



Zofia WRÓBEL

PKP PLK S.A., Zakład Linii Kolejowych w Rzeszowie  
Stowarzyszenie Inżynierów i Techników Komunikacji w Rzeszowie

## Analiza pracy wybranych układów ochrony przepięciowej obwodów torowych w warunkach zagrożeń udarowych

**Streszczenie.** W referacie podjęto próbę oceny wpływu impulsowych zaburzeń elektromagnetycznych na pracę obwodów torowych stosowanych w urządzeniach sterowania ruchem kolejowym. Wykonano badania laboratoryjne oraz symulacje w programie PSPICE odpowiedzi wybranych modeli ochronników na znormalizowany udar 10/700  $\mu$ s. Przeprowadzono analizę otrzymanych wyników, uwzględniając w niej rezultaty estymacji parametrów schematu zastępczego generatora zastosowanego do badań.

**Abstract.** (Analysis of working of selected overvoltage protection devices for track circuits in lightning impulse conditions). A trial was undertaken to estimate the influence of electromagnetic impulse disturbances on the performance of track circuits used in railway traffic control equipment. Laboratory tests and simulations of the responses of chosen surge arresters' models to standard lightning impulse 10/700  $\mu$ s were carried into effect on PSPICE computer software. The analysis of received results, including the estimation results of the simplified scheme's parameters used in the generator's research was performed.

**Słowa kluczowe:** odgromniki gazowe, modelowanie cyfrowe, symulacja.  
**Keywords:** gas arresters, numerical modelling, simulation.

### Wstęp

Specyficzne warunki pracy elektronicznych urządzeń sterowania ruchem kolejowym (srk) sprzyjają powstawaniu rozległych pętli, w których w wyniku działania impulsowego pola elektromagnetycznego mogą indukować się przepięcia o znaczących amplitudach [1,2]. Szczególne znaczenie mają obwody torowe, których zadaniem jest kontrola zajętości poszczególnych odcinków torów.

Najczęściej stwierdzone uszkodzenia obwodów torowych w wyniku wyładowań atmosferycznych mają miejsce od strony wyjść nadajników i wejść odbiorników bezzłączowych obwodów torowych i elektronicznych obwodów nakładanych.

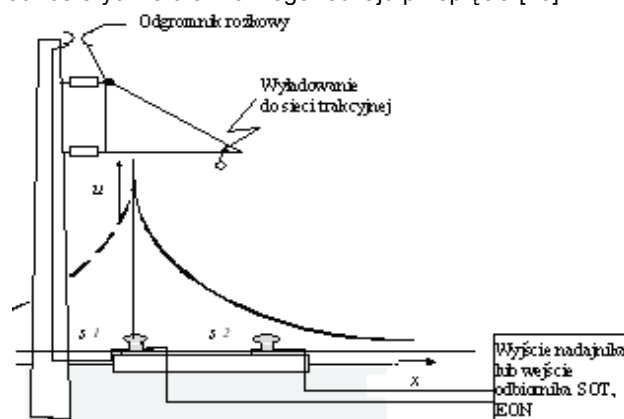
Wymagania dotyczące zapewnienia ochrony urządzeń srk i telekomunikacyjnych stosowanych na PKP implikują wzrost znaczenia badań laboratoryjnych i symulacji komputerowych [2-5]. Ważnym zagadnieniem w tym zakresie jest tworzenie sprawdzonych modeli napięć i prądów udarowych o określonych wartościach szczytowych i kształtach oraz modeli elementów układów ochrony przepięciowej [6-8]. Niezbędne w tego rodzaju analizach są języki oprogramowania wysokiego poziomu (SES, NEC) oraz standardowe programy obliczeniowe (EMTP-ATP, PSPICE). Stwarzają one szerokie możliwości symulacji rzeczywistych elementów układu i dobór odpowiednich zabezpieczeń. Analizy porównawcze pozwalają na ocenę różnic pomiędzy rzeczywistymi elementami i ich modelami matematycznymi.

### Warunki pracy obwodów torowych

Przeniknięcie udaru piorunowego do sieci trakcyjnej powoduje podniesienie potencjału jednego toku szynowego względem drugiego. W pobliżu miejsca usztywnienia słupa trakcyjnego występują najwyższe gęstości prądu oraz największy gradient napięcia. Analogiczny rozkład potencjału występuje względem drugiego toku szynowego, ale nachylenie stożka potencjału wzdłuż tego toku szynowego jest znacznie mniejsze [9]. W momencie pojawienia się przepięcia o dużej amplitudzie w jednym toku szynowym wysoki potencjał przenosi się do niskoimpedancyjnego wyjścia nadajnika lub do wejścia odbiornika stacyjnego obwodu torowego (SOT) powodując

nieuchronne uszkodzenie elementów półprzewodnikowych, jeżeli nie są stosowane układy ochrony przepięciowej.

Szyny toru kolejowego stanowią jednocześnie trakcyjną sieć powrotną, która prócz odprowadzania prądów powrotnych do podstacji, powinna zapewniać wyłączalność zwarć w sieci trakcyjnej oraz ochronę przeciwporażeniową, a jednocześnie ograniczać upływ prądów błądzących [1,2]. Te specyficzne warunki pracy urządzeń srk wymagają doboru odpowiednich układów i systemów ochrony przepięciowej, dzięki którym można uniknąć lub znacznie ograniczyć szkody wywołane przez wyładowania atmosferyczne oraz różnego rodzaju przepięcia [10].



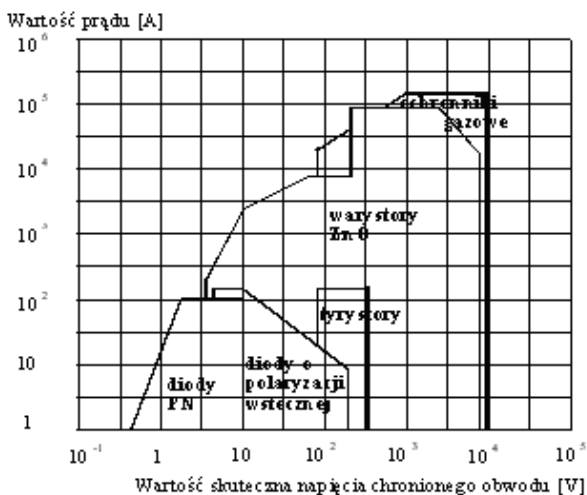
Rys.1. Schemat połączeń obwodu torowego z uwzględnieniem rozkładu napięcia w tokach szynowych dla przepięcia o dużej amplitudzie [9]

### Wymagane poziomy ochrony obwodów torowych i środki zaradcze

W analizie warunków pracy obwodów torowych, do czasu wprowadzenia normy PN-EN 61643-21:2004 [11] przyjmowano stosowanie ochrony przepięciowej tych urządzeń dla wartości szczytowych przepięć i prądów przetężeń analogicznie, jak w napowietrznych liniach telekomunikacyjnych [12-14]. Wymagana odporność na przepięcia zgodnie z [2], powinna wynosić 5 kV na wyjściu bezpośrednim odbiorników i nadajników od strony toru

(urządzenia SOT, EON, EOC) dla impulsów o znormalizowanym kształcie 1,2/50  $\mu$ s. Wymagana odporność na przetężenia dla impulsów prądu o kształcie 8/20  $\mu$ s powinna być nie mniejsza niż 10 kA. Podczas badania powinno być stosowane sprzężenie pojemnościowe 18  $\mu$ F [2,12,13].

W momencie powstania wyładowania do sieci trakcyjnej na wyjściach czujników SOT i EON mogą pojawić się przepięcia o amplitudach kilku kV. Ochrona urządzeń będzie polegać na szybkim wyrównaniu potencjałów między przewodami łączącymi urządzenia z tokami szynowymi, aby nie dopuścić do uszkodzenia elementów półprzewodnikowych. Na rysunku 2 przedstawiono schematyczne porównanie elementów ochrony przepięciowej uwzględniające zakresy prądów przewodzonych dla udaru 8/20  $\mu$ s i wartości skuteczne napięć chronionego obwodu. Jedynymi z częstych środków ochrony przepięciowej są odgromniki gazowe [15].



Rys. 2. Porównanie zakresu stosowania elementów ochrony przepięciowej przy udarach prądowych 8/20  $\mu$ s [15]

### Udar napięciowy 10/700 $\mu$ s

Norma PN-EN 61643-21:2004 [11] proponuje do badań urządzeń w sieciach telekomunikacyjnych i sygnalizacyjnych m.in. udar napięciowy 10/700  $\mu$ s. Artykuł przedstawia wyniki pomiarów i modelowania odgromników gazowych oraz wybranego układu ochrony przepięciowej obwodów torowych.

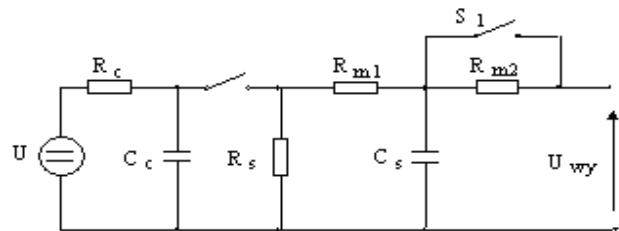
Schemat generatora udaru 10/700  $\mu$ s (rys. 3) zawiera:  $U$  - źródło napięcia,  $R_c$  - rezystor ładujący,  $C_c$  - kondensator gromadzący energię (20  $\mu$ F),  $R_s$  - rezystor kształtujący czas trwania impulsu (50  $\Omega$ ),  $R_m$  - rezystory dopasowujące ( $R_{m1} = 15 \Omega$ ;  $R_{m2} = 25 \Omega$ ),  $C_s$  - kondensator kształtujący czas narastania (0,2  $\mu$ F),  $S_1$  - wyłącznik (zamykany, gdy używane są zewnętrzne rezystory dopasowujące) [12].

Pomiary wykonano stosując: generator udarowy Haefely PC6-288.1 i filtr Haefely FP 20/3-3.2. Rejestrację napięć udarów oraz na wyjściu i wejściu ochronnika (lub elementu) przeprowadzano przy pomocy 4-kanalowego oscyloskopu cyfrowego LeCroy LS-140, umożliwiającego rejestrację przebiegów w paśmie częstotliwości do 100MHz, z dokładnością podstawy czasu 0,01%. Oscyloskop zasilono poprzez transformator separujący typu Tma 630S. Do pomiarów zastosowano sondę LeCroy 6 kV, 50 M $\Omega$ , 1000:1. Wkładka PHV 9 miała założoną zatyczkę na 25  $\Omega$ . Pomiary prądu wykonano stosując bocznik ( $R=20m\Omega\pm 1\%$ ).

Dla sprawdzenia powtarzalności wykonano rejestrację dwudziestu pięciu wymuszeń udaru napięciowego 10/700  $\mu$ s. Rejestrowane wartości maksymalne wynosiły:

- wartość średnia 1089V,
- odchylenie standardowe 3,2 V,

- wartość maksymalna  $\Delta U_{max} = 1092,8 V$ ,
- wartość minimalna  $\Delta U_{min} = 1086,4 V$ .



Rys. 3. Schemat układu generatora impulsowego 10/700  $\mu$ s [12]

Różnice pomiędzy maksymalnymi wartościami mierzonymi na generatorze a maksymalną wartością średnią mieściły się w granicach 1%. W świetle uzyskanych wyników, a szczególnie niskich wartości odchylenia standardowego na poziomie 0,3% uznano powtarzalność warunków badań napięć udaru 10/700  $\mu$ s. Parametry udaru napięciowego 10/700  $\mu$ s określono wzorem:

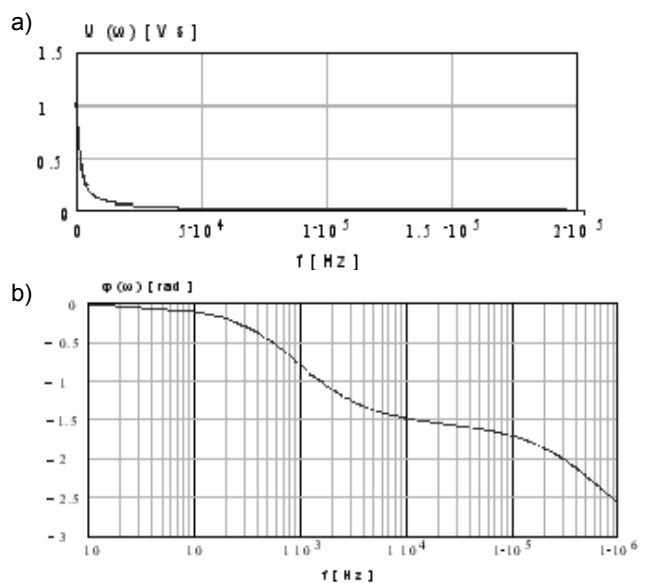
$$(4) \quad u(t) = 0,10113 U_m [\exp(-0,10068 \times 10^4 t) - \exp(-0,64766 \times 10^6 t)]$$

Obwody torowe urządzeń srk są obwodami małej mocy (10–30VA) zasilanymi napięciem przemiennym o częstotliwościach: 50 Hz, 1,5 kHz – 36 kHz [21].

Szerokość spektrum częstotliwościowego udaru napięciowego ogranicza zastosowanie klasycznych, stosowanych w elektrotechnice, metod rozwiązywania obwodów elektrycznych. Do uzyskania analitycznej postaci odpowiedzi  $w(t)$  ochronnika (SPD) na wymuszenie tego typu poprzez splot  $w(t) = F^{-1}(u(j\omega)) = F^{-1}(Z(j\omega) \times I(j\omega))$ , niezbędne byłoby określenie szerokopasmowej transmitancji ochronnika. Przyjmując dane liczbowe podane we wzorze (1) otrzymuje się dla charakterystyki częstotliwościowego udaru napięciowego 10/700  $\mu$ s postać:

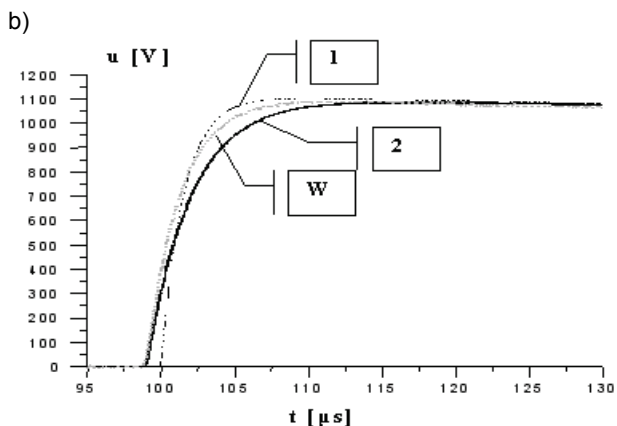
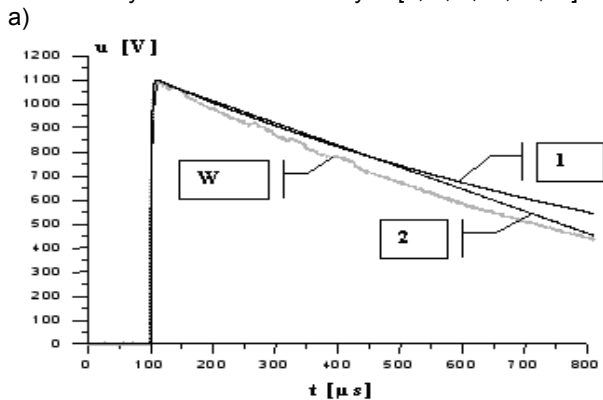
$$(5) \quad U(j\omega) = 0,10113 U_m \left( \frac{1}{0,10068 \times 10^4 + j\omega} - \frac{1}{0,64766 \times 10^6 + j\omega} \right)$$

Charakterystyki częstotliwościowe udaru przy  $U_m = 1 kV$  przedstawiono na rysunku 5.



Rys. 5. Charakterystyki częstotliwościowe udaru 10/700  $\mu$ s: a) amplitudowa; b) fazowa

Brak obligatoryjności stosowania norm w Polsce powinien zwiększać odpowiedzialność projektanta. W tym przypadku, celowe wydaje się zwiększenie poziomu odporności przy uwzględnieniu warunków pracy analizowanych układów ochronnych [1, 2, 3,12,14,18].



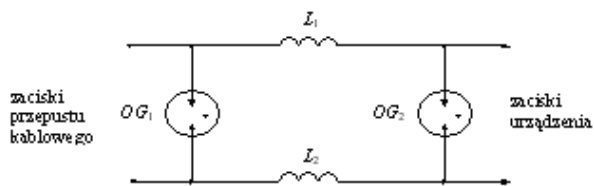
Rys. 7. Udar napięciowy 10/700  $\mu$ s dla  $U_m = 1,1$  kV: a) 1 - wyznaczony dla parametrów generatora udarów – wg rys 3; 2 - wyznaczony z zależności (4); W- otrzymany z pomiaru, b) początkowy fragment przebiegu

### Wybór programu

W literaturze można znaleźć modele odgromników gazowych proponowane m. in. w programie EMTP-ATP i PSPICE [19,20]. Do analizy wybrano program PSPICE, dający możliwość nierównomiernego próbkowania – bardzo gęsto dla przebiegów szybko zmiennych i rzadko dla stanów ustalonych. Zbieżność obliczeń skoordynowana jest według algorytmu Newton'a Raphson'a.

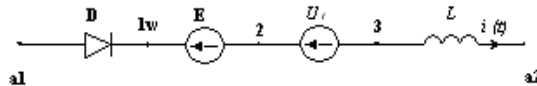
### Modelowanie elementów składowych i wybranego do analizy ochronnika

Przedstawiony układ ochronny (rys. 8), stosowany do elementów SOT, zawiera dwa odgromniki:  $OG_1$  - na napięcie 230 V i  $OG_2$  -145 V oraz dwa dławiki 2  $\mu$ H [17]. Metody badań i pomiarów odgromników gazowych określa norma PN-EN 61643-311:2004 [21].



Rys. 8. Schemat ochronnika stosowanego w urządzeniach srk uszynianych od strony toru: OG – odgromnik gazowy [17]

W celu uwzględnienia zjawisk zachodzących w odgromniku gazowym, wprowadzono model przerwy iskrowej z zastosowaniem funkcji LIMIT (X, Xmin, Xmax) oraz parametrów odgromnika gazowego: statycznego napięcia zapłonu ( $V_{zs}$ ) i napięcia łuku ( $V_{arc}$ ). Równoległe do modelu przerwy iskrowej dołączono źródło G (w programie PSPICE - źródło prądu sterowane napięciowo) oraz kondensator.

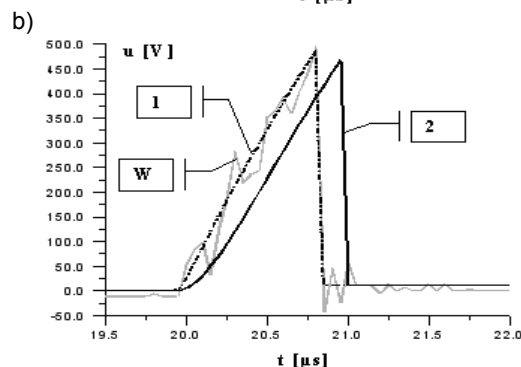
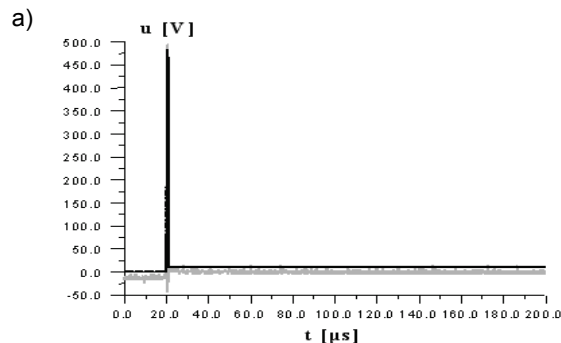


Rys. 9. Model odgromnika gazowego w programie PSPICE [23]

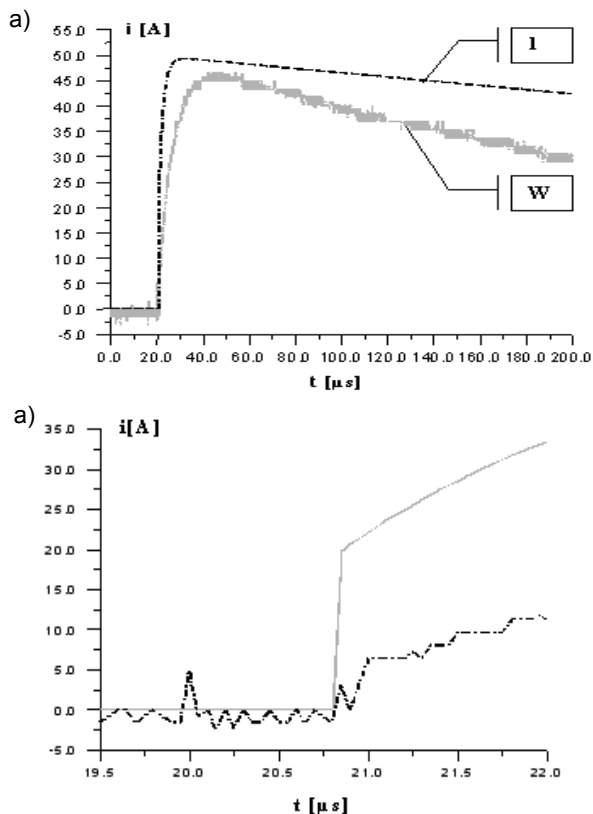
W układzie zastosowano dławiki powietrzne dobrane w taki sposób, aby ich parametry nie wpływały na pracę obwodów torowych. Najczęściej stosowany model dławika stanowi szeregowe połączenie rezystancji i indukcyjności. Może on być uzupełniony o równoległe dołączoną pojemność pasożytniczą (wyprowadzeń i między uzwojeniami) [24]. Do obliczeń przyjęto wartość indukcyjności dławika równą 2 $\mu$ H, rezystancji 33 m $\Omega$ , pojemności 1pF [17].

W celu weryfikacji poprawności symulacji pracy ochronnika, wyniki modelowania porównano z pomiarami i z danymi katalogowymi zastosowanych elementów. Przebiegi napięć oceniano w dwóch zakresach czasów tj. dla wybranego okna czasowego  $T$ . Analizowane przedziały czasowe oraz ich liczbę wybrano arbitralnie, stąd skwantyzacja osi czasu w analizach wynosiła 0,02  $\mu$ s dla napięcia na odgromnikach gazowych.

Przedstawione przebiegi modelowe (rys. 10 i 11) potwierdzają, że granica czasowa modelowania przebiegów przejściowych dla odgromników gazowych nie przekracza ok. 10  $\mu$ s od przyłożenia udaru. Uzyskane przebiegi napięć są zgodne z wynikami pomiarów.



Rys. 10. Przebieg napięcia obniżonego: a) na badanym odgromniku gazowym  $OG_1$  (230V) dla wymuszenia 1kV: a) linie: W- napięcie z pomiaru, 1- napięcie dla źródła g1 ( $U_{zs}=490$ V i  $R_c=0,001\Omega$ ), 2- napięcie dla źródła g1 ( $U_{zs}=490$ V i  $R_c=0,01\Omega$ ); b) początkowy fragment przebiegów, linie: W - napięcie z pomiaru, 1 - otrzymane w wyniku modelowania



Rys. 11. Przebieg prądu dla odgromnika gazowego OG<sub>1</sub> (230V) przy wymuszeniu 1kV: a): linie: W – prąd z pomiaru, 1 – prąd dla źródła g1 ( $U_{ZS} = 490V$ ); b) początkowy fragment przebiegów

## Podsumowanie

Analizowane modele wybranego ochronnika pozwalają na łączenie ich w bardziej złożone schematy, ułatwiając tym samym skomplikowaną i żmudną analizę. Jest zatem celowe uściślenie modeli tego typu układów.

Wykonywane obliczenia potwierdzają przyjazność obsługi oraz szerokie możliwości analizy obwodów elektrycznych w programie PSPICE.

Otrzymane wyniki i rozpoznane możliwości programu PSPICE zostaną wykorzystane do dalszych prac oraz analizy porównawczej z wynikami uzyskanymi z przeprowadzonych badań.

*Autorka składa serdeczne podziękowanie Laboratorium Automatyki i Telekomunikacji w Centrum Naukowo-Technicznym Kolejnictwa w Warszawie za umożliwienie wykonania badań oraz Zakładowi Przeształtników Mocy przy Instytucie Elektrotechniki w Warszawie za użyczenie bocznika.*

## LITERATURA

- [1] Białoń A., Ustalenie dopuszczalnych parametrów zakłóceń od prądu trakcyjnego w obwodach torowych stosowanych na PKP. *Praca CNTK 3195/20*, Warszawa, (1982)
- [2] Laskowski M., Kulawiak A., Ochrona przeciwprzebieciowa i przeciwporażeniowa w urządzeniach srk z elementami elektronicznymi, *Praca CNTK, 1002/24*, Warszawa (1994)
- [3] Laskowski M., Małesa R., Wróbel Z. i inni, Określenie istniejących poziomów zakłóceń elektromagnetycznych w ruchomych i stacjonarnych obiektach kolejowych, *Praca CNTK (Zakład Telekomunikacji)*, 1049/24, Warszawa, (1997)
- [4] Wróbel Z., Wyderka S., Możliwości symulacji działania ochronników ZnO w wybranych programach komputerowych,

- IX Symposium Problemy Eksploatacji Układów Izolacyjnych Wysokiego Napięcia, (2003), 232-235
- [5] Wróbel Z., The modeling of the overvoltage protection of lightning arresters applied in the railway control feed system (rtc), *6<sup>th</sup> International Conference „Modern Electric Traction in Integrated XXI st Century Europe”*, (2003), 236-241
- [6] Wróbel Z., Modelowanie układów ochrony przepięciowej dla obwodów torowych stosowanych na PKP, *Przegląd Elektrotechniczny Konferencje, Jubileuszowe X Sympozjum Problemy Eksploatacji Układów Izolacyjnych Wysokiego Napięcia*, (2005), 294-297
- [7] Wróbel Z., Analiza możliwości modelowania układów ochrony przepięciowej dla obwodów torowych w wybranych programach komputerowych, *7<sup>th</sup> International Conference „Modern Electric Traction in Integrated XXI st Century Europe”*, (2005), 13-18
- [8] Frankiewicz W., Wróbel Z., Możliwości badań i modelowania wytrzymałości udarowej urządzeń sterowania ruchem kolejowym i telekomunikacyjnych *XII Ogólnopolska Konferencja Naukowa Trakcji Elektrycznej, IV Szkoła Kompatybilności Elektromagnetycznej w Transporcie*, (2006), 447-457
- [9] Laskowski M.; Wróbel Z., Wpływ impulsowych zaburzeń elektromagnetycznych na obwody torowe, *VIII Konferencja Naukowa Trakcji Elektrycznej, SEMTRAK'98*, Zakopane, (1998), 319-326
- [10] Wróbel Z., Ziemia R., Zastosowanie wybranych programów komputerowych w analizie zagrożeń przepięciowych urządzeń sterownia ruchem kolejowym, *XII Ogólnopolska Konferencja Naukowa Trakcji Elektrycznej, IV Szkoła Kompatybilności Elektromagnetycznej w Transporcie, październik* (2006), część 1: 409-415, część 2: 415-425
- [11] 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.
- [12] PN-EN 61000-4-5, (1998), Kompatybilność elektromagnetyczna (EMC). Metody badań i pomiarów. Badania odporności na udary
- [13] PN-IEC 61643-11:2003- Niskonapięciowe urządzenia ograniczające przepięcia. Część 11: Urządzenia do ograniczania przepięć w sieciach rozdzielczych niskiego napięcia. Wymagania i próby
- [14] Sowa A., Kompleksowa ochrona odgromowa i przepięciowa, *Biblioteka COSiW, SEP*, Warszawa, (2005), 203-205
- [15] Graciet M., Pinel J., Composants spécifiques de protection contre les perturbations, *Thomson-CSF, D 1701-11-D 1701-13*
- [16] Wyrażanie niepewności pomiaru. Przewodnik, *Główny Urząd Miar, ISO* (1995)
- [17] Dokumentacja Techniczno-ruchowa, SOT-1. Liniowe bezzłączowe obwody torowe, *Bombardier Transpotration (ZWUS) Polska Sp. z o.o.* ©
- [18] PN-EN50121-4, 2002(U), Zastosowania kolejowe. Kompatybilność elektromagnetyczna Część 4, Emisja i odporność na zakłócenia urządzeń sygnalizacji i telekomunikacji
- [19] Larsson A., Tang H., Scuka V., Mathematical simulation of a gas discharge protector using ATP-EMTP, *Int. Symp. on EMC, Roma*, (1996), pp. 315-320
- [20] Borgeest K. Hasegorg J.L., A gas arrester SPICE model considering the voltage/time characteristics, *EMC, Rzym* (1994), 776-7818
- [21] PN-IEC 61643-311:2003- Elementy do niskonapięciowych urządzeń ograniczających przepięcia. Część 311: Wymagania dla iskerników gazowych
- [22] Standard-Buton 5 kA/ 5A, Katalog firmy Siemens
- [23] Surge Arresters, Katalog firmy CP Clare, 220
- [24] Hasse L. i in., Zakłócenia w aparaturze elektronicznej *Radioelektronik, Warszawa*, (1995), 109-113

**Autorka:** dr inż. Zofia Wróbel, PKP Polskie Linie Kolejowe S.A. Zakład Linii Kolejowych w Rzeszowie, ul. St. Batorego 24, 35-005 Rzeszów, E-mail: [zwrobel@prz.rzeszow.pl](mailto:zwrobel@prz.rzeszow.pl)