



---

**NOWE SPOSOBY POMIARU JEDNOSTKOWEJ KONDUKTANCJI  
PRZEJŚCIA TORÓW WZGLĘDEM ZIEMI**

**THE NEW MEASUREMENT METHODS OF CONDUCTANCE  
RAIL-EARTH PER UNIT LENGTH**

Mgr inż. Józef Dąbrowski, dr inż. Władysław Dziuba

Instytut Elektrotechniki, Zakład Trakcji Elektrycznej

Słowa kluczowe: prądy błądzące, pomiary, jednostkowa konduktancja szyn względem ziemi  
Keywords: stray currents, measurements, conductance rail-earth per unit length

**Streszczenie**

Rekomendowana w normie europejskiej EN 50122-2 metoda pomiaru jednostkowej konduktancji przejścia szyn względem ziemi  $G'$  jest niepraktyczna, gdyż wymaga wykonywania pomiaru w czasie przerwy w ruchu pojazdów; oprócz tego badany odcinek toru musi być oddzielony od reszty sieci szynowej za pomocą złączy izolujących, których normalnie nie stosuje się w tramwajowych sieciach powrotnych. W referacie zaproponowano nową metodę pomiaru  $G'$ , możliwą do stosowania podczas ruchu pojazdów. Metoda ta polega na rejestracji prądu w szynach jezdnych i potencjału szyny-ziemia na początku i na końcu odcinka pomiarowego i na obliczaniu na tej podstawie wartości  $G'$ . Podano warunki wykonywania pomiaru i wyniki badań odcinków torów tramwajów warszawskich. Nowy sposób pomiaru zweryfikowano z pomyślnym wynikiem, stosując metodę rekomendowaną przez normę EN 50122-2.

**Summary**

The measurement method of conductance rail-earth per unit length  $G'$  recommended by European Standard EN 50122-2 is unpractical because the measurements should be done during the break in tramway traffic and the tested section of track must be isolated from the rest of rail-network by the means of insulation joints, which are not used normally in tramway running rails. The new measurement method of  $G'$  proposed in this paper could be used also when the trains are running on the tracks. According to the new method, the value of  $G'$  is calculated from recordings of rail to earth potentials and recordings of currents in running rails on both ends of tested track-section. Requirements for the measurement were given and the test results received on the tracks of Warsaw tramways are presented. The new method has been verified by the tests made according to the method recommended by EN 50122-2.

## 1. Wstęp

W ciągu najbliższych miesięcy można spodziewać się wprowadzenia w Polsce normy PN-EN 50122-2 [1], stanowiącej tłumaczenie normy europejskiej [2], dotyczącej ograniczenia upływu prądów błędnych z torów trakcji elektrycznej prądu stałego. Norma ta wprowadza inne kryteria ograniczenia prądów błędnych w porównaniu z obowiązującą obecnie normą [3], a mianowicie ogranicza konduktancję przejścia między szynami i ziemią i wymaga jej okresowego sprawdzania.

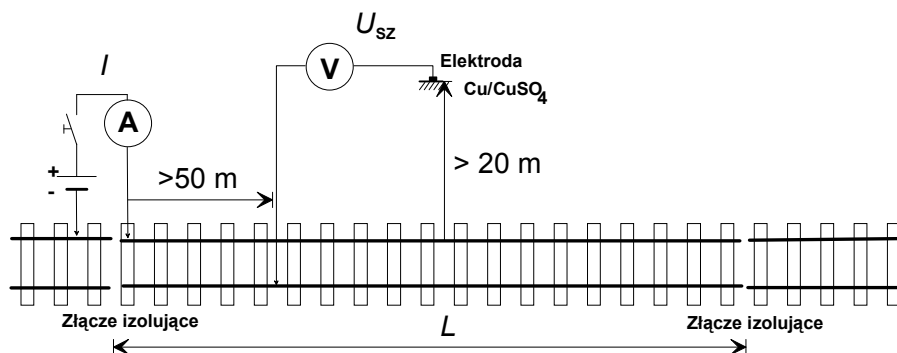
Jednostkowa konduktancja przejścia toru względem ziemi  $G'$  w S/km jest równa odwrotności jednostkowej rezystancji przejścia toru  $r_p$  wyrażonej w  $\Omega$ km. Pomiar  $r_p$  (lub  $G'$ ) jest trudny, a ponieważ bywa wykonywany w zasadzie wyłącznie w czasie nocnej przerwy w ruchu, jest także uciążliwy i kosztowny. Z tych względów badania rezystancji przejścia torów trakcji elektrycznej były dotychczas wykonywane zwykle w ramach prac naukowo-badawczych przez odpowiednio wyszkolony i nadzorowany personel. Wprowadzenie normy [1] wymaga stosunkowo częstego wyznaczania  $r_p$ , co wymusza znalezienie i wdrożenie nowszych i tańszych sposobów pomiaru.

Wobec szerokiego wprowadzenia w ostatnich latach metod rejestracji mikroprocesorowej do badania prądów błędnych, powstała możliwość zastosowania tej techniki także w pomiarach rezystancji przejścia torów względem ziemi. Celem niniejszego referatu jest omówienie prac w tej dziedzinie wykonanych ostatnio w Zakładzie Trakcji Elektrycznej Instytutu Elektrotechniki.

## 2. Stosowane sposoby pomiaru jednostkowej konduktancji przejścia (rezystancji przejścia) torów względem ziemi

Literatura [1,4,5,6] podaje opisy kilku różnych sposobów pomiaru jednostkowej konduktancji przejścia (rezystancji przejścia) torów względem ziemi lub – w przypadku metra – względem tunelu. Niżej przedstawiono metody najczęściej stosowane w pomiarach praktycznych w przypadku torów na powierzchni ziemi.

Metoda rekomendowana przez normę [1] polega na pomiarze jednostkowej konduktancji przejścia toru pojedynczego  $G'$  dla odcinka wydzielonego za pomocą złączy izolujących w układzie wg rys. 1. Źródłem prądu pomiarowego jest bateria akumulatorów włączona między badany wydzielony odcinek toru i resztę sieci szynowej. Pomiar może być wykonywany tylko podczas przerwy w ruchu tramwajów lub kolei. Wartość  $G'$  określa się na podstawie wzoru:



Rys.1. Układ do pomiaru jednostkowej konduktancji przejścia szyn wg normy [1].

$$G' = \frac{1}{L} \times \frac{I}{\Delta U_{SZ}} \quad (1)$$

gdzie:  $G'$  jest jednostkową konduktancją przejścia między torem i ziemią, w S/km,  
 $I$  jest prądem pomiarowym, w A,  
 $L$  jest długością badanego odcinka toru, w km (zaleca się  $L < 2$  km),  
 $\Delta U_{SZ}$  jest różnicą między potencjałem szyn  $U_{SZ}$  względem ziemi przy włączonym i przy wyłączonym prądzie pomiarowym  $I$ , w voltach.

Zaleca się wykonywanie kilku pomiarów, dla obu kierunków przepływu prądu pomiarowego i przyjmowanie jako wynik wartości średniej. Odcinek pomiarowy nie może mieć połączeń metalicznych z drugim torem, a ewentualne przyłączone do niego kable powrotne muszą zostać odłączone na czas pomiaru. Opisany sposób umożliwia dokładny pomiar  $G'$ , ale ma tę podstawową wadę, że konieczne jest instalowanie w szynach złączy izolujących, które muszą być zwarte w czasie ruchu pociągów i rozwierane tylko na czas badań. W torach tramwajowych normalnie nie jest potrzebne stosowanie złączy izolujących, a ich wstawianie na szerszą skalę jedynie w celu okresowych badań rezystancji przejścia torów musi budzić uzasadnione wątpliwości. Drugą wadą jest konieczność wykonywania pomiaru w czasie przerwy w ruchu, co jest uciążliwe i kosztowne.

Metoda klasyczna jest najbardziej uniwersalna, stosowana od dawna, może służyć do pomiarów  $G'$  w liniach jedno- i dwutorowych, a jej szczegółowy opis podano w [4]. Pomiar wykonuje się w czasie nocnej przerwy w ruchu, a źródłem prądu pomiarowego jest zwykle albo zahamowany wagon tramwajowy, albo zestaw rezystorów dużej mocy, włączony między sieć jezdnią i szyny. Jednostkową konduktancję przejścia szyny-ziemia oblicza się wg wzoru:

$$G' = \frac{2 \times (\Delta I_1 - \Delta I_2)}{L \times (\Delta U_1 + \Delta U_2)} \quad (2)$$

gdzie:  $G'$  jest jednostkową konduktancją przejścia między torem i ziemią, w S/km,  
 $L$  jest długością badanego odcinka toru, między punktami 1 (początek odcinka pomiarowego) i 2 (koniec odcinka pomiarowego), w km,  
 $\Delta U_1, \Delta U_2$  jest różnicą między potencjałem szyn  $U_{SZ}$  względem ziemi w punkcie 1 przy włączonym i przy wyłączonym prądzie pomiarowym  $I$ , w voltach; to samo odpowiednio dla punktu 2  
 $\Delta I_1, \Delta I_2$  jest różnicą między prądem  $I_1$  w szynach, zmierzonym w punkcie 1 przy włączonym i przy wyłączonym prądzie pomiarowym  $I$ , w amperach; to samo odpowiednio dla punktu 2.

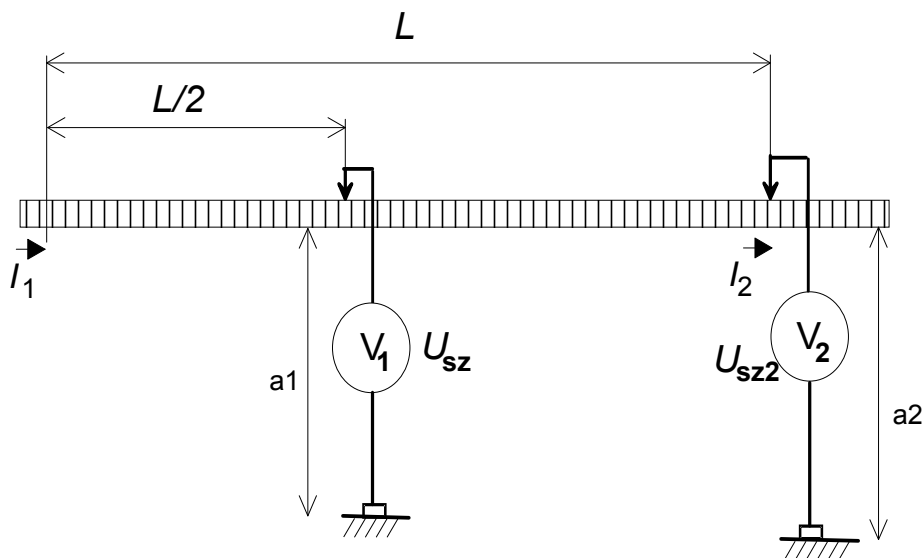
Przy stosowaniu opisywanej metody pomiaru powinny być spełnione następujące warunki:

- aby wymusić na badanym odcinku toru wpływ znacznego prądu błądzącego, co umożliwia dokładniejsze wyznaczenie  $G'$ , należy starać się, aby długość  $L$  tego odcinka była możliwie duża, 1...2 km lub więcej, zwłaszcza w przypadku torów nowych i w dobrym stanie, kiedy różnica przyrostów prądów w liczniku wzoru (2) jest niewielka,

- zaleca się, aby cały odcinek pomiarowy mieścił się w tej samej strefie potencjalnej szyn, tj. albo w strefie upływu, albo w strefie powrotu prądów błądzących, które stanowią część prądu pomiarowego. Oznacza to, że po włączeniu prądu pomiarowego potencjały szyny-ziemia na obu końcach odcinka  $L$  powinny przesunąć się w tym samym kierunku, co zwykle ma miejsce, jeżeli odległość między początkiem (punkt 1) odcinka pomiarowego a punktem powrotnym kabla odprowadzającego prąd pomiarowy jest nieco większa od  $2L$ ,
- żadna część odcinka toru między punktem 1 i punktem powrotnym nie może być bocznikowana przez przewody powrotne i szynę ujemną podstacji trakcyjnej; jeżeli w celu wydłużenia  $L$  chce się wymusić odbiór prądu pomiarowego w punkcie powrotnym położonym daleko od miejsca wprowadzania prądu pomiarowego, to inne kable powrotne podstacji zasilającej pomiar powinny być na czas badań odłączone od szyn zbiorczych. Dotyczy to również kabli powrotnych innych podstacji, jeżeli kable te są przyłączone do szyn jezdnych w miejscach, przez które płynie prąd pomiarowy,
- do odcinków szyn służących do pomiaru prądu metodą spadku napięcia nie mogą być przyłączone żadne poprzeczne łączniki szynowe.

Metoda czeska wg [6] jest rekomendowana przez autorów jako alternatywna w stosunku do metody zalecanej przez normę [1]. Jej podstawową zaletą jest możliwość wyznaczenia  $G'$  podczas normalnego ruchu pojazdów, na podstawie pomiaru prądów w szynach na początku i na końcu odcinka pomiarowego i na podstawie jednocześnie mierzonego potencjału szyn względem ziemi. Autorzy omawiają dwa warianty takiej metody.

Wg wariantu 1<sup>o</sup> wartość  $G'$  oblicza się na podstawie wzoru (3), i na podstawie rys. 2.



Rys.2. Układ do pomiaru jednostkowej konduktancji przejścia szyn metodą czeską.

$$G' = \frac{I_1 - I_2}{\Delta U_{SZ} \times L} \quad (3)$$

gdzie  $I_1$ ,  $I_2$  jest prądem w szynach, w amperach, odpowiednio na początku i na końcu odcinka pomiarowego; pozostałe oznaczenia są jak we wzorze (1).

Autorzy wyznaczają prąd w szynach z pomiarów spadków napięć na odcinkach o długości 2 m. Zalecają także umieszczanie elektrody odniesienia do pomiaru  $U_{SZ}$  w takiej odległości  $a1$  lub  $a2$  (rys.2) od szyn, aby różnica między potencjałami  $U_{SZ}$  mierzonymi względem punktów odległych o 4 m była mniejsza od 0.1 V, co w praktyce oznacza  $a = 30...50$  m.

Obliczenie  $G'$  wg wariantu 2<sup>0</sup> wykonuje się na podstawie rys.2 i równania (4):

$$I_1 = \Delta U_{SZ2} \times \sqrt{\frac{G'}{R'}} \times \sinh(\sqrt{R' \times G'} \times L) + I_2 \times \cosh(\sqrt{R' \times G'} \times L) \quad (4)$$

gdzie  $\Delta U_{SZ2}$  jest różnicą między potencjałem szyn względem ziemi mierzonym na końcu odcinka przy włączonym i przy wyłączonym prądzie pomiarowym  $I$ , w V,  
 $R'$  jest jednostkową rezystancją wzdłużną toru, w  $\Omega/\text{km}$ ,  
 pozostałe wielkości – jak we wzorach (1) i (3).

Omówione wyżej dwa warianty nowej metody wyznaczania  $G'$  zostały przez autorów pracy [6] sprawdzone na odcinku toru odstawczego o długości  $L = 0.671$  km i porównane z wynikami otrzymanymi przy zastosowaniu metody rekomendowanej przez normę [1]. Otrzymano następujące wyniki:  $8.411 \pm 1.359$  S/km wg metody zgodnej z normą,  $7.944 \pm 0.435$  S/km wg wariantu 1<sup>0</sup>, oraz  $9.781 \pm 0.755$  S/km wg wariantu 2<sup>0</sup>. W wyniku szczegółowej analizy pracy [6] można sformułować następujące uwagi dotyczące omawianej metody:

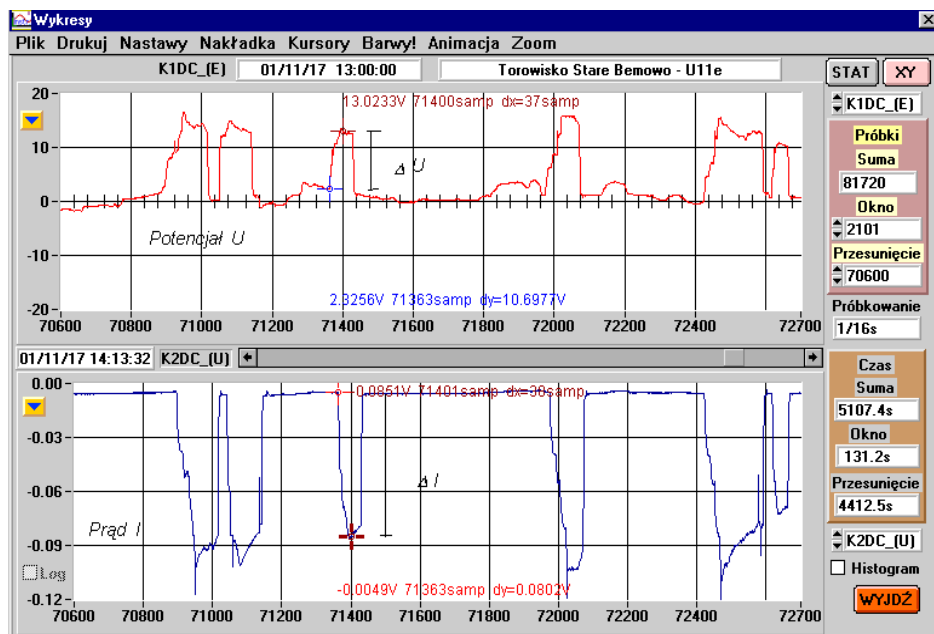
- Nie wyjaśniono, dlaczego metoda zalecana przez normę [1] okazała się mniej dokładna od nowych sposobów pomiaru, podczas gdy z analizy wzorów (1), (3) i (4) wynika, że jest to metoda najdokładniejsza.
- Sposób wg wariantu 1<sup>0</sup> wymaga dość dużych prądów pomiarowych (160...280 A), dzięki czemu pomiary prądów w szynach metodą spadku napięcia mogą być dokładniejsze niż przy wariantie 2<sup>0</sup> (prądy 29...40 A). To samo dotyczy również wartości przyrostów potencjałów szyny-ziemia. Na tej podstawie można uważać wariant 1<sup>0</sup> za lepszy.
- Brak jest informacji na temat stosowania nowej metody dla torów o małych wartościach  $G'$ , np.  $G' = 0.5$  S/km, zgodnych z wymaganiem normy [1], kiedy prądy upływu z szyn są wielokrotnie mniejsze niż w przypadku badań na torze odstawczym, opisanych w [6].
- Zamiast prądów  $I$  w szynach powinny być wyznaczone ich przyrosty  $\Delta I$ , analogicznie jak przy pomiarach  $\Delta U_{SZ}$ ; są to przyrosty spowodowane np. rozruchem pociągu przed jego wjazdem na badany odcinek  $L$ , w stosunku do mniejszych prądów, jakie płyną przez szyny wskutek ruchu innych pojazdów.

- Podane sposoby określania  $\Delta U_{SZ}$  i  $\Delta U_{SZ2}$  są niejasne.
- Odcinek szyny o długości 2 m do pomiaru prądu ma zwykle bardzo małą rezystancję wzdłużną, a to stawia wysokie i często trudne do spełnienia wymagania dla przyrządu do wyznaczania spadku napięcia.

Autorzy nie podają warunków, jakie powinien spełniać odcinek pomiarowy, co jest istotnym brakiem i może prowadzić do ograniczeń w stosowaniu prezentowanych sposobów pomiaru  $G'$ . Wydaje się, że niezbędne jest co najmniej spełnienie warunków wymaganych przy metodzie klasycznej.

### 3. Sposób badań konduktancji przejścia torów względem ziemi podczas ruchu pojazdów proponowany przez Zakład Trakcji Elektrycznej IEL

Proponowany sposób pomiaru polega na zastosowaniu rejestratorów mikroprocesorowych do jednoczesnego zapisu wielkości określających jednostkową konduktancję przejścia toru względem ziemi  $G'$  wg wzoru (2), tj. wg metody klasycznej. Dzięki rejestracji prądów w szynach i potencjałów szyny-ziemia z częstością próbkowania nie mniejszą niż co 0.5 s można obliczyć  $G'$  na podstawie badań wykonywanych w czasie normalnego ruchu pojazdów tramwajowych lub pociągów PKP. Ilustruje to rys. 3, przedstawiający zarejestrowane przebiegi czasowe spadku napięcia w pojedynczej szynie (prądu  $I$ ) i potencjału szyny względem ziemi  $U$ . Na rysunku tym zaznaczono wielkości  $\Delta U$  i  $\Delta I$ , wchodzące do wzoru (2). Przyrosty  $\Delta U$  i  $\Delta I$  powstają wskutek przepływu prądów rozruchowych tramwaju, zbliżającego się do odcinka pomiarowego.

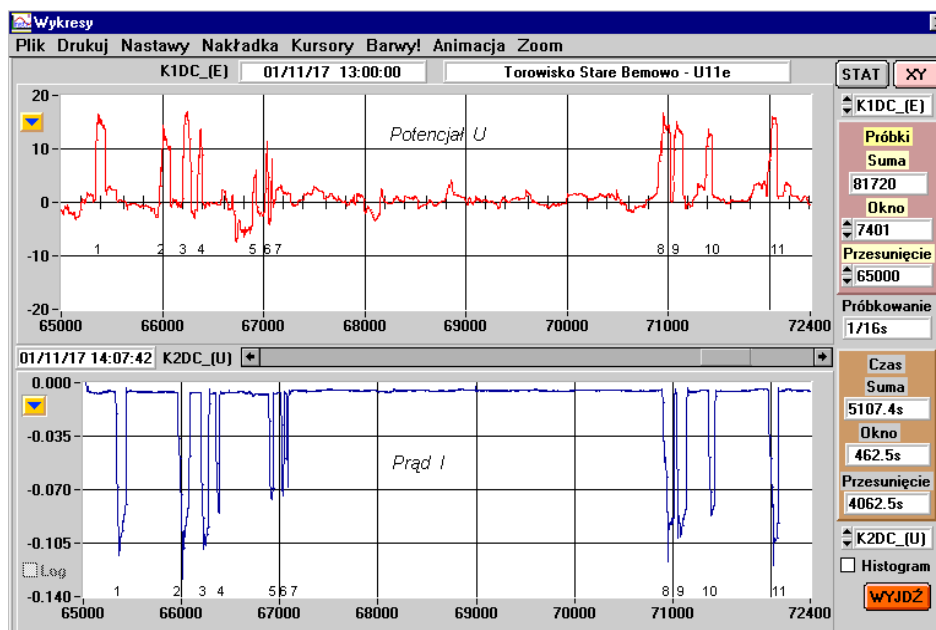


Rys.3. Przebiegi potencjału  $U$  szyny-ziemia i prądu  $I$  w szynie zarejestrowane podczas ruchu tramwajów, oraz zaznaczone przyrosty  $\Delta U$  i  $\Delta I$  służące do obliczenia  $G'$  wg wzoru (2).

Aby otrzymać poprawne wyniki, należy spełnić wszystkie warunki wymagane przy metodzie klasycznej. Należy również starać się o takie usytuowanie odcinka pomiarowego  $L$ , aby jego początek znajdował się kilkadziesiąt metrów od przystanku, a cały, lub znaczna część prądu tramwaju ruszającego z tego przystanku przepływała do punktu powrotnego przez szyny całego odcinka  $L$ . Do pomiarów można stosować np. 16-kanalowe rejestratory mikroprocesorowe typu **R16A** wykonane przez firmę L'Instruments lub 2-kanalowe rejestratoriki **mR0** tej samej firmy. W przypadku badania toru pojedynczego konieczna jest rejestracja 6 wielkości (cztery prądy i dwa potencjały), a w przypadku linii 2-torowej – 10 wielkości.

Opisany sposób pomiaru jest bardzo podobny do wariantu 1<sup>0</sup> wg metody czeskiej, ale warunki pomiaru zostały tu dokładnie sprecyzowane, a zamiast prądów w szynach oblicza się i wprowadza do wzoru na  $G'$  ich przyrosty, co powinno zmniejszyć błąd pomiaru. Dokładność wyznaczania  $G'$  zależy od dwóch podstawowych czynników: dokładności pomiaru prądu w szynach, która jest niewielka przy stosowaniu metody spadku napięcia, i od wartości  $G'$ . Chodzi o to, że w przypadku małych  $G'$ , wpływ prądów błądzących z odcinka pomiarowego do ziemi może być bardzo mały, a wówczas różnica  $\Delta I_1 - \Delta I_2$  będzie bardzo mała i obciążona znacznym błędem. Może wówczas być konieczne ograniczenie stosowania tego sposobu wyznaczania  $G'$  do długich odcinków pomiarowych.

Nową metodę sprawdzono na 2 odcinkach sieci tramwajów warszawskich, a mianowicie na linii jednotorowej na ul. Kaliskiego i na torze południowym w Al. Waszyngtona.



Rys.4. Fragmenty rejestracji prądu (spadku napięcia) w szynie i potencjału szyna-ziemia podczas pomiarów  $G'$  toru na ul. Kaliskiego.

Na ul. Kaliskiego wybrano odcinek o długości  $L = 0.586$  km w pobliżu WAT i zastosowano 4 rejestratoriki **mR0**, po dwa na obu końcach odcinka pomiarowego. Na

podstawie wykonanych pomiarów przyjęto jednostkową rezystancję szyny równą 0.0236 mΩ/m. Rejestrowano spadki napięć na 10-metrowych odcinkach szyn oraz potencjały szyny-ziemia na obu końcach odcinka pomiarowego. Wyniki rejestracji potencjału  $U$  i prądu  $I$  w szynie na początku odcinka pomiarowego przedstawione na rys.4 pokazują 11 kolejno numerowanych impulsów potencjału i prądu, które powstały w czasie poboru prądu rozruchowego przez tramwaj, zbliżający się do odcinka pomiarowego. Z rys. 4 widać, że postulowane obliczanie przyrostów prądów w szynach  $\Delta I$  i przyrostów potencjałów  $\Delta U$  do zastosowania we wzorze (2) jest w pełni uzasadnione, ponieważ wielkości rejestrowane pomiędzy kolejnymi impulsami są różne od zera. Obliczenie  $G'$  wykonano dla trzech pierwszych i czterech ostatnich impulsów widocznych na rys. 4. Pominęto pozostałe impulsy ze względu na wyraźnie mniejsze przyrosty rejestrowanych wielkości, a stąd większy błąd obliczeń. Otrzymane rezultaty pomiarów zamieszczono w tabeli 1, podając w kolejnych kolumnach:

- kolejne numery impulsów wg rys.4,
- sumy przyrostów prądu w obu szynach na początku odcinka pomiarowego  $\Delta I_1$ ,
- przyrosty potencjałów szyny-ziemia na początku odcinka pomiarowego  $\Delta U_1$ ,
- sumy przyrostów prądu w obu szynach na końcu odcinka pomiarowego  $\Delta I_2$ ,
- przyrosty potencjałów szyny-ziemia na końcu odcinka pomiarowego  $\Delta U_2$ ,
- różnice prądów w szynach na początku i na końcu odcinka  $\Delta I_1 - \Delta I_2$ ,
- średni potencjał szyny-ziemia badanego odcinka  $0.5(\Delta U_1 + \Delta U_2)$ ,
- wartość jednostkowej konduktancji przejścia szyny-ziemia  $G'$  wg wzoru (2),
- wartość jednostkowej rezystancji przejścia szyny-ziemia  $r_p$ .

Widoczny z tabeli 1 spory rozrzut otrzymanych wyników świadczy o dość dużym błędzie pomiaru. Pomiar  $G'$  należy jednak do tej kategorii badań, w których duża dokładność nie jest potrzebna, gdyż wartość jednostkowej konduktancji szyny-ziemia ulega nieustannym fluktuacjom wskutek oddziaływań stale zmieniających się warunków atmosferycznych, zanieczyszczeń torowiska i zmian jego parametrów w miarę zużywania. Natomiast wymagania normy [1] dotyczące granicznych wartości  $G'$  w eksploatacji wynikają z warunków uśrednionych w skali roku.

Tabela 1. Wyniki pomiarów  $G'$  odcinka toru linii jednotorowej na ul. Kaliskiego w dniu 17.11.01 w czasie normalnego ruchu pojazdów, w godz. 13:00 – 14:30.

Nr impulsu	Początek odcinka		Koniec odcinka		$\Delta I_1 - \Delta I_2$ [A]	$0.5(\Delta U_1 + \Delta U_2)$ [V]	$G'$ [S/km]	$r_p$ [Ωkm]
	$\Delta I_1$ [A]	$\Delta U_1$ [V]	$\Delta I_2$ [A]	$\Delta U_2$ [V]				
1	892	15.30	852	9.37	40	12.34	<b>5.52</b>	<b>0.181</b>
2	913	15.34	881	8.91	32	12.12	<b>4.50</b>	<b>0.222</b>
3	839	17.99	807	12.91	32	15.45	<b>3.53</b>	<b>0.283</b>
8	669.5	12.67	644	8.60	25.5	10.64	<b>4.09</b>	<b>0.244</b>
9	803	13.93	767	9.56	36	11.75	<b>5.24</b>	<b>0.191</b>
10	678	11.66	657	7.30	21	9.48	<b>3.77</b>	<b>0.265</b>
11	835	14.68	795	9.44	40	12.06	<b>5.65</b>	<b>0.177</b>
<b>Wartości średnie</b>							<b>4.61</b>	<b>0.223</b>



Tabela 2. Wyniki pomiarów  $G'$  odcinka toru pojedynczego o długości  $L = 0.328$  km w Al. Waszyngtona w dniu 13.05.2002 czasie normalnego ruchu pojazdów, w godz. 11:50 – 12:50

Lp.	Początek odcinka		Koniec odcinka		$\Delta I_1 - \Delta I_2$ [A]	$0.5(\Delta U_1 + \Delta U_2)$ [V]	$G'$ [S/km]	$r_p$ [ $\Omega$ km]
	$\Delta I_1$ [A]	$\Delta U_1$ [V]	$\Delta I_2$ [A]	$\Delta U_2$ [V]				
1	218.6	1.591	190.7	0.574	27.9	1.083	<b>78.5</b>	<b>0.0127</b>
2	288.3	1.944	246.5	1.016	41.8	1.480	<b>86.1</b>	<b>0.0116</b>
3	207.0	1.812	172.1	0.751	34.9	1.282	<b>83.0</b>	<b>0.0120</b>
4	286.0	2.519	237.2	0.972	48.8	1.746	<b>85.2</b>	<b>0.0117</b>
5	339.5	2.961	290.7	1.237	48.8	2.099	<b>70.9</b>	<b>0.0141</b>
6	460.5	2.474	432.6	0.088	27.9	1.281	<b>66.4</b>	<b>0.0151</b>
<b>Wartości średnie</b>							<b>78.4</b>	<b>0.0129</b>

Wyniki otrzymane z pomiarów w dniu 13.05.2002 na drugim badanym odcinku, tj. w Al. Waszyngtona, podano w tabeli 2, analogicznej do tab.1. Na tym odcinku pomiarowym, o długości 0.328 km, wydzielonym za pomocą złączy izolujących, można mierzyć  $G'$  także metodą wg normy [1], w czasie nocnej przerwy w ruchu.

Podobnie jak w przypadku tab.1 widoczny jest tu także dość duży rozrzut wyników. Tory w Al. Waszyngtona stanowią bok „oczka” sieci szynowej, wskutek czego prąd wpływający z kół tramwaju do szyn rozplywa się zawsze w obu kierunkach. Dlatego zmierzone prądy w szynach i zmierzone potencjały szyn względem ziemi podane w tab.2 są wyraźnie mniejsze niż w tabeli 1. Wymaga to szczególnie starannego i wnikliwego doboru impulsów prądu i wywołanych przez nie impulsów potencjału, służących do obliczania  $G'$ , gdyż błędy w tej dziedzinie wpływają na pogorszenie dokładności pomiaru.

Wartości  $G'$  podane w tabeli 2 są znacznie większe niż w przypadku toru na ul. Kaliskiego, mimo że odcinek toru w Al. Waszyngtona przeszedł gruntowny remont na jesieni 2001r. Jednak podczas badań nocnych tego odcinka, (wydzielonego za pomocą złączy izolujących), wykonanych metodą wg normy [1] w dniu 14.02.2002 otrzymano również dużą wartość  $G' = 29.3$  S/km, a w dniu 06.06.2002 nawet  $G' = 143$  S/km. Okazało się, że przyczyną tak wielkich wartości  $G'$  są bardzo małe rezystancje uzziemienia ośmiu słupów trakcyjnych uszynionych do badanego wydzielonego odcinka toru. W tabeli 3 podano wartości  $G'$  tego odcinka toru, otrzymane po przyłączeniu do niego różnych słupów, o kolejnych numerach od 1 do 8, przy czym słup nr 1 stoi na początku odcinka pomiarowego, najbliżej ul. Międzynarodowej, tuż obok cieku wodnego do jez. Kamionkowskiego.

Wyniki podane w tabeli 3 pokazują, jak wielki w niektórych przypadkach może być wpływ uszynienia słupów trakcyjnych na jednostkową konduktancję przejścia szyn względem ziemi. Na badanym odcinku toru wpływ słupa nr 1 okazał się dominujący.

W tym samym dniu 06.06.2002 wykonano na odcinku wydzielonym toru w Al. Waszyngtona także pomiary  $G'$  nową metodą, tj. w czasie ruchu pojazdów. Ze względów technicznych pomiary dotyczyły tylko początkowego fragmentu odcinka, od stro-

ny ul. Międzynarodowej, o długości  $L = 0.185$  km. Fragment ten obejmował pierwsze cztery uszynione słupy trakcyjne. Wyniki pomiarów zestawiono w tabeli 4. Otrzymana wartość średnia  $G' = 202$  S/km znacznie przekracza 143 S/km otrzymane w czasie pomiaru nocnego dla całego wydzielonego odcinka toru w tych samych warunkach atmosferycznych. Wynika to stąd, że do badanego fragmentu całego odcinka wydzielonego były uszynione cztery pierwsze słupy trakcyjne o szczególnie małych rezystancjach uziemienia.

Tabela 3. Zależność konduktancji  $G'$  wydzielonego odcinka toru w Al. Waszyngtona od uszynień słupów trakcyjnych wg badań nocnych z dnia 06.06.2002, w godz. 1:00 – 3:00.

Lp.	Numery uszynionych słupów	$G'$ [S/km]
1	wszystkie słupy odłączone od szyn	1.39
2	1,	72.8
3	2, 3,	36.8
4	2, 3, 4,	52.9
5	2, 3, 4, 5,	61.4
6	2, 3, 4, 5, 6,	64.1
8	2, 3, 4, 5, 6, 7,	73.9
9	2, 3, 4, 5, 6, 7, 8,	74.9
10	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8,	143.0

Tabela 4. Wyniki pomiarów  $G'$  odcinka toru pojedynczego o długości  $L = 0.185$  km w Al. Waszyngtona, w dniu 06.06.2002 czasie normalnego ruchu pojazdów, w godz. 5:00 – 6:00.

Lp.	Początek odcinka		Koniec odcinka		$\Delta I_1 - \Delta I_2$ [A]	$0.5(\Delta U_1 + \Delta U_2)$ [V]	$G'$ S/km]	$r_p$ [ $\Omega$ km]
	$\Delta I_1$ [A]	$\Delta U_1$ [V]	$\Delta I_2$ [A]	$\Delta U_2$ [V]				
1	142.4	1.151	93.9	1.343	48.5	1.247	<b>210</b>	<b>0.0048</b>
2	70.5	0.860	36.8	0.907	33.7	0.884	<b>206</b>	<b>0.0049</b>
3	97.9	0.861	62.6	1.003	35.3	0.932	<b>205</b>	<b>0.0049</b>
4	111.6	0.270	95.5	0.558	16.1	0.414	<b>210</b>	<b>0.0048</b>
5	88.7	1.157	120.3	0.559	-31.6	0.878	<b>195</b>	<b>0.0051</b>
6	77.9	0.674	56.1	0.605	21.8	0.640	<b>184</b>	<b>0.0054</b>
<b>Wartości średnie</b>							<b>202</b>	<b>0.0050</b>

Można to udowodnić na podstawie wyników pomiarów podanych w tabeli 3, otrzymując z kolejnych obliczeń:

- ♦ rezystancję przejścia szyny-ziemia całego odcinka wydzielonego o długości 0.328 km z odłączonymi uszynieniami wszystkich ośmiu słupów równą 2.19337  $\Omega$ ,

- ◆ rezystancję uziemienia słupa nr 1 równą  $0.042694 \Omega$ ,
- ◆ rezystancję uziemienia słupów nr 2, 3, 4 równą  $0.059188 \Omega$ ,
- ◆ łączną rezystancję uziemienia słupów 1, 2, 3, 4, równą  $0.0248 \Omega$ ,
- ◆ rezystancję przejścia szyny-ziemia odcinka o długości  $0.185 \text{ km}$  z odłączonymi uszynieniami słupów 1, 2, 3, 4, równą  $3.8888 \Omega$ ,
- ◆ rezystancję przejścia szyny-ziemia odcinka o długości  $0.185 \text{ km}$  z przyłączonymi uszynieniami słupów 1, 2, 3, 4, równą  $0.024646 \Omega$ ,
- ◆ jednostkową konduktancję przejścia  $G'$  odcinka o długości  $0.185 \text{ km}$  z przyłączonymi uszynieniami słupów 1, 2, 3, 4, równą  $219 \text{ S/km}$ .

Z powyższego wyliczenia widać bardzo dobrą zgodność między wynikami  $G'$  otrzymanymi nową metodą (wartość średnia  $G' = 202 \text{ S/km}$  wg tab. 4) i metodą wg normy [1], zastosowaną w czasie pomiarów nocnych (wyniki z tab. 3). Weryfikuje to opracowany w Zakładzie Trakcji Elektrycznej IEL i opisany tutaj nowy sposób pomiaru jednostkowej konduktancji przejścia szyny-ziemia w czasie ruchu pojazdów.

#### 4. Podsumowanie

Opisane dwa przypadki zastosowania w praktyce nowego sposobu pomiaru jednostkowej konduktancji szyn względem ziemi wykazały, że możliwe jest wyznaczanie tej wielkości także podczas normalnego ruchu pojazdów, jeżeli zastosuje się odpowiednie rejestratory i odpowiednio usytuuje odcinek pomiarowy. Dokładność pomiaru nie jest duża, można ją oceniać na kilkanaście procent, ale wystarcza to dla oceny stanu torów na zgodność z wymaganiami normy (1). Dokładność obliczania  $G'$  zależy w zasadniczym stopniu od właściwego doboru oraz identyfikacji impulsów  $U$  oraz  $I$  na zarejestrowanych przebiegach. Wpływ na to ma w znacznym stopniu doświadczenie i wprawa osoby opracowującej wyniki rejestracji. W przypadku wątpliwości wskazane jest pomijanie niewielkich, często trudno czytelnych impulsów prądu i potencjału oraz wykorzystywanie tylko takich, których interpretacja nie nasuwa zastrzeżeń. W miarę zbierania doświadczeń, technika wykonywania pomiaru i opracowania rezultatów będzie niewątpliwie doskonała, co powinno poprawić dokładność wyznaczania  $G'$ . Innym ważnym czynnikiem wpływającym na wyniki jest sposób pomiaru prądu w szynach; stosowana najczęściej metoda spadku napięcia jest obciążona znacznym błędem, zwłaszcza w przypadku torów o znacznym zużyciu szyn. Poszukiwanie prostego lecz jednocześnie dokładniejszego sposobu pomiaru prądu w szynie jest ciągle aktualne.

Wiadomo, że pomiar  $G'$  jest prostszy, a jego wyniki łatwiejsze do opracowania wówczas, gdy przez szyny odcinka pomiarowego praktycznie stale przepływa prąd w jednym kierunku. Ma to miejsce np. na torach odstawczych i na odcinkach linii wybiegowych (por. opis przypadku wykorzystania metody czeskiej i pomiar na ul. Kaliskiego w Warszawie). Prąd pomiarowy jest wtedy równy praktycznie całemu prądowi oddawanemu do szyn przez jadący pojazd, co ułatwia identyfikację rejestrowanych dużych impulsów prądu i potencjału, i stąd może zapewnić lepszą dokładność pomiaru.

Trudniej jest mierzyć jednostkową konduktancję przejścia  $G'$  na takich odcinkach torów sieci tramwajowych, gdzie prąd zmienia kierunek, zależnie od usytuowania pojazdów (np. w Al. Waszyngtona). Ma to miejsce w dużych, rozgałęzionych sieciach tramwajowych tworzących zamknięte obwody („oczka”). Mogą powstać wówczas

problemy z identyfikacją wzajemnie odpowiadających sobie zarejestrowanych impulsów  $I$  oraz  $U$  na obu końcach odcinka pomiarowego. Aby zwiększyć te impulsy i ułatwić ich identyfikację, może okazać się celowe odłączenie od szyn kabla powrotnego, znajdującego się w pobliżu początku lub końca odcinka. Takie odłączenie potrzebne jest zwykle na krótki okres kilku minut, niezbędnych dla wykonania rejestracji.

Pomiar  $G'$  jest także trudniejszy w przypadku tramwajowych torowisk zamkniętych, w których brak dostępu do stopki szyny uniemożliwia przyłączenie do niej przewodu pomiarowego. Trzeba wówczas stosować połączenie z główką szyny, najlepiej za pomocą styków magnetycznych, które muszą być jednak sprawnie usuwane przed nadjeżdżającym pojazdem. W ogóle dobry styk przewodu pomiarowego z szyną ma zasadnicze znaczenie przy wyznaczaniu  $G'$ . Styk niepewny, zdarzający się często w przypadku torów dłużej użytkowanych, całkowicie zniekształca wynik, ponieważ spadek napięcia na warstewce rdzy może niekiedy wynosić nawet kilkaset mV.

### Literatura

1. PN-EN 50122-2. Zastosowania kolejowe. Urządzenia stacjonarne. Część 2: Środki ochrony przed oddziaływaniem prądów błądzących wywołanych przez trakcję elektryczną prądu stałego.
2. EN 50122-2. Railway applications. Fixed installations. Part 2: Protective provisions against the effects of stray currents caused by d. c. traction systems. CENELEC. May 1998.
3. PN-92/E-05024. Ochrona przed korozją. Ograniczenie upływu prądów z trakcyjnych sieci powrotnych prądu stałego.
4. Dziuba W.: Sieć powrotna i prądy błądzące. Wydawnictwo Książkowe Instytutu Elektrotechniki, Warszawa, 1995.
5. Котельников А. В.: Блуждающие токи электрифицированного транспорта. Москва, „ТРАНСПОРТ”, 1986.
6. Paleček J. i in.: Meßverfahren für den Ableitungsbelag oberirdischer Gleichstrombahnen. Elektrische Bahnen, nr 7, 1999.