżowania, a jego środkiem. Czas przejazdu na długości połowy skrzyżowania jest bardzo krótki (<0,1 s). Występują problemy z ustawieniem ślizgacza równoległe do płaszczyzny stykowej konstrukcji skrzyżowania w jego środku. Dotyczy to wszystkich stosowanych typów skrzyżowań. Szczególnie silnie zjawisko to występuje przy skrzyżowaniu skrzydełkowym.

Oddziaływania dynamiczne wzrastają w przypadku silnie zużytych nakładek stykowych pantografu, jak przedstawiono na ry-

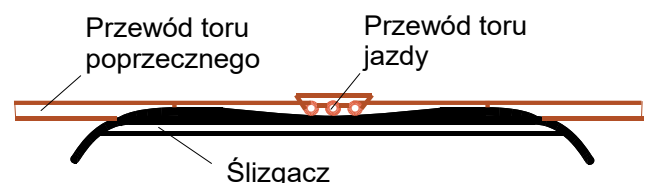
sunku 8. W trakcie eksploatacji nakładki ulegają większemu ścieraniu w części środkowej i tworzy się wgłębienie. Na krańcach ślizgacza nakładka ma powierzchnię ślizgową położoną wyżej niż w środku. Dotyczy to wszystkich nakładek stykowych w trakcie eksploatacji. Dopiero powyżej pewnego stopnia zużycia 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 w obszarze skrzyżowania wymuszane jest przez prowadnice lub tarczę. Po przejechaniu środka skrzyżowania ślizgacz podnosi się gdyż prowadnice zbiegają się do środka. Gdy nakładki są nowe efekt różnicy wysokości nie występuje. Tarcza lub prowadnice ukośne mogą być ustawione tylko w poziomie, gdyż w innym przypadku nie byłaby możliwa współpraca z nowymi nakładkami. Im nakładka jest bardziej zużyta, tym oddziaływania – siły mechaniczne są większe.

## Nowe rozwiązanie skrzyżowania

Możliwym rozwiązaniem, eliminującym powyższe wady istniejących konstrukcji, jest opracowany nowy typ skrzyżowania [8]. W konstrukcji tej można wykonać znacznie dłuższe odcinki od początku konstrukcji skrzyżowania do punktu krzyżowania osi torów.

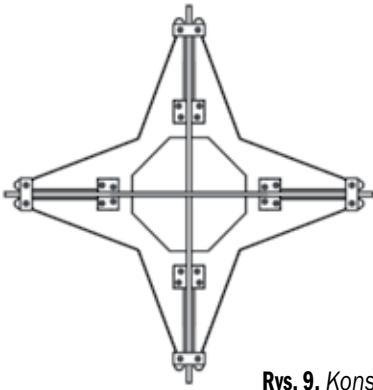


Rys. 7. Prostopadłe skrzyżowanie sieciowe z przewodnicami skrzydełkowymi [10]



Rys. 8. Położenie przewodów względem nakładki ze znacznym stopniem zużycia przy wjeździe na skrzyżowanie





Rys. 9. Konstrukcja nowego rozwiązania

Prowadnice w rozwiązaniu mogą być wyprowadzone od środka skrzyżowania na dowolną odległość - wielokrotnie większą, niż wynosi długość robocza ślizgacza (rys. 9). Można osiągnąć mniejsze prędkości pozorne (prostopadłe do osi toru) wprowadzania brzęgu konstrukcji skrzyżowania na nakładkę odbieraka. Występuje efekt płynnego naprowadzania ślizgacza do płaszczyzny wyznaczonej przez środek skrzyżowania. Nakładka 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.

### Analiza współpracy sieci trakcyjnej z pantografem w obszarze skrzyżowania

Analizie poddana została dynamiczna współpraca skrzyżowań sieci trakcyjnej ze ślizgaczem dla rozwiązania typowego i nowego. W obu przypadkach parametry ślizgacza, statyczna siła nacisku i amplituda wymuszenia były identyczne.

Przyjęto że:

- ❖ skrzyżowanie klasyczne jest konstrukcją na tyle zwartą, że można je traktować jako ciało sztywne, elastycznie podwieszone,
- ❖ skrzyżowanie wg nowego rozwiązania jest konstrukcją o pewnej elastyczności.

Podczas współpracy ślizgacza z siecią trakcyjną, w obszarze klasycznego skrzyżowania przy dużych nierównościach ustawienia nawet przy niewielkiej prędkości 15 km/h następują oderwania ślizgacza. Amplituda oderwania ślizgacza od sieci w przypadku skrzyżowania klasycznego jest kilkanaście razy większa niż w przypadku skrzyżowania wydłużonego. Czas oderwania nakładki ślizgowej od przewodu jest około ośmiokrotnie dłuższy. Łuk elektryczny występujący w czasie przerw stykowych, podczas współpracy może powodować w eksploatacji uszkodzenia przewodów na dłuższych odcinkach niż w przypadku współpracy ze skrzyżowaniem nowego typu.

### Wnioski

Wyniki analiz wskazują na zalety nowej konstrukcji skrzyżowania w stosunku do typowych, dotychczas stosowanych skrzyżowań. Nawet dla dobrze wyregulowanych skrzyżowań przy przejeździe ślizgacza z silnie zużytą nakładką będą występowały przerwy styku. Efektem przerw styku nawet w krótkich okresach będzie zmniejszenie trwałości przewodów. Nawet po jednorazowym działaniu łuku elektrycznego może wystąpić w danym miejscu przyspieszone zużycie przewodu w wyniku kolejnych przerw stykowych.

### Bibliografia:

1. Dudzik M., Jagiełło A.S., *Dynamiczne aspekty współpracy odbieraka prądu – sieć trakcyjna*, SEMTRAK Ogólnopolska Konferencja Naukowa Trakcji Elektrycznej, XV 2012.

2. Karkosiński D., Karwowski K., Mizan M., *Monitoring odbieraków prądu w warunkach eksploatacyjnych na linii kolejowej*, „Przegląd Elektrotechniczny” 2013, nr 12.
3. Kawecki A., Knych T., Auguściuk M., Dziejdzic 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.
4. Kumaniecka A., Prącik M., *Modelling and Identification of Catenary-Pantograph System*, „Journal of Theoretical and Applied Mechanics”, 2003 Vol. 41, No. 4.
5. 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”, 2010, nr 6.
6. Maciołek T., Głowacz M., *Współpraca pantografu z siecią trakcyjną tramwajową na skrzyżowaniu*, „Przegląd Elektrotechniczny” 2014, nr 1.
7. Maciołek T., *Elastyczna nakładka poprawiająca współpracę pantografu z siecią trakcyjną*, „Przegląd Elektrotechniczny” 2013, nr 1a.
8. Maciołek T., *Skrzyżowanie sieci trakcyjnej górnej*, zgłoszenie patentowe nr PL407491.
9. Maciołek T., *Zmniejszanie zużycia przewodów sieci trakcyjnej dużych prędkości poprzez zmiany konstrukcji pantografów i sieci trakcyjnej*, „Technika Transportu Szynowego” 2007, nr 12.
10. Materiały firmy Kummel+Matter AG <http://www.kuma.ch/de/katalog/strassenbahn/kreuzungen-weichen/kreuzungen-stb-stb> (dostęp 10.12.2015)
11. 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.
12. 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)
13. Szelaż A., *Efektywność hamowania odzyskowego w zelektryfikowanym transporcie szynowym*, „Pojazdy Szynowe” 2009, nr 4.
14. Szelaż A., Maciołek T., Drażek Z., Patoka M., *Aspekty efektywności i energooszczędności w procesie modernizacji układów zasilania trakcji tramwajowej*, „Pojazdy Szynowe” 2011 nr 3.
15. Szelaż A., *Zagadnienia analizy i projektowania systemu trakcji elektrycznej prądu stałego z zastosowaniem technik modelowania i symulacji*, Prace Naukowe PW, Seria Elektryka, z. 123 2002.

### Autor:

doc. dr inż. **Tadeusz Maciołek** – Politechnika Warszawska, Instytut Maszyn elektrycznych, Zakład Trakcji Elektrycznej

### Tram line crossing – a vital point of catenary

*Breaks of contact between pantograph and catenary during current flow cause damages of surfaces of contact wire and pantograph's contact strip. So exploitation worn-out of both is increased. There are presented in the paper causes and effects of breaks in contact at catenary crossing. Solutions of catenary crossing construction are shown. An undertaken analysis of catenary crossing co-operation with a pantograph is presented.*