

Ireneusz Chrabąszcz, Adam Kaniewski, Janusz Prusak

Rozptyw prądów trakcyjnych w tramwajowej sieci powrotnej – ocena w aspekcie zagrożeń prądami błędzącymi

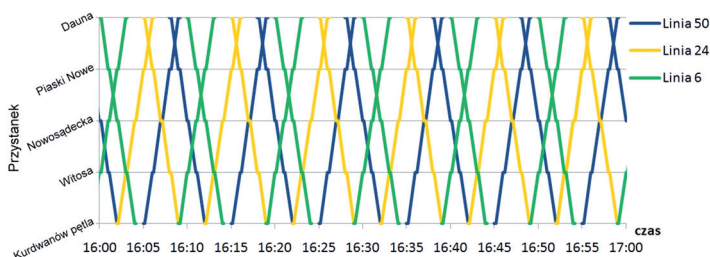
Ochrona podziemnych konstrukcji metalowych (PKM), np. rurociągów, mostów itp., od wpływu prądów błędzących [1, 2, 4, 8] jest zagadnieniem ważnym i ciągle aktualnym. W literaturze rozptyw prądu trakcyjnego w sieci powrotnej dotyczy ograniczonego przypadku, uwzględniającego tylko jeden pojazd na odcinku zasilania. Założono, że pojazd ten pobiera stałą wartość prądu i porusza się ze stałą prędkością. Takie ujęcie jest przydatne, ze względów poznawczych i dydaktycznych.

Interesującą kwestią jest uwzględnienie większej liczby czynników w celu dokładnego określenia rozptywu prądów trakcyjnych w sieci powrotnej oraz oceny zagrożenia wynikającego z występowania prądów błędzących. Dostępne środki pozwalają na takie „rozszerzone” ujęcie tematu. Konieczne jest posiadanie konkretnych danych dotyczących, w tym przypadku wybranego do analizy odcinka linii tramwajowej.

W artykule przedstawiono wyniki symulacji rozptywu prądów trakcyjnych w sieci powrotnej z uwzględnieniem konduktancji przejścia szyny – ziemia. Pod uwagę wzięto rzeczywisty odcinek linii tramwajowej, uwzględniono między innymi: profil poziomy i pionowy linii, odległości międzyprzystankowe, rozkład jazdy tramwajów, charakterystyki trakcyjne pojazdów używanych na rozpatrywanym odcinku.

Ogólny opis analizowanego odcinka linii tramwajowej

Analizie poddano dwukierunkowy, dwutorowy, wydzielony z ruchu ulicznego odcinek linii tramwajowej długości 1910 m wraz z pętlą długości około 300 m. Od torowiska odchodzą trzy punkty powrotne, ich dokładną lokalizację przedstawiono w tabeli 1. Torowisko jest dwutorowe o typowych szynach kolejowych S49. Pojazdami, które poruszają się po rozpatrywanej linii są nowoczesne tramwaje typu Bombardier NGT6. W trakcie dokonywania



Rys. 1. Graficzny rozkład jazdy dla linii 6, 24, 50 w obszarze zasilania podstacji w godzinie szczytu

analizy odcinka, w obszarze zasilania podstacji kursowały pojazdy trzech linii tramwajowych.

Na podstawie rozkładu jazdy stwierdzono, że godzina szczytu przypada na dzień roboczy od godziny 16.00–17.00. Na rysunku 1 przedstawiono rozkłady jazdy dla poszczególnych linii, sporządzone na podstawie rozkładu udostępnionego przez MPK S.A. [11]. Jak zauważono, w rozpatrywanej godzinie (szczytu) pojazdy poruszają się cyklicznie, jeden cykl trwa 10 min. Analizy tego odcinka czasowego w godzinie szczytu dokonano w dalszej części artykułu. W obrębie danej godziny po odcinku porusza się 38 pojazdów.

Schemat elektryczny badanego odcinka linii tramwajowej

W celu oceny rozptywu prądów trakcyjnych w sieci powrotnej niezbędne jest przedstawienie wybranego wcześniej do analizy odcinka linii tramwajowej w postaci zastępczego schematu elektrycznego (rys. 2).

Rezystancję odcinka szyn R_{sz} przyjęto z uwzględnieniem faktu, że do budowy torowiska wykorzystano szyny S49. Rezystancja przejścia szyny–ziemia R_p podawana jest w $[\Omega km]$. Według [4] rezystancja w normalnych warunkach eksploatacyjnych może wahać się w przedziale od 0,3 do 5 Ωkm .

Symulacje przedstawione w artykule wykonano dla rezystancji przejścia 2,5 Ωkm (konduktancja $G = 0,4 S/km$). Rezystancja uziemienia R_{uz} tramwajowej podstacji trakcyjnej, zasilającej analizowany odcinek, według udostępnionych danych pomiarowych wynosi 0,91 Ω [6]. Rezystancję zwiernika R_r w stanie rozwarcia do potrzeb symulacji przyjęto na poziomie 0,5 M Ω . Wartości rezystancji kabli powrotnych R_{pp1} , R_{pp2} , R_{pp3} (dla rezystancji jednostkowej kabla 0,0469 Ω/km [9]) oraz ich położenie podano w tabelach 1 i 2.

Tabela 1

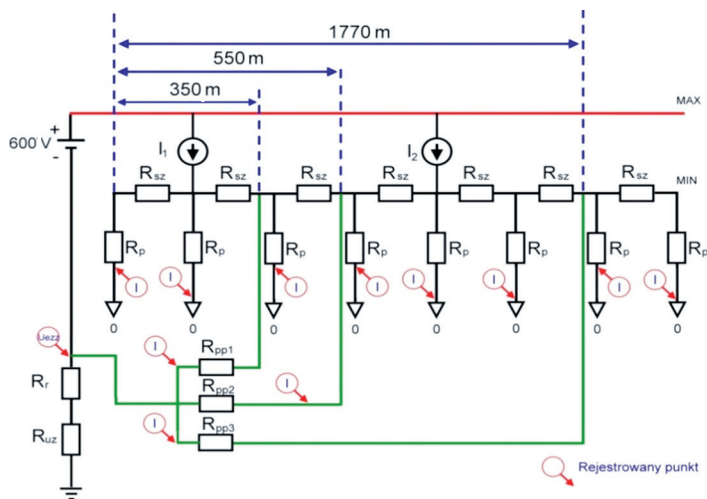
Lokalizacja punktów powrotnych i zasilających

	Punkt powrotny		
	pp1	pp2	pp3
Odległość zmierzona z pominięciem pętli [m]	350	550	1770

Tabela 2

Rezystancja kabli powrotnych

Nr punktu powrotnego	Lokalizacja położenia kabla (rys. 2)	Rezystancja kabla powrotnego [Ω]
pp1	350	0,0159460
pp2	550	0,0187600
pp3	1770	0,0128975

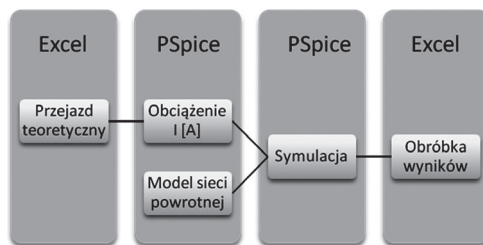


Rys. 2. Uproszczony schemat obwodu powrotnego odcinka zasilania I_1, I_2 – prądy obciążeń trakcyjnych, R_{sz} – rezystancja odcinka szyn, R_p – rezystancja przejścia [Ωkm] (konduktancja G [S/km]) szyna–ziemia, R_{pp} – rezystancja kabli powrotnych, R_r – rezystancja zwiernika w stanie rozwarcia (wartość przyjęta), R_{uz} – rezystancja uziomu podstacji

Przyjęty model uwzględnia przemieszczanie się pojazdów po rozpatrywanym odcinku (rys. 1). Obciążenia $I_1...I_n$ dla rozkładu jazdy obowiązującego na trasie uzyskano z obliczenia przejazdów teoretycznych.

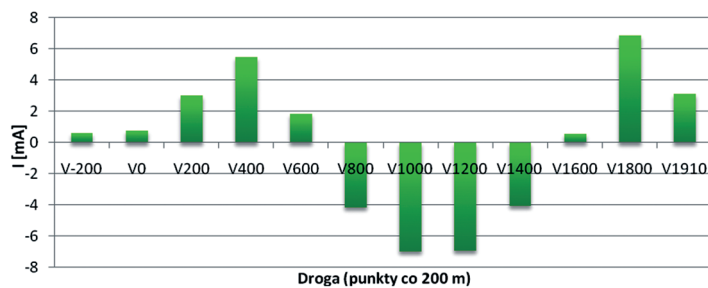
Model obliczeniowy

Na diagramie (rys. 3) przedstawiono uproszczony model obliczeniowy, umożliwiający analizę rozptyłu prądów ziemno-powrotnych. Do wspomnianej analizy konieczne było opracowanie modelu sieci powrotnej, który oparto na powszechnie prezentowanym

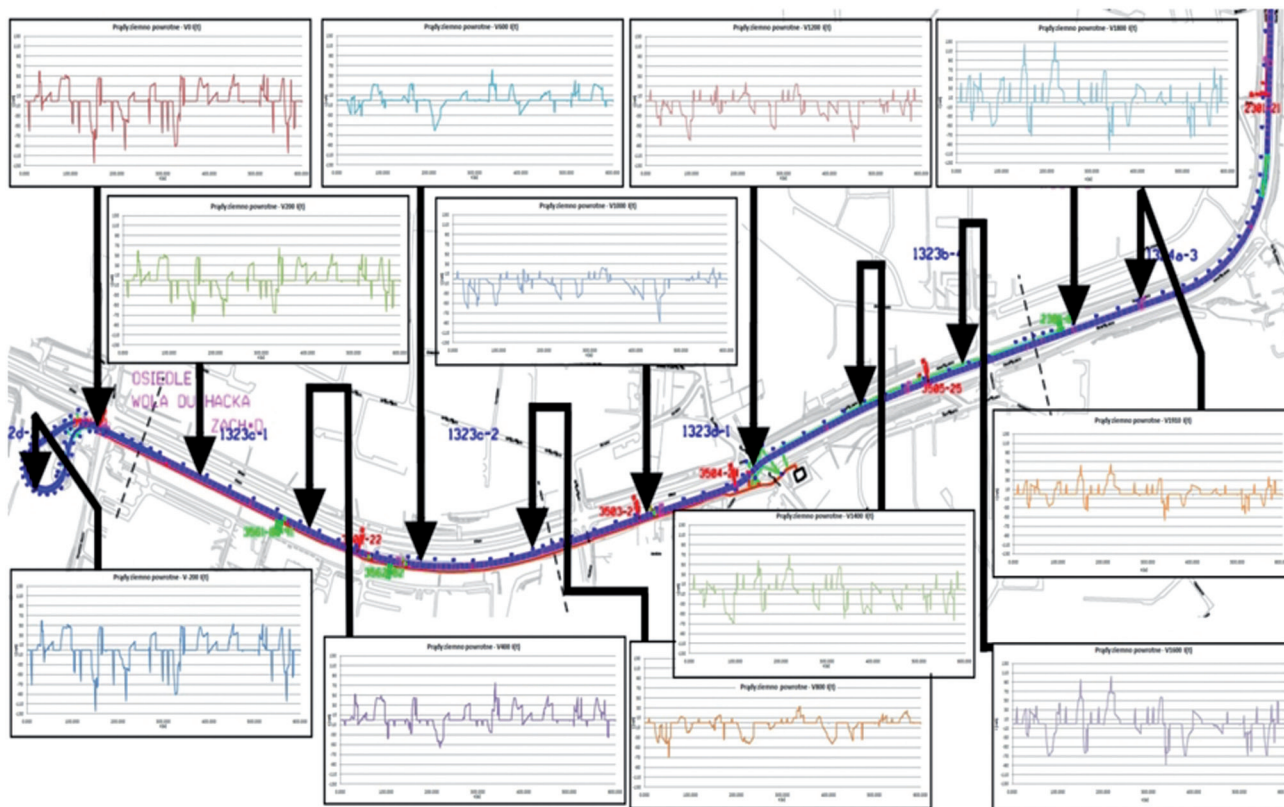


Rys. 3. Uproszczony model obliczeniowy

w literaturze drabinkowym, czysto rezystancyjnym modelu sieci powrotnej [2]. Niezbędne było także zamodelowanie obciążenia w wybranych godzinach. W tym celu wykonano przejazdy teoretyczne przy wykorzystaniu programu EXCEL dla rozkładu jazdy obowiązującego na analizowanym odcinku. Do opracowania schematu oraz analizy rozptyłu prądów uwzględniającej zamodelowane obciążenie wykorzystano pakiet PSpice. Pominięto rekuperację energii elektrycznej przez pojazdy oraz założono sztywność napięcia w sieci tramwajowej.



Rys. 4. Średnie wartości prądów ziemno-powrotnych wypływających i wpływających do szyn



Rys. 5. Poglądowy rozptył prądów ziemno-powrotnych uzyskanych z symulacji w godzinie szczytu przewozowego

Opracowany model umożliwia przeprowadzenie symulacji dla dowolnych parametrów elektrycznych obwodu powrotnego oraz różnych rozkładów jazdy tramwajów.

Wyniki symulacji

Po przeprowadzeniu symulacji uzyskano przebiegi prądów ziemno-powrotnych w funkcji czasu (rys. 5). Jak widać przebiegi prą-

dowe charakteryzują się zauważalną zmiennością dla wszystkich prezentowanych punktów zarówno co do wartości, jak i zwrotu. Ich wartości chwilowe nie określają strefy szyn (w rozpatrywanych punktach, punkcie i przedziale czasu mamy strefę anodową lub katodową szyn). Z punktu widzenia analizy wyników wykorzystano wartości średnie prądów wpływających (wartości dodatnie) oraz wypływających z szyn (wartości ujemne). Pozwoliło to określić rodzaj strefy, jaka występuje na danym odcinku toru (anoda/katoda). Wartości maksymalne tych prądów określają skalę wahań prądów ziemno-powrotnych. Celem oszacowania zagrożeń korozyjnych dla ewentualnych podziemnych konstrukcji metalowych (PKM) niezbędne było przeprowadzenie dalszych obliczeń. Na podstawie wykresów (rys. 5 i 6) można wskazać strefę zagrożenia dla ewentualnych PKM. Znajduje się ona między -200 a 600 m oraz 1600 a 1910 m (strefy anodowe rurociągu), gdzie -200 do 0 to obszar pętli tramwajowej.

Do oceny zagrożenia zaadoptowano także, nieco zmodyfikowany, wskaźnik zagrożenia [7], który informuje o stopniu zagrożenia dla obiektów podziemnych w danym punkcie. Na rysunku 7 przedstawiono strefy zagrożenia według wskaźnika, który jest wyznaczony na podstawie ilorazu liczby wskaźników dodatnich I_+ do sumy liczby wszystkich wartości dodatnich I_+ i ujemnych prądów ziemno-powrotnych I_- :

$$\gamma = \frac{I_+}{I_+ + I_-} \quad (1)$$

Wartość powyżej 0,5 oznacza dominującą liczbę wartości dodatnich prądu niż ujemnych. Może jednak okazać się, że pomimo, iż indeks osiąga wartość powyżej 0,5, średnia wartość prądu będzie ujemna. Do takiego przedstawienia wyników zainspirowano się wskaźnikiem wylansowanym przez Politechnikę Gdańską. Według autorów wartość wskaźnika $\gamma < 30\%$ (linie pionowe) oznacza brak zagrożenia dla obiektów podziemnych. Między $30\% < \gamma < 50\%$ (linie poziome) zagrożenie jest średnie lub duże, a dla $\gamma > 50\%$ bardzo duże (linie ukośne).

Na podstawie wartości wskaźnika γ można przypuszczać, że w większości punktów zagrożenie jest znaczne, a tylko w nielicznych punktach znikome – 1000 i 1200 m.

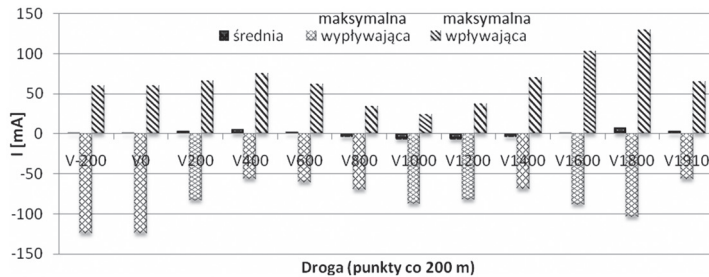
Dzięki uniwersalności opracowanego modelu symulacyjnego przeprowadzono między innymi obliczenia pozwalające określić wpływ uszkodzenia kabla powrotnego na rozpyły prądów ziemno-powrotnych. Okazało się, że może mieć to istotny wpływ na rozkład stref anodowych i katodowych szyn. Przedstawiono jeden z przeanalizowanych przypadków – brak kabla powrotnego na 350 m (rys. 8).

Brak kabla powrotnego, normalnie znajdującego się na 350 m przyczynił się do zmiany lokalizacji występowania strefy anodowej i katodowej (rys. 4 i rys. 8). W punktach od -200 do 600 m zmieniła się strefa z katodowej na anodową, natomiast w punktach od 1200 do 1400 m zmiana była odwrotna. Zmianie uległy również wartości analizowanych prądów.

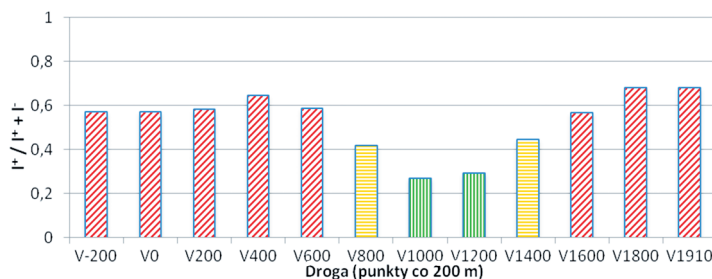
Wykresy na rysunkach 10 i 11 przedstawiają stopień zagrożenia (rys. 10) oraz bezpośrednie porównanie wartości średnich prądów ziemno-powrotnych (rys. 11).

Klasyfikacja stref zagrożenia przedstawia się następująco:

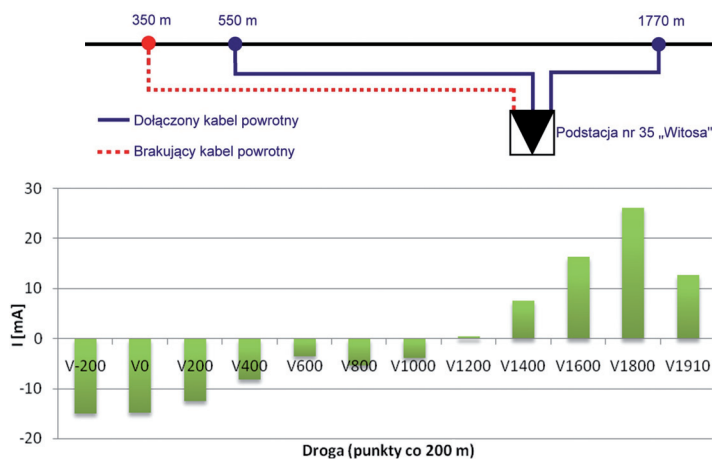
- -200 do 400 m znajduje się strefa małego ryzyka,
- 600 do 1000 m strefa średniego/dużego ryzyka,
- 1200 do 1910 m strefa bardzo dużego ryzyka.



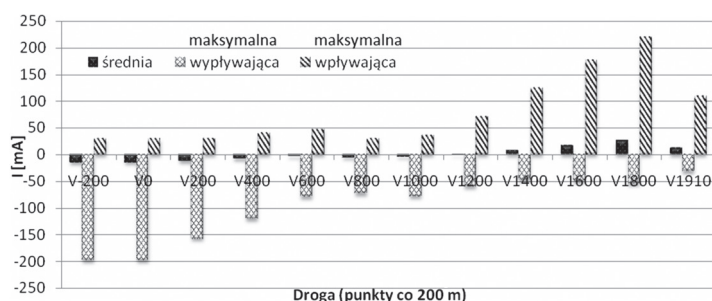
Rys. 6. Wartość średnia oraz maksymalna prądów wpływających i wypływających z szyn w godzinach szczytu



Rys. 7. Strefy zagrożenia według wskaźnika (1)



Rys. 8. Wpływ braku kabla powrotnego na 350 m na wartości średnie prądów ziemno-powrotnych



Rys. 9. Wartość średnia oraz maksymalna prądów wpływających i wypływających z szyn przy braku kabla powrotnego na 350 m

Uwagi końcowe

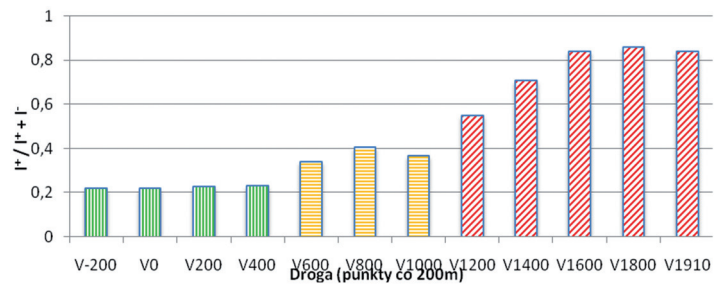
Przeprowadzone symulacje wykazały, że zastosowanie dodatkowych kabli powrotnych nie zawsze poprawia sytuację w zakresie kształtowania się stref anodowych i katodowych w obszarze oceanianego torowiska. Istotne natomiast jest miejsce przyłączenia kabli powrotnych do szyn, które wpływa na wartość prądów ziemno-powrotnych. Zmiana liczby lub położenia kabli powrotnych w pewnych przypadkach skutkuje zmianą wartości średniej prądów ziemno-powrotnych (na mniejszą lub większą wartość), a czasem dochodzi do zmiany ich znaku na przeciwny. Można więc uznać, że możliwa jest zmiana w konkretnym punkcie strefy z anodowej na katodową, i odwrotnie. Taką zmianę można zauważyć na rysunku 11, gdzie pokazane są wartości średnie prądów ziemno-powrotnych w rozpatrywanych punktach dla wariantu z wszystkimi kablami powrotnymi oraz w przypadku braku kabla na 350 m. Jako punkt porównawczy wybrano 400 m, w którym widać, jak duża może być różnica między poszczególnymi wariantami. Nie tylko zmienia się wartość średnia prądu, ale także jej znak, co wskazuje, że doszło do zmiany strefy szyn na przeciwną w tym punkcie torowiska.

Przeprowadzone analizy rozptyłu prądów ziemno-powrotnych dotyczą rzeczywistego odcinka zasilania. Opracowany model charakteryzuje się znaczną uniwersalnością. Umożliwia bowiem symulacje dla praktycznie każdego parametru sieci powrotnej przy danym natężeniu ruchu. W artykule przedstawiono wyniki dla godziny szczytu, dla której występuje największe zagrożenie ze strony prądów błądzących. Należy mieć na uwadze, że strefy zostały wyznaczone na podstawie wartości średnich prądów ziemno-powrotnych. Jak można zauważyć, na przebiegach czasowych (rys. 5), jak i największych wartościach prądów wpływających oraz wypływających z szyn (rys. 6, 9), prąd w analizowanym punkcie może zmieniać zwrot (wplywać lub wypływać). Dopiero na podstawie obliczenia wartości średnich można stwierdzić, jaka strefa dominuje w danym punkcie.

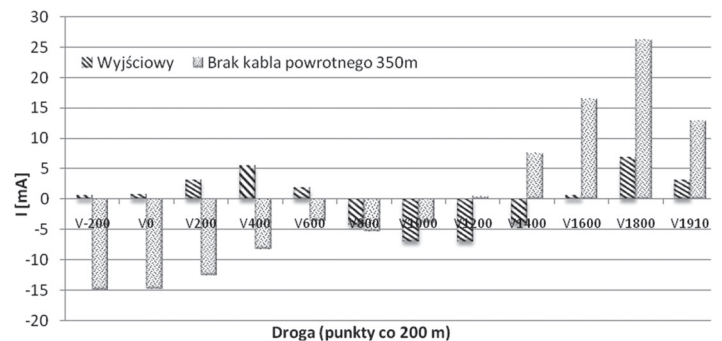
Wiadomo, że najkorzystniejsza z punktu widzenia ograniczenia prądów błądzących jest jak najmniejsza rezystancja wzdłużna szyn i jak najmniejsza konduktancja przejścia szyny–ziemia, co gwarantuje ograniczenie wartości prądów błądzących. Zauważono, że w wyniku zmiany wspomnianych parametrów nie jesteśmy w stanie zmienić wartości średniej prądów wpływających z szyn na przeciwną – nie udało się zmienić strefy anodowej szyn na katodową, i odwrotnie.

Wyniki przeprowadzonych symulacji wykazały, że największy wpływ na typ strefy mamy na etapie projektowania lokalizacji kabli powrotnych. Ich położenie decyduje o rozkładzie stref oraz o wartościach prądów błądzących w poszczególnych punktach. Wszystkie rozważone przypadki dla wybranej linii wykazały, że zaprojektowana lokalizacja kabli powrotnych jest właściwa.

Jeżeli przeprowadzone symulacje rozptyłu prądów w obwodach ziemno-powrotnych zostaną eksperymentalnie pozytywnie zweryfikowane, to ich zastosowanie będzie mogło stanowić wytyczną przy projektowaniu usytuowania kabli powrotnych, w sposób najmniej szkodliwy dla podziemnych konstrukcji metalowych. W przypadku prowadzenia torowisk tramwajowych wzdłuż konstrukcji inżynierskich (mosty, wiadukty) ocena ewentualnych zagrożeń od trakcyjnych prądów błądzących po sprecyzowaniu zastępczego schematu elektrycznego tych konstrukcji może oka-



Rys. 10. Strefy zagrożenia według wskaźnika (1) przy braku kabla powrotnego na 350 m



Rys. 11. Bezpośrednie porównanie wartości średnich prądów ziemno-powrotnych przy dołączonym i odłączonym kablu powrotnym na 350 m

zać się możliwa. Wymagać to będzie od projektantów i wykonawców wspomnianych obiektów nowego podejścia, umożliwiające określenie ich parametrów elektrycznych (modelu zastępczego).



Literatura

- [1] Sokólski W.: *Ochrona katodowa stalowych konstrukcji podziemnych (wiadomości podstawowe)*. Zeszyt nr 25, dodatek do miesięcznika INPE, czerwiec 2009.
- [2] Mierzejewski L., Szeląg A., Gałuszewski M.: *System zasilania trakcji elektrycznej prądu stałego*. Warszawa 1989.
- [3] Materiały Krajowych Konferencji *Pomiary Korozyjne w Ochronie Elektrochemicznej*. Polski Komitet Elektrochemicznej Ochrony Przed Korozją przy Zarządzie Głównym SEP w Warszawie.
- [4] Dziuba W.: *Sieć powrotna i prądy błądzące*. Warszawa 1995.
- [5] Łuczywek Z., Słaby L.: *Elektromonter podstacji trakcyjnej*. WKŁ. Warszawa 1972.
- [6] *Protokół badania i pomiaru uziemienia podstacji nr 35 „Witosa”*, ZIKiT 2007.
- [7] Dziuba W.: *Kryteria zagrożenia korozyjnego podziemnych konstrukcji metalowych wskutek oddziaływania prądów błądzących, według EN 50162*. VIII Krajowa Konferencja, Jurata 2004.
- [8] Mierzejewski L., Szeląg A.: *Sieci powrotne zelektryfikowanego szynowego transportu miejskiego*. Technika Transportu Szynowego 7-8/2005, s. 56–65.
- [9] *Kable i przewody elektroenergetyczne* – Katalog Tele-Fonika Kable S.A., 2006.
- [10] *Materiały elektroniczne zawierające profil trasy*. ZIKiT w Krakowie, 23 marzec 2009.
- [11] www.mpk.krakow.pl