



Zofia WRÓBEL

PKP PLK S.A., Zakład Linii Kolejowych w Rzeszowie

## Modelowanie układów ochrony przepięciowej dla obwodów torowych stosowanych na PKP

**Streszczenie.** Podjęto próbę oceny modelu ochronnika niskiego napięcia zawierającego odgromniki gazowane oraz używanych do symulacji działania programów komputerowych. Wykonano badania laboratoryjne wybranych ochronników oraz symulacje w programie PSPICE odpowiedzi wybranych modeli ochronników na udary napięciowo-prądowe. Przeprowadzono analizę otrzymanych wyników, uwzględniając w niej rezultaty estymacji parametrów schematu zastępczego zastosowanego do badań generatora.

**Abstract.** (The modelling of the surge protection sets used in PKP track circuits). A trial was taken of evaluation of models of low-voltage protector including gas arresters and examination of computer programs used for simulation of their performance. Laboratory investigations selected arresters and simulations in PSPICE program of answers of selected arrester models to voltage-current surges were done. Analysis of obtained results was conducted taking into account the estimation effects of scheme parameters of used generator.

**Słowa kluczowe:** odgromniki gazowane, modelowanie cyfrowe, symulacja.

**Keywords:** gas arresters, numerical modelling, simulation.

### Wstęp

Rozmieszczenie elektronicznych urządzeń sterowania ruchem kolejowym na dużej powierzchni wymaga ze względów funkcjonalnych licznych i długich linii zasilających oraz transmisyjnych. Sprzyja to powstawaniu rozległych pętli, w których w wyniku działania impulsowego pola elektromagnetycznego, mogą indukować przepięcia się o znaczących amplitudach [1, 2]. Na szczególną uwagę zasługują obwody torowe znajdujące się nie tylko na terenie stacji, ale także na szlaku kolejowym.

Najczęstsze uszkodzenia obwodów torowych w wyniku wyładowań atmosferycznych mają miejsce od strony wyjść nadajników i wejść odbiorników bezzłączowych obwodów torowych i elektronicznych obwodów nakładanych, które są galwanicznie połączone z tokami szynowymi.

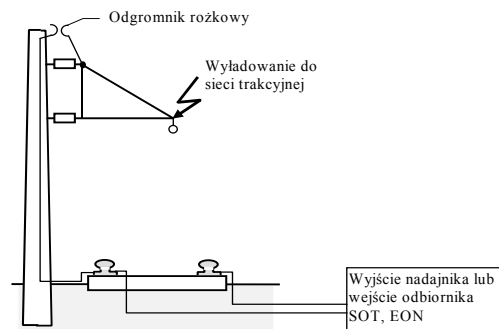
W pracach CNTK (Centrum Naukowo-Techniczne Kolejnictwa) [2,3] zalecono stosowanie w urządzeniach SRK własnych systemów ochrony urządzeń zainstalowanych na terenie PKP oraz wyposażenie nowo-instalowanych urządzeń w układy ochronne. Wynikła stąd potrzeba montowania układów zabezpieczających oraz właściwego ich doboru.

Ważnym zagadnieniem na tym etapie są prace projektowo-badawcze, w których symulacje komputerowe zyskują coraz większe uznanie. Bardzo pomocne w tego rodzaju analizach są języki oprogramowania wysokiego poziomu (SES, NEC) [4, 5] oraz standardowe programy obliczeniowe (EMTP-ATP, PSPICE) [6, 7]. Pozwalają one na symulacje rzeczywistych elementów układu i dobór odpowiednich zabezpieczeń. Analizy porównawcze dają możliwość oceny różnic pomiędzy rzeczywistymi elementami i ich modelami matematycznymi oraz właściwego doboru parametrów.

### Warunki pracy bezzłączowych obwodów torowych

Obwody torowe urządzeń SRK (rys. 1) są obwodami małej mocy (10 – 30 VA) zasilanymi napięciem przemianym o częstotliwościach: 50 Hz, 1,5 kHz – 36 kHz [8]. Szyny toru kolejowego stanowią jednocześnie trakcyjną sieć powrotną. Sieć powrotna prócz odprowadzania prądów powrotnych do podstacji powinna zapewniać wyłączalność zwarc w sieci trakcyjnej oraz ochronę przeciwporażeniową, a jednocześnie ograniczać upływ prądów błądzących [1, 2].

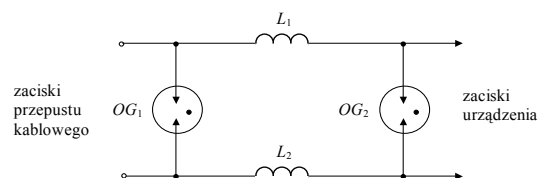
Specyficzne warunki pracy urządzeń SRK wymagają doboru odpowiednich układów i systemów ochrony przepięciowej, dzięki którym można uniknąć lub znacznie ograniczyć szkody wywołane przez wyładowania atmosferyczne oraz różnego rodzaju przepięcia [3].



Rys.1. Schemat połączeń obwodu torowego [9]

### Wymagane poziomy ochrony urządzeń i środki zaradcze

Analizując warunki pracy obwodów torowych, przyjęto stosowanie ochrony przepięciowej tych urządzeń dla wartości szczytowych przepięć i przetężeń analogicznie, jak w napowietrznych liniach telekomunikacyjnych 2kV [10, 11, 12]. 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 [10, 11].



Rys. 2. Schemat ochronnika stosowanego w uszynianych urządzeniach SRK od strony toru: OG – odgromnik gazowany © [8]

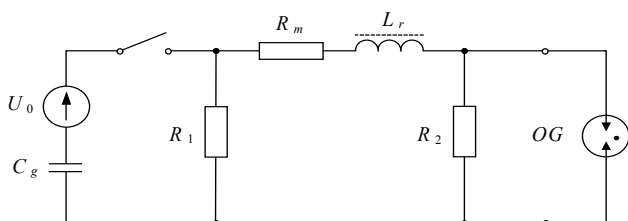
Brak obligatoryjności stosowania norm w Polsce może być z jednej strony większym zobowiązaniem dla projektanta, z drugiej strony może dawać okazję do nie zawsze uczciwych działań [13]. W tym przypadku, celowe wydaje się zwiększenie poziomu odporności przy uwzględnieniu warunków pracy analizowanych układów ochronnych [1, 2, 3, 10, 11, 14].

Przedstawiony układ ochronny © (rys. 2), stosowany do elementów SOT, zawiera dwa odgromniki: OG<sub>1</sub>-na napięcie 230 V i OG<sub>2</sub>-145 V oraz dwa dławiki 2 μH [8].

W momencie powstania wylądowania 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.

### Układ pomiarowy

Schemat stosowanego do badań generatora udarów kombinowanych przedstawiono na rysunku 3. Rejestrację przebiegów przeprowadzono w paśmie częstotliwości do 100 MHz (format PSPICE). Pomiar prądu wykonano bocznikiem (R = 20 mΩ ± 1%). Oscyloskop zasilano poprzez transformator separujący. Do pomiarów zastosowano sondę 6 kV, 50 MΩ, pozwalającą zapisywać wyniki w skali 1000:1. Błąd pomiaru napięcia sondą był nie większy niż ± 0,1 % dla napięcia stałego i ± 2 % dla napięcia przemienneo o częstotliwości do 100 MHz.



Rys. 3. Uproszczony schemat obwodu generatora udarów kombinowanych:  $U_0$  – źródło wysokiego napięcia,  $C_g$  – pojemność generatora;  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_m$ ,  $L_r$  – rezystancje i indukcyjność kształtujące udar; OG – badany odgromnik [10, 11]

Estymację parametrów schematu zastępczego użytego do badań generatora (rys. 3) przeprowadzono w programie Mathematica 4, stosując metodę Levenberga–Marquardta i Gaussa-Newtona. Uzyskane wyniki przedstawiono w tabeli 1.

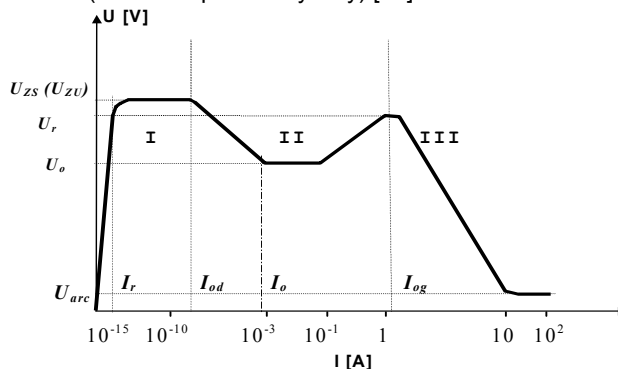
Tabela 1. Wartości parametrów schematu zastępczego generatora z rysunku 3 wyznaczone w programie Mathematica 4 oraz ich wartości montażowe

Parametr	Jednostka	Wartość oczekiwana	Wartość montażowa	95% przedział ufności wartości oczekiwanej
$C_g$	μF	12,25	12	11,95 ÷ 12,54
$L_r$	μH	22,7	20	20,10 ÷ 25,28
$R_m$	Ω	0,61	0,8	0,24 ÷ 0,98
$R_1$	Ω	6,81	15	6,807 ÷ 6,813
$R_2$	Ω	25,0	25	24,99 ÷ 25,01

Wartości montażowe (tabela 1) są to znamionowe parametry elementów generatora, podane w jego dokumentacji technicznej, wyznaczone w warunkach quasiustalonych, tj. przy napięciu stałym lub napięciu o częstotliwości przemysłowej. Prawdopodobnie przeprowadzenia procesu estymacji potwierdzają mało znaczące różnice pomiędzy wartościami montażowymi i obliczonymi.

### Zasada działania odgromnika gazowanego

Zasadę działania odgromnika gazowanego przedstawiono schematycznie w postaci charakterystyki  $I(U)$  (rys.4) przy założeniu niewielkiej szybkości wzrostu napięcia 100 V/s (warunek quasi-statyczny) [15].



Rys. 4. Odgromnik gazowany: charakterystyka  $U(I)$  [15]

Powyższą charakterystykę należy interpretować w ujęciu jakościowym. W pierwszej strefie, przy statycznym napięciu zapłonu  $U_{ZS}$ , częstotliwości 50 Hz i napięciu udarowym  $U_{ZU}$  (przy udarze) prąd narasta niezależnie od warunków zewnętrznych (zjawisko lawinowe). Następnie, napięcie osiąga wartość napięcia obniżonego  $U_o$  (począwszy od zakresu prądu wylądowczego dolnego  $I_{od}$ ), które utrzymuje się dopóki wartość prądu jest niższa od górnej wartości prądu wylądowczego górnego  $I_{og}$  (strefa II). Od tej wartości obserwuje się przejście (strefa III) do stanu utrzymania łuku przy napięciu  $U_{arc}$ .

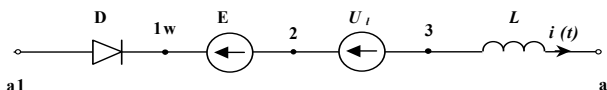
Wartość napięcia zapłonu  $U_{ZS}$ , zależy od dynamiki narażenia napięciowego i przy stromości wyższej niż 100 V/s wyróżnia się napięcie dynamiczne zapłonu  $U_{ZD}$  (tzw. ząbek napięciowy). Wartość statycznego napięcia zapłonu  $U_{ZS}$  można oszacować na poziomie około 40% napięcia  $U_{ZD}$ , w zależności od szybkości narastania natury samego zjawiska lawinowego [15, 16, 17, 18].

### Wybór programu

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

### Model odgromnika gazowanego

W celu uwzględnienia zjawisk zachodzących w odgromniku gazowanym, wprowadzono model przerwy iskrowej z zastosowaniem funkcji LIMIT (X, Xmin, Xmax) [20]. Równolegle do modelu przerwy iskrowej, pomiędzy zaciski a1 i a2, dołączono źródło G (w programie PSPICE - źródło prądu sterowane napięciowo) oraz kondensator [7].



Rys. 5. Model odgromnika gazowanego w programie PSPICE [20]

Poniżej przedstawiono zapis modelu odgromnika gazowanego OG<sub>2</sub> (145 V) w programie PSPICE [21, 22]. Model źródła G (odga2) wprowadzono w postaci tabeli. Liczby w niej zawarte są wartościami napięć i prądów przyjętymi do obliczeń dla przedstawionych w końcowej części artykułu przebiegów napięć i prądów. Dodatkowo

przedstawiono zapis wartości napięć i prądów dla modelu źródła G odgromnika OG<sub>1</sub> (230 V). (Znak \* na początku linii programu informuje, że linia ta nie jest uwzględniana w analizie).

```
.subckt piskr1 a1 a2 PARAMS:
* .func odga1(x) {Table(x,0,0,100,10E-15,200,10E-14,230,10E-
*+13,230,10E-9,230,10e-7,100,10e-5,130,10e-3,160,.01,110,.1,
*+10,0,10,1E+10)} (ODG1)
.func odga2(x) {Table(x,0,0,80,10E-15,110,10E-14,145,10E-13,
+145,10E-9,145,10e-7,30,10e-5,40,10e-3,80,.01,35,.1,15,0,15,
+15,1E+10)} *(ODG2)
+ Vz=430
+ Ihold=.1,
+ Varc=15,
+ Ls=1n
D a1 1w DMOD
E 1w 2 VALUE={LIMIT(V(a1,a2)-1E5*LIMIT(I(V)-
Ihold,0,I(V)) ,0,Vz-Varc)}
V 2 3 DC {Varc}
L 3 a2 {Ls}
.MODEL DMOD D
.ENDS piskr1
xpi1 a1 0 piskr1
G1 a1 0 value={g1(V(a1,0))}
Cw1 a1 0 1.pF
```

### Model dławika

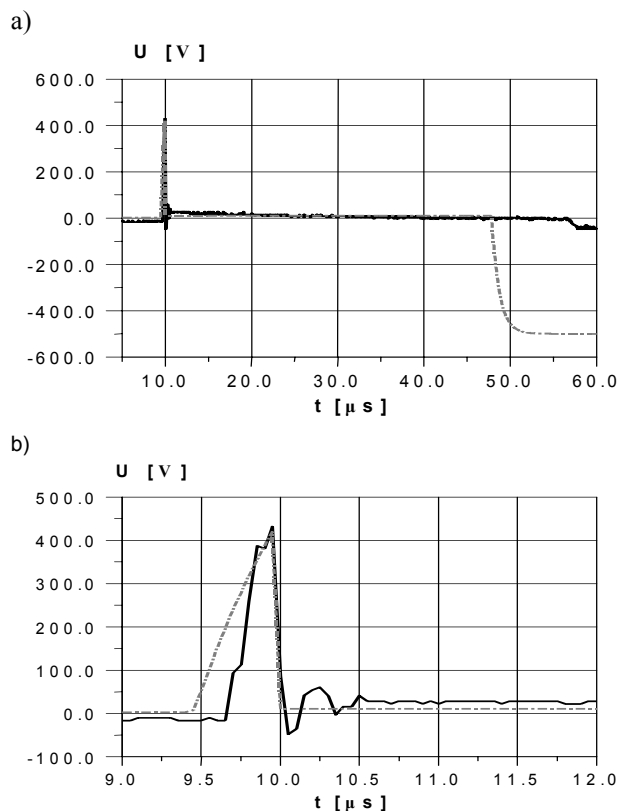
W układzie zastosowano dławiki powietrzne dobrane w taki sposób, aby ich parametry nie wpływały na pracę obwodów torowych. Najczęściej stosowany model dławika stanowi szeregowe połączenie rezystancji i indukcyjności. Może on być uzupełniony o równoległe dołączoną pojemność pasożytniczą (wyprowadzeń i między uzwojeniami) [23]. Do obliczeń przyjęto wartość indukcyjności dławika równą 2  $\mu\text{H}$ , rezystancji 33  $\text{m}\Omega$ , pojemności 1  $\text{pF}$  [8].

### Porównanie wyników modelowania i pomiarów

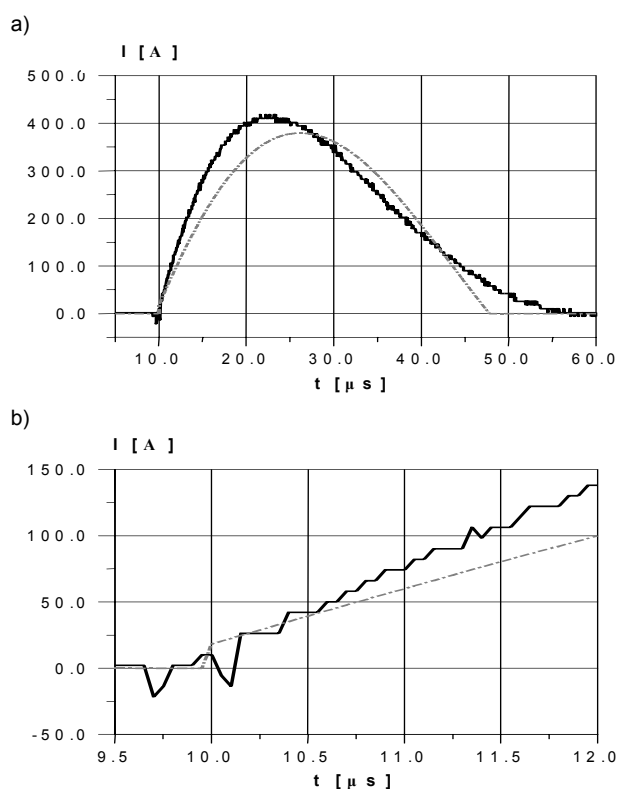
W celu sprawdzenia poprawności symulacji pracy ochronnika, wyniki modelowania porównano z pomiarami i z danymi katalogowymi zastosowanych elementów. Przebiegi napięć oceniano w dwóch zakresach czasów tj. dla wybranego okna czasowego T oraz przy pominięciu tych fragmentów, dla których wartości różnic napięć i prądów zmieniają się skokowo. Analizowane przedziały czasowe oraz ilość przedziałów wybrano arbitralnie, stąd kwantyzacja osi czasu w analizach wynosi 0,05  $\mu\text{s}$  dla napięcia na odgromnikach gazowanych. Przedstawione przebiegi potwierdzają, że granica modelowania adekwatnych przebiegów przejściowych dla odgromników gazowanych nie przekracza ok. 40  $\mu\text{s}$  po przyłożeniu udaru. Do 40  $\mu\text{s}$ , po doprowadzeniu udaru, przebiegi napięć są zgodne z napięciem z pomiarów. O niedoskonałości modelu odgromnika gazowanego dla procesów obliczeniowych świadczy to, że obliczenia powyżej 50  $\mu\text{s}$  znacząco różnią się z pomiarami. Jednak o skuteczności działania decyduje początkowych 10  $\mu\text{s}$ .

### Podsumowanie

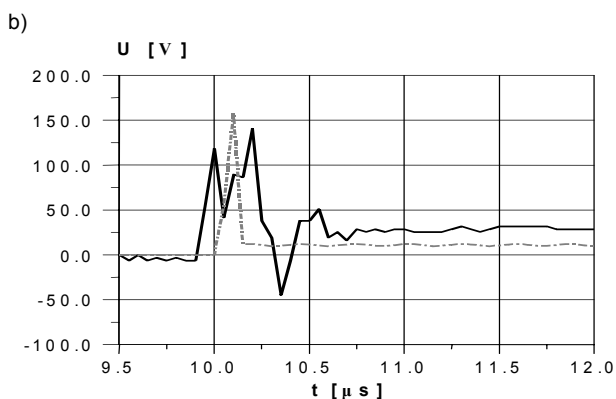
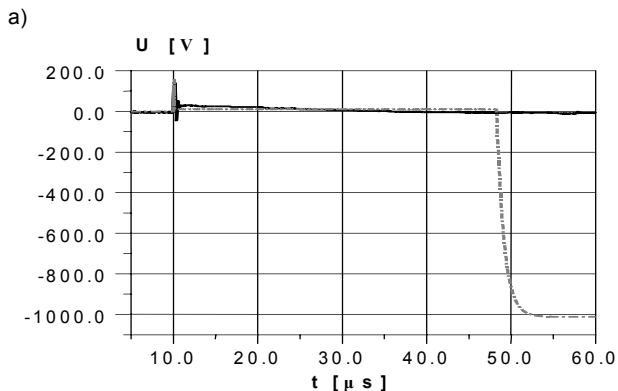
W toku wykonywanych obliczeń potwierdzono dogodną obsługę oraz szerokie możliwości projektowania obwodów elektrycznych w programie PSPICE. Utworzone modele pozwalają na łączenie ich w bardziej złożone schematy, ułatwiając tym samym skomplikowaną i żmudną analizę. Jest zatem celowe uściślanie modeli tego typu układów. Otrzymane wyniki i rozeznane możliwości programu PSPICE zostaną wykorzystane do dalszych prac oraz analizy porównawczej z wynikami uzyskanymi z przeprowadzonych badań.



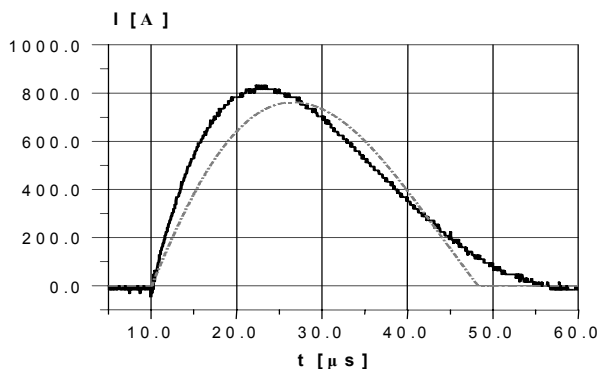
Rys. 6. Przebieg napięcia obniżonego na badanym odgromniku gazowanym OG<sub>2</sub> (145 V) dla wymuszenia 1 kV: a) linia ciągła - napięcie z pomiaru, linia przerywana - napięcie dla źródła g1 ( $U_{zs} = 430 \text{ V}$ ), b) Początkowy fragment przebiegów



Rys. 7. Przebieg prądu na badanym odgromniku gazowanym OG<sub>2</sub> (145 V) dla wymuszenia 1kV: a) linia ciągła - prąd z pomiaru, linia przerywana - prąd dla źródła g1 ( $U_{zs} = 430 \text{ V}$ ), b) początkowy fragment przebiegów



Rys. 8. Przebieg napięcia obniżonego na badanym modelu ochronnika (z rys. 2) dla wymuszenia 2k: a) linia ciągła - napięcie z pomiaru, linia przerywana- wynik symulacji, b) początkowy fragment przebiegów



Rys. 9. Przebieg prądu dla wymuszenia 2 kV a) linia ciągła – prąd z pomiaru, linia przerywana - wynik symulacji

#### 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 przeciwprzebiegowa i przeciwporażeniowa w urządzeniach SRK z elementami elektronicznymi, *Praca CNTK, 1002/24*, Warszawa (1994)
- [3] Laskowski M., Malesa 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] FFTSES User's Manual: Fast Fourier Transforms, *Safe Engineering Services & Technologies Ltd*, Montreal, Canada, (1997)
- [5] NEC-Win Professional, Antenna Analysis Software, Version 1.1; NEC-Win Pro User's Manual, NEC-Win Basic Data Entry Manual, NEC Code Data Entry Manual, *Nittany Scientific, Inc.*, (1997)
- [6] Alternative Transients Program Rule Book, *KU Leuven EMTF Center*, Leuven (1987)
- [7] Izydorczyk J., Pspice Komputerowa symulacja układów elektronicznych Helion, (1993)
- [8] Dokumentacja Techniczno-ruchowa, SOT-1. Liniowe bezzłączowe obwody torowe, *Bombardier Transportation (ZWUS) Polska Sp. z o.o.* ©
- [9] Laskowski M.; Wróbel Z., Wpływ impulsowych zaburzeń elektromagnetycznych na obwody torowe, *VIII Konferencja Naukowa Trakcji Elektrycznej, SEMTRAK'98*, Zakopane, (1998), 319-326
- [10] PN-IEC 61643-1 (2000), Urządzenia ograniczające przepięcia w sieciach rozdzielczych niskiego napięcia. Wymagania techniczne i metody badań
- [11] PN-EN Kompatybilność elektromagnetyczna (EMC), PN-IEC 61000-4-5, (1998), Electromagnetic compatibility (EMC). Part 4. Testing and measurement techniques, Section 5, Surge immunity test, (IEC) 1000-4-5
- [12] Sowa A., Kompleksowa ochrona odgromowa i przepięciowa, *Biblioteka COSiW, SEP*, Warszawa, (2005), 203-205
- [13] Flisowski Z., Komunikat, *Biuletyn Techniczny Oddziału Krakowskiego Stowarzyszenia Elektryków Polskich*, kwiecień (2005), 27, 16-18
- [14] PN-EN50121-4, 2002(U), Zastosowania kolejowe. Kompatybilność elektromagnetyczna Część 4, Emisja i odporność na zakłócenia urządzeń sygnalizacji i telekomunikacji
- [15] Graciet M., Pinel J., Composants spécifiques de protection contre les perturbations, *Thomson-CSF*, D 1701-11-D 1701-13
- [16] Dras M., Odgromniki – zabezpieczenia urządzeń, *Elektronizacja*, (1992), 5, 6-10
- [17] Dras M., Odgromniki, Cz.1, *Radioelektronik Audio-Hi-Fi-Video*, (1993), 10, 41-43
- [18] Dras M., Odgromniki, Cz.2, *Radioelektronik Audio-Hi-Fi-Video*, (1993), 12, 20-cd42-44
- [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), 776-781
- [21] Standard-Buton 5 kA/ 5A, Katalog firmy Siemens
- [22] Surge Arresters, Katalog firmy CP Clare, 220
- [23] Hasse L., Karkowski Z., Spiralski L., Kołodziejki J., Konczakowska A., Zakłócenia w aparaturze elektronicznej *Radiotechnik Sp. Z o.o.*, Warszawa, (1995), 109-113

Autorka składa serdeczne podziękowanie Laboratorium Kompatybilności przy Zakładzie Telekomunikacji Centrum Naukowo-Technicznym Kolejnictwa w Warszawie za umożliwienie wykonania badań oraz Zakładowi Przekształtników Mocy przy Instytucie Elektrotechniki w Warszawie za użyczenie bocznika.

**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)