

Zofia WRÓBEL¹, Stanisław WYDERKA²

PKP, Zakład Linii Kolejowych w Rzeszowie (1), Politechnika Rzeszowska, Wydział Elektrotechniki i Informatyki (2)

Możliwości symulacji działania ochronników ZnO w wybranych programach komputerowych

Streszczenie. Podjęto próbę oceny stosowanych aktualnie modeli ochronników ZnO niskiego napięcia oraz używanych do symulacji ich działania programów komputerowych. Wykonano badania laboratoryjne wybranych ochronników oraz symulacje w programach PSPICE i ATP-EMTP 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. (Simulation possibility of performance of ZnO arresters in selected computer programs). A trial was taken of evaluation of actually applied models of low-voltage ZnO arresters and examination of computer programs used for simulation of their performance. Laboratory investigations of selected arresters and simulations in PSPICE and ATP-EMTP programs 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: ochronniki ZnO, modelowanie cyfrowe, symulacja.

Keywords: ZnO arresters, numerical modelling, simulation.

Wstęp

Symulacje komputerowe, których celem jest ocena skuteczności układów ochrony przeciwprzepięciowej urządzeń elektrycznych i elektronicznych, zyskują coraz większe znaczenie dając możliwość uwzględnienia wpływu różnych czynników przy jednoczesnym zminimalizowaniu kosztów badań [1,2]. Ważnymi, z punktu widzenia modelowania, elementami tych układów są ograniczniki przepięć, a wśród nich coraz częściej stosowane ochronniki (warystory) ZnO. Bardzo pomocne w badaniach symulacyjnych są języki programowania wysokiego poziomu (SES, NEC) [3,4] oraz standardowe pakiety obliczeniowe (PSPICE, ATP-EMTP) [5,6,7], umożliwiające weryfikację doboru ograniczników przepięć do układów ochronnych [8,9,10].

Układ pomiarowy

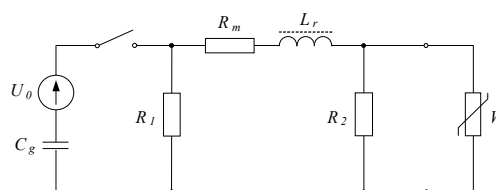
Badania laboratoryjne ochronników ZnO, których wyniki przedstawiono w dalszej części opracowania, przeprowadzono w Laboratorium Kompatybilności Zakładu Telekomunikacji przy Centrum Naukowo-Technicznym Kolejnictwa w Warszawie. Pomiar wykonano w układzie spełniającym wymagania norm [11,12]. Schemat tego układu przedstawiono na rysunku 1. Rejestrację przebiegów przeprowadzono w paśmie częstotliwości do 100 MHz (format PSPICE).

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 przemiennego o częstotliwości do 100 MHz.

Estymację parametrów schematu zastępczego użytego do badań generatora (rys. 1) przeprowadzono za pomocą programu Mathematica 4, stosując metodę Levenberg'a Marquardt'a i Gaussa-Newtona. Uzyskane wyniki przedstawiono w tabeli 1.

Wartości montażowe (tabela 1) są to znamionowe parametry elementów generatora, podane w jego dokumentacji technicznej, wyznaczone w warunkach quasi-stacjonarnych, tj. przy napięciu stałym lub napięciu o częstotliwości przemysłowej. O prawidłowym przeprowadzeniu procesu estymacji świadczy to, że

pomiędzy wartościami montażowymi i obliczonymi (wartości oczekiwane w tabeli 1) nie występują znaczące różnice.



Rys. 1. Uproszczony schemat obwodu generatora udarów kombinowanych [11]: U_0 – źródło wysokiego napięcia, C_g – pojemność generatora; R_1 , R_2 , R_m , L_r – rezystancje i indukcyjność kształtująca udar; W – badany ochronnik

Tabela 1. Wartości parametrów schematu zastępczego generatora z rysunku 2 wyznaczone w programie Mathematica 4 oraz ich wartości montażowe

Para- metr	Jedno- stka	Wartość oczeki- wana	Wartość monta- żowa	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

Modele ochronników ZnO

Warystory tlenkowe przewodząc prąd całą swoją objętością, posiadają dużą zdolność absorpcji energii oraz odporność na udary prądowe, a w określonym zakresie napięcia wykazują znaczną nieliniowość. W literaturze można znaleźć wiele różnych modeli ochronników ZnO, w tym większość to modele uwzględniające wpływ szybkości zmian doprowadzonego udaru na odpowiedź ochronnika, np. modele opisane w [13,14,15], czy model Durbaka [16].

Odwzorowanie charakterystyki warystora wyraża się zależnością:

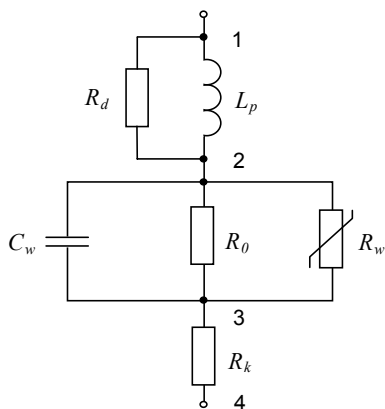
$$(1) \quad U = k I^\alpha$$

gdzie: k – stała zależna od rodzaju warystora ($k = U$ dla $I = 1$ kA), α – współczynnik nieliniowości charakterystyki.

Zależność ta jest tylko zgrubnym przybliżeniem charakterystyki ochronnika ZnO. W celu zmniejszenia błędów, można np. podzielić daną charakterystykę na kilka odcinków, z których każdy będzie opisany zależnością (1), ale o innych wartościach k i α . Inną, mniej dokładną, metodą zmniejszenia błędów jest przedstawienie charakterystyki ochronnika jako odcinkowo-liniowej.

Dla szybkozmiennych przebiegów przepięciowych element nieliniowy o charakterystyce (1) powinien być uzupełniony indukcyjnościami i pojemnościami wynikającymi z fizyko-chemicznych właściwości ochronnika i jego otoczenia. Proces dyfuzji (przejście elektronów z warstwy przypowierzchniowej ziaren ZnO do warstw izolujących) powoduje, że barierami przewodzenia stają się zubożone warstwy w ziarnach ZnO. W fazie przechodzenia warystora w stan przewodzenia, jego charakterystyka (dla przepięć szybkozmiennych) powinna uwzględniać prędkość wnikania i rozprzestrzeniania się elektronów w tych warstwach. Podczas wzrostu napięcia nasila się stopniowo zjawisko tunelowe oraz poszerza się obszar przewodzenia na granicy ziaren ZnO. W rezultacie, napięcie obniżone osiąga wartość maksymalną wcześniej, niż wymuszający je udar prądowy.

Dla badanych ochronników, ich producent proponuje model obliczeniowy [17] (rys. 2), który pozwala uwzględnić ich charakterystykę nieliniową, wymiary (C_w) oraz indukcyjność (L_p) przewodów łączących ochronnik z chronionym obiektem. Wpływ rezystancji R_w , R_o i R_k zależy od zakresu pracy ochronnika. Można przyjąć, że dla prądów poniżej 10^{-4} A: $R_w = \infty$, $R_k = 0$, w zakresie pracy w granicach $10^{-4} \div 10^3$ A: $R_o = \infty$, $R_k = 0$; natomiast przy prądach powyżej 10^3 A: $R_w = 0$.



Rys. 2. Model warystora ZnO przyjęty do symulacji w programie PSPICE (objaśnienia w tekście)

Granice pomiędzy wymienionymi zakresami pracy warystora nie są ostre i należy uwzględnić to w badaniach symulacyjnych. Zadaniem rezystancji R_d jest zwiększenie stabilności obliczeń numerycznych. Jej wartość wylicza się z zależności:

$$(2) \quad R_d = 2L_p / \Delta t$$

w której Δt [μ s] oznacza długość kroku całkowania. Do symulacji przyjmowano $R_d = 200 \Omega$.

Badania symulacyjne przeprowadzono dla ochronników ZnO o podanych niżej parametrach [17].

W1: $U_{ZN} = 430$ V; $I_{CL} = 200$ A; $U_{CL} = 670$ V; $C_w = 5200$ pF
 W2: $U_{ZN} = 390$ V; $I_{CL} = 100$ A; $U_{CL} = 610$ V; $C_w = 1400$ pF

gdzie:

- U_{ZN} – napięcie (znamionowe) ochronnika zmierzone przy przepływie prądu stałego 1 mA,
- I_{CL} – prąd szczytowy (wyładowczy znamionowy), dla którego zostało określone napięcie ochronne U_{CL} ,
- U_{CL} – napięcie obniżone (znamionowe obniżone); szczytowa wartość napięcia przy prądzie szczytowym I_{CL} ,
- C_w – pojemność warystora.

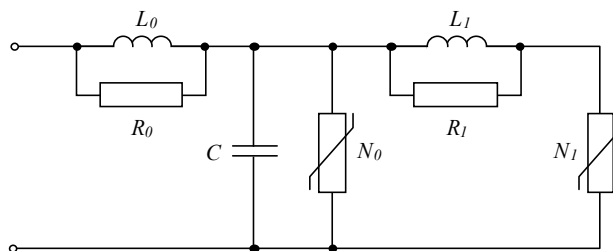
Ze względu na znaczne podobieństwo uzyskanych wyników badań, niżej przedstawiono tylko charakterystyki otrzymane dla warystora W2.

W programie PSPICE, model warystora (rys. 2), po wprowadzeniu określonych powyżej wartości, można zapisać następująco [7]:

```
*W2.lib
.func odga50(x){Table(x,0,0,326,10E-5,357,10E-4,390,
+10E-3,426,01,466,1,510,1,558,10,573,20,582,30,589,
+40,593,50,598,60,602,70,605,80,607,90,610,100,667,
+10E+3,730,10E+4,798,10E+5)}
Godga50 2 3 value={odga50(V(2,3))}
```

```
.inc W2.lib
vd2 1 1a 0
Lp 1a 2 .1uH
Rd 1 2 200Ω
Ro 2 3 30megΩ
Cw 2 3 1400pF
Rk 3 4 10E-6Ω
```

Innym modelem ochronnika stosowanym przy rozwiązywaniu zagadnień ochrony przeciwprzepięciowej jest model zaproponowany przez Durbaka [16]. Jest on oparty na odwzorowaniu charakterystyki dynamicznej warystora w postaci drabinki elementów nieliniowych oddzielonych dwójnikami RL . Układ ten wykazuje właściwości filtra dolnoprzepustowego. Zgodnie z [16], na rysunku 3 uwzględniono jedynie dwa człony modelu Durbaka z nieliniowymi rezystorami N_0 i N_1 , których charakterystyki, opracowane przez Grupę Roboczą 3.4.11 IEEE, przedstawiono na rysunku 4.



Rys. 3. Model ochronnika [16]: N_0 , N_1 – rezystancje nieliniowe, L_1 , R_1 – filtr rozdzielający, C – pojemność międzyzwojowa ochronnika, L_0 – indukcyjność własna ochronnika, R_0 – rezystancja stabilizująca całkowanie numeryczne

Wartości poszczególnych elementów modelu ochronnika (rys. 3) można wyliczyć w zależności od wysokości (grubości) ochronnika d [m] oraz liczby kolumn warystorów n ze wzorów:

$$(3) \quad R_0 = 100 \frac{d}{n} \quad [\Omega]$$

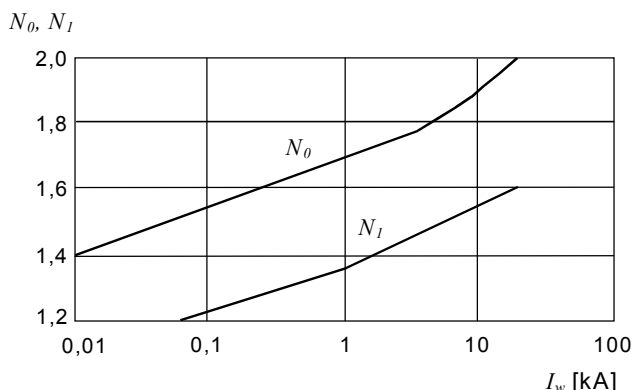
$$(4) \quad L_0 = 0,2 \frac{d}{n} \quad [\mu H]$$

$$(5) \quad C = 100 \frac{n}{d} \text{ [pF]}$$

$$(6) \quad R_I = 65 \frac{d}{n} \text{ [\Omega]}$$

$$(7) \quad L_I = 15 \frac{d}{n} \text{ [\mu H]}$$

Do obliczeń parametrów modelu ochronnika konieczna jest znajomość charakterystyk nieliniowych rezystancji N_0 i N_I . Przedstawiony model jest przeznaczony do opisywania charakterystyk ochronników ZnO wysokonapięciowych [16].



Rys. 4. Charakterystyki jednostkowe rezystancji nieliniowych N_0 i N_I modelu ochronnika [16]

Adaptacja modelu Durbaka do symulacji działania ochronników niskonapięciowych

Schemat elektryczny modelu ochronnika przyjęto bez zmian (rys. 3). Ze względu na znaczną niedogodność korzystania z charakterystyk jednostkowych elementów N_0 i N_I w postaci wykresu (rys. 4), skorzystano z zależności (8) aproksymującej te charakterystyki, zaproponowanej w [18] łącznie z wartościami współczynników (tabela 2).

$$(8) \quad U = k b^I I^c$$

Tabela 2. Wartości współczynników zależności (8) proponowane w [18]

Współczynniki	k	b	c
N_0	1,2968167	1,000005	0,0376332
N_I	0,9713959	1,000004	0,0510025

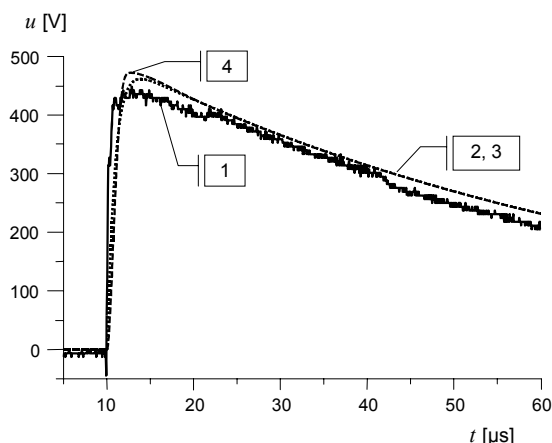
Na podstawie zależności (8) wyznaczono jednostkowe wartości napięcia obniżonego na elementach N_0 i N_I dla wartości prądu wyładowczego zawartych w zakresie od 10^{-5} do 10^4 A.

Charakterystyki elementów N_0 i N_I dla badanych ochronników ZnO, w postaci par bezwzględnych wartości prądu wyładowczego i napięcia obniżonego, wyznaczono zgodnie z procedurą proponowaną w [16] dla ochronników ZnO wysokonapięciowych. Polegało to na pomnożeniu zmodyfikowanego napięcia znamionowego obniżonego ochronnika przez wyznaczone wcześniej jego wartości jednostkowe dla danego elementu. Modyfikacja napięcia znamionowego obniżonego ochronnika polega na jego podzieleniu przez wartość jednostkową napięcia na elemencie N_I odpowiadającą znamionowemu prądowi wyładowczemu ochronnika, powiększoną o 3 %.

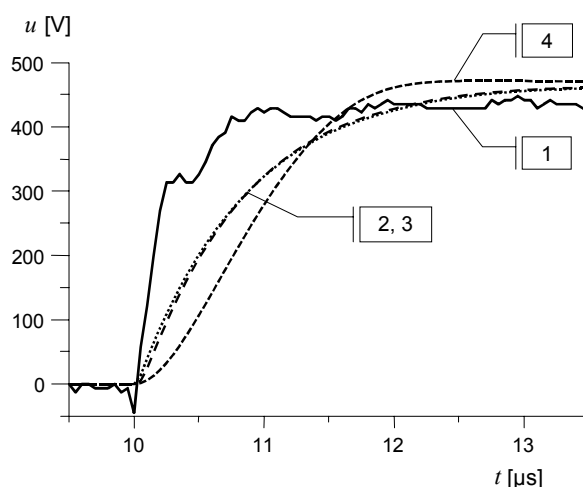
Wartości pozostałych elementów modeli badanych ochronników wyznaczono na podstawie zależności (3) do (7). Dla ochronnika W2 wynoszą one: $L_I = 0,09 \mu\text{H}$, $R_I = 0,39 \Omega$, $L_0 = 0,0012 \mu\text{H}$, $R_0 = 0,6 \Omega$, $C = 16,7 \text{ nF}$. Napięcie

znamionowe obniżone zmodyfikowane tego ochronnika wynosi $U_{CL,MOD} = U_{CL}/1,27$.

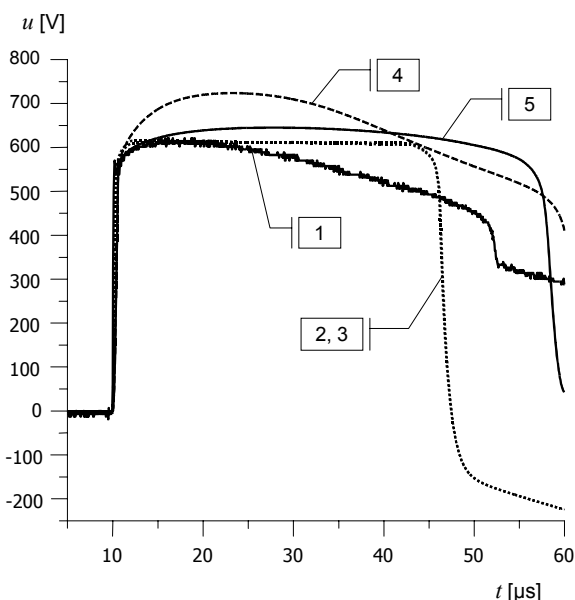
a)



b)



c)



Rys. 5. Przebiegi napięcia obniżonego na badanym ochronniku dla wymuszeń: a) i b) – 0,5 kV, c) – 2 kV; 1 – napięcie pomierzone, 2 – wynik symulacji w PSPICE (model oparty na zależności (1)), 3 – wynik symulacji w PSPICE (model wg rys. 2), 4 i 5 – wyniki symulacji w ATP-EMTP (model wg rys. 3)

W oparciu o schemat elektryczny modelu ochronnika ZnO oraz obliczone wartości elementów, wykonano jego model cyfrowy w środowisku ATPDraw, preprocesora programu ATP-EMTP. Do modelowania charakterystyk elementów nieliniowych zastosowano podprogram ZNOFITTER (moduł programu ATP-EMTP), który aproksymuje odcinkowo-liniową charakterystykę ochronnika charakterystyką odcinkowo-wykładniczą, bardziej zbliżoną do jego charakterystyki rzeczywistej.

Po wykonaniu dodatkowo modelu generatora udarów kombinowanych, przeprowadzono symulacje odpowiedzi badanych ochronników na udary znormalizowane [12], wykorzystując do tego celu podstawowy moduł pakietu ATP-EMTP.

Analiza wyników badań

Prawidłowość przeprowadzonych symulacji została potwierdzona przez porównanie otrzymanych wyników z wynikami z pomiarów i danymi katalogowymi badanych ochronników ZnO. Otrzymane przebiegi napięcia obniżonego oceniano w pełnym zakresie ich trwania oraz w istotnym dla tej oceny czasie obejmującym szybko narastające zbocze i wartość szczytową. W każdym przypadku (pomiarów i symulacji) kwantyzacja osi czasu wynosiła 50 ns.

Porównując zarejestrowane odpowiedzi badanego ochronnika ZnO na udary znormalizowane (rys. 5) należy stwierdzić dobrą zgodność wyników pomiarów z wynikami symulacji przy zastosowaniu dwóch różnych modeli ochronnika i dwóch różnych programów komputerowych.

Najmniejsze różnice wartości chwilowych napięcia obniżonego ochronnika, uzyskanych trzema wymienionymi metodami badań, występują w przypadku niższych poziomów napięcia generatora udarów (rys. 5a) oraz niezależnie od wartości tego napięcia, dla pierwszych kilku do kilkunastu mikrosekund trwania udaru (rys. 5bc). Ten przedział czasu ma największe znaczenie, ponieważ zawiera czoło i wartość szczytową odpowiedzi napięciowej ochronnika. Znaczne rozbieżności występujące w końcowej części otrzymanych przebiegów mogą być spowodowane różnym czasem trwania udarów, zależnym od parametrów modelu ochronnika przyłączonego do generatora.

Charakterystyki 2 i 3 na rysunku 5, otrzymane poprzez symulację w PSPICE, są silnie do siebie zbliżone. Pierwszą uzyskano korzystając z modelu opartego na zależności (1), a drugą – przy wykorzystaniu modelu wg rysunku 2. W obu przypadkach własności dynamiczne ochronników ZnO nie są uwzględnione. Zbliżony do tych charakterystyk jest także przebieg 5 na rysunku 5c, uzyskany w wyniku symulacji w ATP-EMTP z zastosowaniem modelu wg rysunku 3, w którym przyjęto zbyt małą wartość indukcyjności L_I .

Po dopasowaniu wartości indukcyjności L_I zgodnie z procedurą podaną w [16], uzyskano przebieg (4 na rys. 5c), którego kształt jest zbliżony do charakterystyki uzyskanej z pomiarów, co świadczy o właściwym uwzględnieniu własności dynamicznych ochronnika w jego modelu. Znaczne różnice amplitud tych przebiegów świadczą o niedokładnym dopasowaniu charakterystyk statycznych adaptowanego modelu.

Wnioski

Uzyskane wyniki potwierdzają przydatność badanych modeli ochronników ZnO do symulacji działania układów ochrony przeciwprzebiegiowej urządzeń i systemów niskiego napięcia.

Modele, w których nie uwzględniono własności dynamicznych ochronników, dają odpowiedzi na szybkie udary napięciowo-prądowe, odbiegające kształtem od

zarejestrowanych w czasie pomiarów laboratoryjnych. Mimo to, pozwalają wystarczająco dokładnie symulować amplitudę napięcia obniżonego.

W przypadku zastosowania modeli, w których uwzględniono własności dynamiczne ochronników niskiego napięcia, istnieje możliwość dokładnej symulacji amplitudy i kształtu przebiegów napięcia obniżonego, pod warunkiem dopasowania ich do właściwości danego typu ochronników. Należy prowadzić dalsze prace nad dostosowaniem istniejących modeli do charakterystyk statycznych i dynamicznych ochronników ZnO niskiego napięcia.

Pełna przydatność do symulacji działania ograniczników przepięć użytych programów komputerowych oraz ich wysoka wydajność i przyjazność dla użytkownika została potwierdzona w czasie badań.

LITERATURA

- [1] Zieliński J.S., Zastosowanie maszyn analogowych i cyfrowych do obliczeń przepięć w układach elektroenergetycznych, PWN, Warszawa
- [2] Chua L. O., Lin P.M., Komputerowa analiza układów elektronicznych, WNT Warszawa, (1981)
- [3] FFTSES User's Manual: Fast Fourier Transforms. *Safe Engineering Services & Technologies Ltd.*, Montreal, (1997)
- [4] 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)
- [5] Alternative Transients Program Rule Book, KU Leuven EMTP Center, Leuven (1987)
- [6] Manual (EMTP Theory Book), Bonneville Power Administration, Portland (1986)
- [7] Izydorczyk J., Pspice Komputerowa symulacja układów elektronicznych, Helion, Gliwice (1993)
- [8] Bajorek J., Knott M., Wyderka S., Efficiency of ZnO arrester models in digital simulation of lightning overvoltages, *Proc. of the 21st ICLP*, Berlin, (1992), 265-270,
- [9] Wróbel Z., Wyderka S., Wybrane zagadnienia modelowania matematycznego elementów układu elektroenergetycznego za pomocą programu EMTP-ATP, *Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej*, nr 141 (1996), 131-151
- [10] Siwik A., Wróbel Z., Modelling and Metrological features in overvoltage protection testing efficiency of lightning arresters applied in the railway feed system, *Proc. of the 26th ICLP*, Cracow, (2002), 750-755
- [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] PN-IEC 61643-1 (2000), Urządzenia ograniczające przepięcia w sieciach rozdzielczych niskiego napięcia. Wymagania techniczne i metody badań
- [13] Kim I., Funabshi T., Sasaki H., Hagiwara T., Kobayashi M., Study of ZnO arrester model for steep front wave, *IEEE Trans. on PD*, 2 (1996), 834-841
- [14] Schmidt W., Meppelink J., Richter B., Feser K., Kehl L., Qiu D., Behaviour of MO-surge-arrester blocks to fast transients, *IEEE Trans. on Power Delivery*, 1 (1989), 292-300
- [15] Pinceti P., Giannettoni M., A simplified model for zinc oxide surge arresters, *IEEE Trans. on PD*, 2 (1999), 393-398
- [16] IEEE Working Group 3.4.11, Modelling of metal oxide surge arresters, *IEEE Trans. on Power Delivery*, 1 (1992), 302-309
- [17] Katalog, Warystory tlenkowe, Pelelectric
- [18] Zitnik M., Thottappillil R., Scuka V., A comparative study of two varistor models, *Proc. of the 25th ICLP*, Rhodos, (2000), 842-847

Autorzy: dr inż. Zofia Wróbel, PKP Polskie Linie Kolejowe S.A., Zakład Linii Kolejowych, ul. S. Batorego 24, 35-005 Rzeszów, E-mail: zwrobel@prz.rzeszow.pl; dr inż. Stanisław Wyderka, Politechnika Rzeszowska, Wydział Elektrotechniki i Informatyki, ul. W. Pola 2, 35-959 Rzeszów, E-mail: swyderka@prz.rzeszow.pl