

Zofia Wróbel, Robert Ziemba

Zastosowanie programu EMTP-ATP w analizie zagrożeń przepięciowych urządzeń sterowania ruchem kolejowym

Pojawiające się podczas bezpośredniego uderzenia piorunowego w sieć trakcyjną sprzężenie galwaniczne powoduje wzrost potencjału jednego toku szynowego względem drugiego [1]. W wyniku takiego oddziaływania, na przepięcia o dużych amplitudach narażone są wyjścia nadajników i wejścia odbiorników bezzłączowych obwodów torowych dołączonych do toków szynowych i zainstalowanych w znacznej odległości od miejsca uderzenia. W momencie pojawienia się przepięcia o dużej amplitudzie w jednym toku szynowym wysoki potencjał o charakterze impulsu przenosi się do nisko impedancyjnego wyjścia nadajnika lub do wejścia odbiornika obwodu torowego powodując nieuchronne uszkodzenie elementów półprzewodnikowych [2, 3, 4].

Obecnie dostępne są różne pakiety oprogramowania wspomagającego symulacje zjawisk elektromagnetycznych stanowiących poważne zagrożenie dla pracy elektronicznych urządzeń sterowania ruchem kolejowym. Wykorzystując sprawdzone modele matematyczne elementów układów i urządzeń elektrycznych oraz zjawisk fizycznych zaimplementowane w programach komputerowych, z powodzeniem można wykonywać badania symulacyjne rzeczywistych układów. Z opracowanych modeli poszczególnych elementów układu: szyny, sieć trakcyjna, słup, odgromnik różkowy, uzupełnionych o model ochronnika i dławika torowego, zbudowano model fragmentu sieci trakcyjnej w programie EMTP-ATP [5].

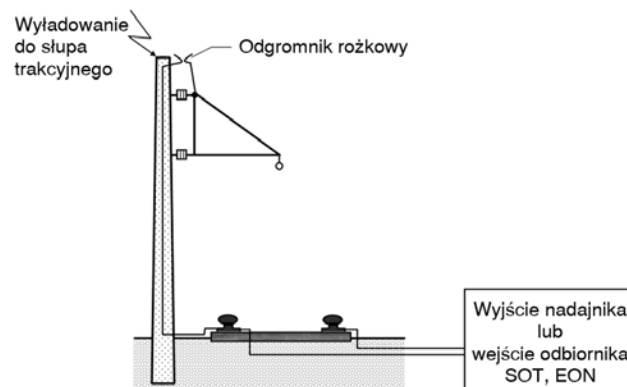
Warunki pracy układów ochrony przepięciowej

Pracę urządzeń srk i współpracujących z nimi innych urządzeń określają normy uwzględniające specyficzne uwarunkowania środowiska kolejowego [6, 7, 8, 9]. W stosowanych obecnie urządzeniach sterowania ruchem kolejowym ważną część stanowią układy elektroniczne. Ich cechą charakterystyczną jest niska odporność udarowa zarówno na bezpośrednie oddziaływanie impulsowego pola elektromagnetycznego, jak i na działanie napięć i prądów udarowych dochodzących do urządzeń z sieci zasilającej oraz z linii przesyłu sygnałów. Przepięcia są szczególnie groźne dla urządzeń pracujących w rozbudowanych systemach, do których należą urządzenia srk rozmieszczone w terenie otwartym, w bezpośrednim sąsiedztwie torów kolejowych (rys. 1) [10, 11, 12, 13].

Urządzenia te, rozmieszczone w pobliżu torów kolejowych, są narażone przede wszystkim na uderzenia pioruna w bliskim sąsiedztwie oraz uderzenia pioruna w sieć trakcyjną. Powstające przepięcia są indukowane przez impulsowe pole elektromagne-

tyczne i przez sieć trakcyjną, odgromniki różkowe, połączenia uszyniające przenoszą się wzdłuż szyn toru kolejowego. Szyny toru kolejowego stanowią trakcyjną sieć powrotną, która oprócz odprowadzania prądów powrotnych do podstacji, powinna zapewniać wyłączalność zwarć w sieci trakcyjnej, ochronę przeciwporażeniową, a równocześnie spełniać wymagania dotyczące ograniczania upływu prądów błądzących [14, 15, 16].

Zagrożenie potęguje wykorzystywanie szyn toru kolejowego jako kanału transmisyjnego obwodu torowego. Obwód ten kontroluje niezajętość danego odcinka toru. Obwody torowe urządzeń srk są obwodami małej mocy (10 – 30 VA), zasilanymi napięciem przemiennym w zakresie częstotliwości: 50 Hz, 1,5 kHz – 36 kHz [17]. W celu uniknięcia lub znacznego ograniczenia szkód wywołanych wyładowaniami atmosferycznymi czy różnego rodzaju przepięciami, urządzenia srk należy chronić odpowiednio dobranymi układami ochrony przeciwprzepięciowej [1, 2, 3, 4].



Rys. 1. Schemat połączeń obwodu torowego

Kryteria oceny odporności na zaburzenia określone są w normie PN-EN 50121-1 [5]. Nie różnią się one zasadniczo od stosowanych dotychczas, a podanych w pracy [1], które były sformułowane na podstawie nieważnionej już obecnie normy PN-86/E-06600. Podstawowymi uwarunkowaniami w tym zakresie są:

- stosowanie połączeń międzytokowych i międzytorowych pozwalające na ograniczenie w torach napięcia udarowego pochodzenia trakcyjnego i burzowego, warunkującego skuteczną ochronę przeciwprzepięciową urządzeń przytorowych;
 - przestrzeganie zachowania zalecanego przez CNTK odległości co najmniej 100 m między miejscem przyłączenia urządzeń do toru a odgromnikiem różkowym sieci trakcyjnej [1, 2, 3].
- Proponuje się, aby odporność urządzeń wynosiła co najmniej [2, 3, 4, 11]:

- 4 kV na przyłączach zasilania energetycznego (nastawia, kontener, szafa zasilająca);
- 5 kV na wejściu i wyjściu bezpośrednim odbiorników i nadajników od strony toru (urządzenia SOT, EON, EOC), przy czym podczas badania powinno być stosowane sprzężenie pojemnościowe $18 \mu\text{F}$;
- 3 kA udaru prądowego $8/20 \mu\text{s}$ w szynie dla wejścia odbiorników (urządzenia SOT) sprzężonych z torem przez przekładnik szynowy;
- 4 kV na wejściach i wyjściach długich torów transmisji sygnałów (urządzenia zdalnej kontroli), przy czym podczas badania powinny być stosowane udary $10/700 \mu\text{s}$.

Rzeczywiste warunki eksploatacji mają znaczący wpływ na parametry elektryczne toru [18, 19, 20]. W publikacji [21] przedstawiono przykładowe wyniki modelowania poszczególnych elementów układu takich, jak: szyny, przewód jezdny, stęp, uszynie, odgromnik różkowy, izolator. Elementy te pozwoliły na utworzenie bardziej rozbudowanego fragmentu układu sieci trakcyjnej.

Prądy udarowe

w analizie piorunowych wyładowań doziemnych

Zawarte w normie: PN-EN 62305-1:2006/AC:2007(U) [10] propozycje schematów zastępczych generatorów pozwalają na modelowanie zagrożeń powodowanych przez:

- prąd piorunowy pierwszego doziemnego wyładowania głównego,
- zmiany prądu piorunowego dla pierwszego i kolejnych wyładowań głównych w kanale.

Przykładowo, podane dla pierwszego poziomu ochrony w normie amplitudy i kształty przebiegów prądu, wynoszą:

- długotrwałej składowej wyładowania 400 kA; $0,5 \text{ s}$,
- pierwszej składowej wyładowania 200 kA; $10/350 \mu\text{s}$,
- kolejnych składowych wyładowania 50 kA; $0,25/100 \mu\text{s}$.

Na ich działanie narażone są urządzenia lub elementy konstrukcji obiektu, w które może nastąpić bezpośrednie wyładowanie albo jeżeli znajdują się w obwodach przepływu prądów piorunowych.

Do badań urządzeń w sieciach telekomunikacyjnych i sygnalizacyjnych jest stosowany udar napięciowy $10/700 \mu\text{s}$ zgodnie z normą PN-EN 61643-21:2004 [22]. Przedstawiony na rysun-

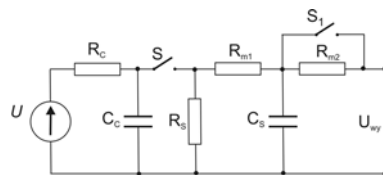
ku 2 schemat generatora udaru $10/700 \mu\text{s}$ zawiera: U – źródło wysokiego napięcia, R_C – rezystor ładujący, C_C – kondensator gromadzący energię ($20 \mu\text{F}$), R_S – rezystor kształtujący czas trwania impulsu (50Ω), R_m – rezystory dopasowujące impedancję ($R_{m1} = 15 \Omega$; $R_{m2} = 25 \Omega$), C_S – kondensator kształtujący czas narastania ($0,2 \mu\text{F}$), S_1 – wyłącznik zamykany, gdy używane są zewnętrzne rezystory dopasowujące [23].

Kształt udaru napięciowego $10/700 \mu\text{s}$ przybliżono przebiegiem dwuwykładniczym podanym wzorem:

$$u(t) = 0,10113 U_m (e^{-0,10068 \cdot 10^4 t} - e^{0,64766 \cdot 10^6 t}) \quad (1)$$

W schemacie generatora do modelowania znormalizowanego udaru $10/700 \mu\text{s}$ (rys. 2) nie jest określona wielkość rezystancji R_C (rezystor ładujący). Na podstawie przeprowadzonych symulacji do modelowania przyjęto wielkość równą $0,001 \Omega$ [24, 25].

W stanie zwarcia z generatora udaru napięciowego $10/700 \mu\text{s}$ otrzymuje się przebieg prądu $5/320 \mu\text{s}$ [23]. W programie EMTP-ATP jest dostępnych do stosowania kilka modeli źródeł napięć i prądów udarowych typu: Heidler, Standler i Surge.

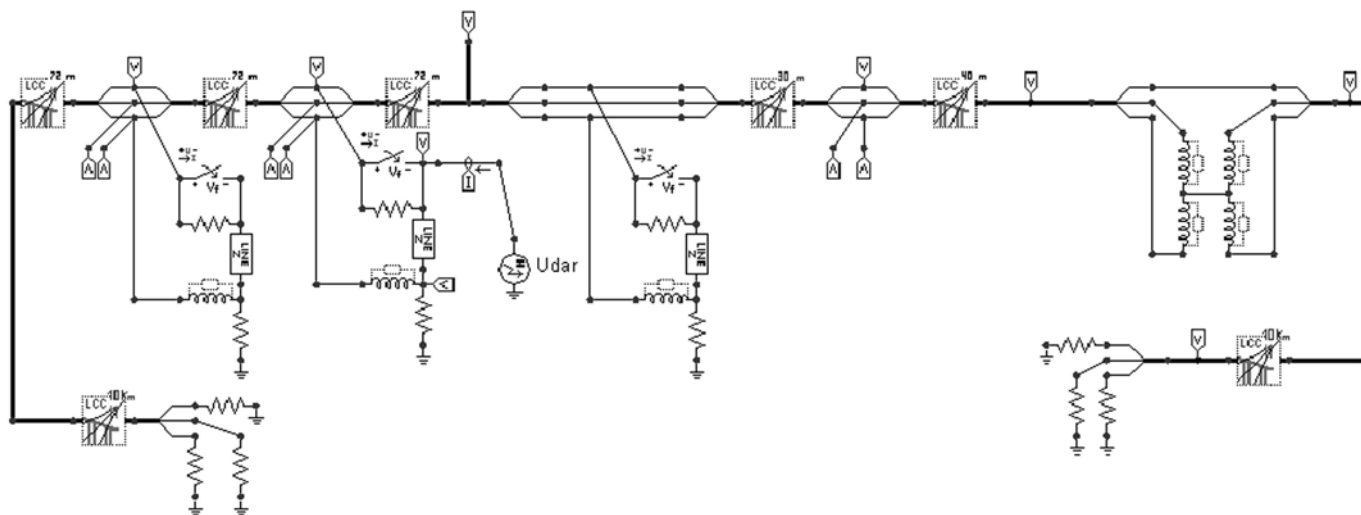


Rys.2. Schemat układu generatora $10/700 \mu\text{s}$ [23]

Symulacje przepięć wybranego układu

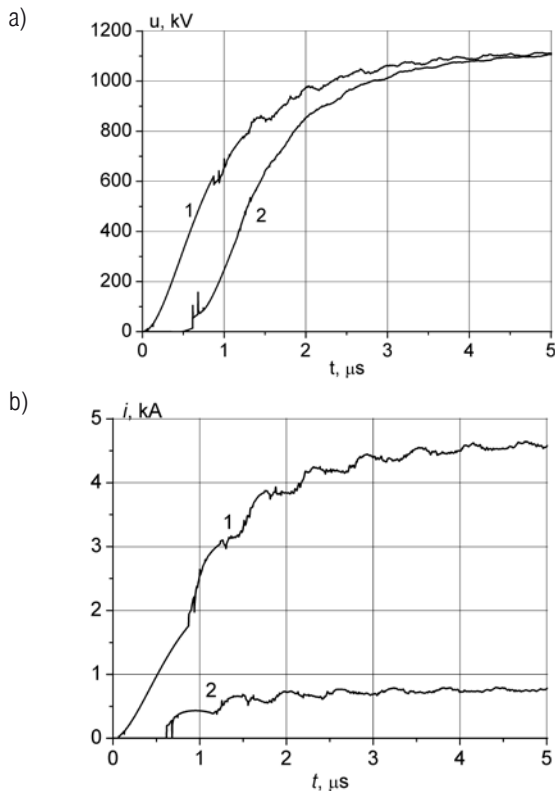
Do symulacji opracowano w programie EMTP-ATP model odcinka sieci trakcyjnej przedstawiony na rysunku 3.

W modelu uwzględniono stęp z odgromnikiem różkowym, do którego doprowadzono wymuszenie piorunowe w postaci źródła prądowego typu Heidler, o amplitudzie 10 kA i kształcie $10/700 \mu\text{s}$. W analizie uwzględniono trzy sąsiednie stępy z doprowadzonym udarem do środkowego stępa. Przerwę iskrową izolatorów tych stępów zamodelowano wyłącznikami sterowanymi napięciowo, o napięciu zadziałania 90 kV . Uwzględniono układ bez dławika torowego oraz z dołączonym dławikiem umieszczonym w odległości dwóch pręseł od uderzonego stępa. Przeanalizowano skuteczność działania zastosowanego ochronnika przyłączonego do zacisków dławika. Na rysunku 4 przedstawiono



Rys. 3. Analizowany układ sieci trakcyjnej przy wymuszeniu piorunowym

przebiegi prądów w dwóch sąsiednich słupach dla układu bez dławika.



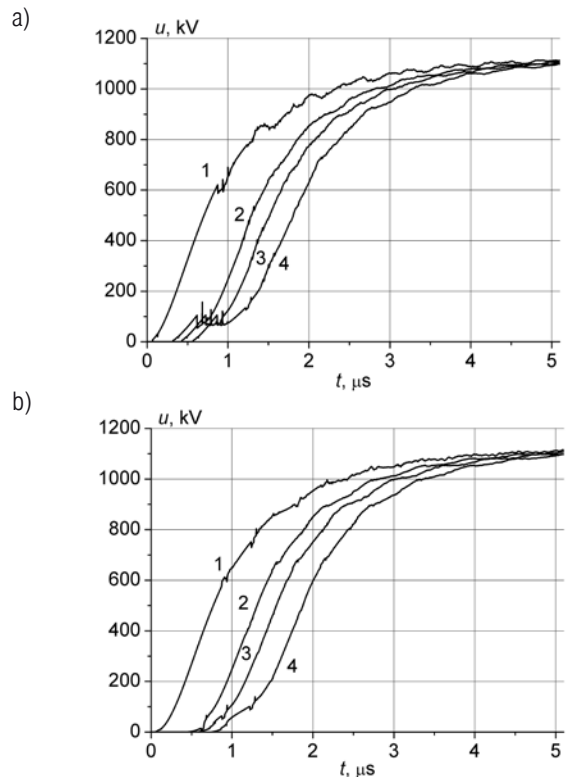
Rys. 4. Przebiegi napięć i prądów sąsiednich słupów
a) potencjały na wierzchołkach słupów, b) prądy przerwy iskrowych słupów (1 – słup z odgromnikiem różkowym, 2- słup sąsiedni)

Rysunek 5 przedstawia przebiegi napięć przewodu jezdnego i szyny z uszynieniem, a rysunek 6 przebiegi napięć szyny bez uszynienia oraz różnice napięć między szynami. Obliczenia dotyczą układu bez dławika. Na wykresach oznaczono cyframi przebiegi dla różnych odległości od uderzonego słupa: 1 – 0 m, 2 – 72 m, 3 – 100 m, 4 – 150 m.

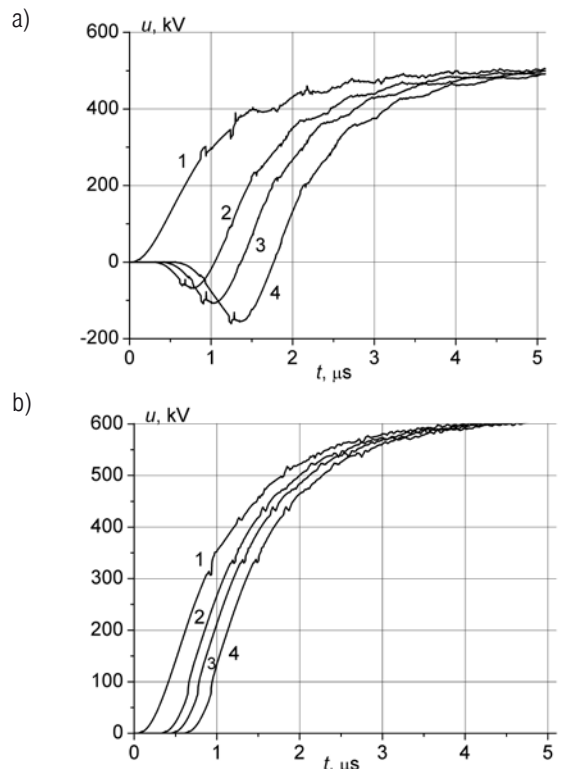
Dla układu zawierającego dławik torowy wykonano obliczenia napięć na zaciskach dławika. Celem oceny skuteczności działania ochronnika dla obwodów torowych przeprowadzono obliczenia prądu i napięć na elementach ochronnika przyłączonego do zacisków dławika. Na rysunku 7 przedstawiono napięcia szyn i różnice napięć między szynami w miejscu przyłączenia dławika oraz potencjał punktu „zerowego” dławika oraz przedstawiono prąd odgromnika gazowego OG2 i napięcia na obydwu odgromnikach (oznaczenia jak na rysunku 3 w pracy [21]). Na powiększeniu fragmentu wykresu widać zadane napięcia zadziałania odgromników potwierdzające skuteczność działania ochronnika.

Podsumowanie

Skuteczne projektowanie układów ochrony przeciwprzebiegowej urządzeń sterowania ruchem kolejowym wymaga znajomości zagrożeń, jakie mogą się pojawić w wyniku zakłóceń pracy sieci trakcyjnej, na przykład w wyniku wyładowania atmosferycznego. Dla bezzłączowych obwodów torowych sprzężonych galwanicznie z tokami szynowymi, problem ochrony urządzeń jest bardziej skomplikowany w porównaniu z innymi urządzeniami sterowania ruchem kolejowym. W tym przypadku mogą bowiem wystąpić przebiegi o dużych amplitudach oraz znaczne przetężenie, ze

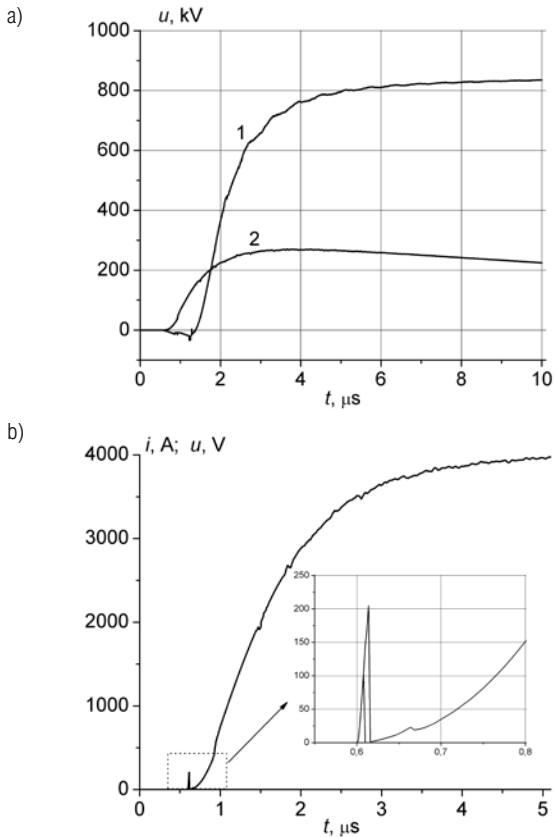


Rys. 5. Przebiegi napięć dla różnych odległości od uderzenia pioruna
a) przewód jezdny; b) szyna z uszynieniem



Rys. 6. Przebiegi napięć dla różnych odległości od uderzenia pioruna
a) szyna bez uszynienia, b) między szynami

względu na małą impedancję obwodu. Przedstawione wyniki przebiegów w analizowanym układzie wskazują na duże zagrożenie urządzeń srk przepięciami pochodzenia atmosferycznego. Potwierdzają one również dużą użyteczność programu EMTP-ATP



Rys. 7. Napięcia w układzie z dławikiem torowym
 a) potencjał punktu środkowego dławika (1) i napięcie na uzwojeniu dławika (2); b) prąd i napięcia ochronnika obwodów torowych

w analizie zagrożeń przepięciowych urządzeń sterowania ruchem kolejowym.



Literatura

[1] Laskowski M., Kulawiak A.: *Ochrona przeciwprzepięciowa i przeciwporażeniowa w urządzeniach srk z elementami elektronicznymi*. Praca CNTK, nr 1002/24, Warszawa 1994.

[2] Kulawiak A., Kabacińska B., Kaźmierczak A.: *Analiza stanu i ocena ochrony przeciwprzepięciowej urządzeń srk na sieci PKP. Etap 1. Przygotowanie zbioru dokumentacji najczęściej uszkodzanych urządzeń srk*. Wersja 2. Nr 4036/20. CNTK, Warszawa, 2003.

[3] Kulawiak A., Kabacińska B., Kaźmierczak A.: *Analiza stanu i ocena ochrony przeciwprzepięciowej urządzeń srk na sieci PKP. Etap 2. Analiza uszkodzeń urządzeń srk spowodowanych przepięciami*. Wersja 2. Nr 4036/20. CNTK, Warszawa, 2003.

[4] Laskowski M., Wróbel Z.: *Poziomy zaburzeń radioelektrycznych i impulsowych zaburzeń elektromagnetycznych w energetycznej sieci niskiego napięcia, zasilającej stacjonarne obiekty kolejowe*. Problemy Kolejnictwa, zeszyt 145, Warszawa 2007.

[5] Dommel H. W.: *ElectroMagnetic Transients Program, Reference Manual (EMTP Theory Book)*, Bonneville Power Administration, Portland Oregon 1986.

[6] PN-EN 50121-1, 2004: *Zastosowania kolejowe. Kompatybilność elektromagnetyczna. Część 1: Wymagania ogólne*. (EN 50121-1:2004).

[7] PN-EN 50121-2, 2004: *Zastosowania kolejowe. Kompatybilność elektromagnetyczna. Część 2: Oddziaływanie systemu kolejowego na otoczenie*.

[8] PN-EN50121-4, 2002(U): *Zastosowania kolejowe. Kompatybilność elektromagnetyczna. Część 4: Emisja i odporność na zakłócenia urządzeń sygnalizacji i telekomunikacji*.

[9] PN-EN50121-5, 2002(U): *Zastosowania kolejowe. Kompatybilność elektromagnetyczna. Część 5: Emisja i odporność aparatów i urządzeń stacjonarnych zasilania energią*.

[10] PN-EN 62305-1:2006/AC:2007(U) – *Ochrona odgromowa – Część 1: Wymagania ogólne*.

[11] Laskowski M., Małesa R., Wróbel Z. i inni: *Określenie istniejących poziomów zakłóceń elektromagnetycznych w ruchomych i stacjonarnych obiektach kolejowych*. Praca CNTK (Zakład Telekomunikacji) nr 1049/24, Warszawa, czerwiec 1997.

[12] PN-EN 50122-1, 2002: *Zastosowania kolejowe. Urządzenia stacjonarne. Część 1. Środki ochrony dotyczące bezpieczeństwa elektrycznego i uziemień*.

[13] PN-EN 50122-2, 2003 (U): *Zastosowania kolejowe. Urządzenia stacjonarne. Część 2. Środki ochrony przed oddziaływaniem prądów błędnych wywoływanych przez trakcję elektryczną prądu stałego*.

[14] Puderecki F.: *Obwody torowe stosowane na PKP*. WKiŁ, Warszawa 1962.

[15] Białoń A., współautorzy: Kaźmierczak A., Zając W.: *Opracowanie dopuszczalnych parametrów zakłóceń dla urządzeń srk, łączności i pojazdów trakcyjnych. Sprawozdanie końcowe*. Zadanie Nr 6915/23, Centrum Naukowo-Techniczne Kolejnictwa, Warszawa, 1999.

[16] Głowacki K., Onderka E.: *Sieci trakcyjne*. EMTRAK, Bibice, 2002.

[17] *Dokumentacja techniczno-ruchowa: SOT-1. Liniowe bezzłączowe obwody torowe*. Bombardier Transpotration (ZWUS) Polska Sp. z o.o.®

[18] Szelań A.: *Zagadnienia analizy i projektowania systemu trakcji elektrycznej prądu stałego z zastosowaniem technik modelowania i symulacji*. Prace Naukowe. Elektryka. Z. 123, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2002.

[19] Hill J., Carpenter D.: *Rail track modeling for signaling and electrification system simulation study*. Rail Eng. Int. 1990.

[20] Laskowski M.; Wróbel Z.: *Wpływ impulsowych zaburzeń elektromagnetycznych na obwody torowe*. VIII Konferencja Naukowa Trakcji Elektrycznej, SEMTRAK'98, Zakopane, listopad, 1998.

[21] Wróbel Z., Ziemia R.: *Modelowanie elementów sieci trakcyjnej w analizie zagrożeń urządzeń sterowania ruchem kolejowym powodowanych przepięciami atmosferycznymi*. Technika Transportu Szynowego 4/2008.

[22] PN-EN 61643-21:2004 – *Niskonapięciowe urządzenia ograniczające przepięcia. Część 21: Urządzenia do ograniczania przepięć w sieciach telekomunikacyjnych i sygnalizacyjnych. Wymagania eksploatacyjne i metody badań*.

[23] PN-EN 61000-4-5, 1998 – *Kompatybilność elektromagnetyczna (EMC). Metody badań i pomiarów. Badania odporności na udary*.

[24] Wróbel Z.: *Impulsy udarowe w badaniach zagrożenia urządzeń sterowania ruchem kolejowym*. 8th International Conference Modern Electric Traction in Integrated XXI st. Z. 123. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2007.

Autorzy

dr inż. Zofia Wróbel, zwrobel@prz.edu.pl
 PKP PLK S.A., Zakład Linii Kolejowych w Rzeszowie
 dr inż. Robert Ziemia ziemia@prz.edu.pl
 Politechnika Rzeszowska