

ZOFIA WRÓBEL\*, ROBERT ZIEMBA\*\*

## SYMULACJA PRZEPIĘĆ ATMOSFERYCZNYCH W UKŁADACH LINII POTRZEB NIETRAKCYJNYCH, ZASILAJĄCYCH URZĄDZENIA STEROWANIA RUCHEM KOLEJOWYM

---

### SIMULATIONS OF THE LIGHTNING SURGES FOR THE FEED SYSTEMS THE RAILWAY TRAFIC CONTROL EQUIPMENT (RTC)

---

#### Streszczenie

W pracy przedstawiono wyniki modelowania zaburzeń impulsowych wywołanych wyładowaniami atmosferycznymi, które stanowią poważne zagrożenie dla pracy elektronicznych urządzeń sterowania ruchem kolejowym (srk). Przedstawiono modele poszczególnych elementów układu: udar, linia potrzeb nieatrakcyjnych (lpn), wybrane elementy układu zasilania urządzeń srk, transformator, słup, izolator, odgromnik. Zamieszczono wyniki symulacji przepięć w przykładowym układzie otrzymane z wykorzystaniem programu EMTP-ATP.

*Słowa kluczowe: ochrona przeciwprzebieciowa, sieć trakcyjna, modelowanie komputerowe, ochronnik*

#### Abstract

In the paper the necessity of considering the problem of lightning protection effectiveness in the supplying system the railway traffic control equipment (rtc) has been motivated with the presentation of the binding in this extent codes. The constituent elements of mathematical model that has been considered to analyse the system, that are: long lines, towers, lightning arresters. The possibility of simulating the elements that go in the circuit of the system (*RLC* and long lines) with the utilization of EMTP-ATP software packages which has been described with paying attention to the obligatory of declarations in the program. The exemplifying transients which confirm efficiency of simulating with the help of EMTP-ATP program.

*Keywords: overvoltage protection, railway system, computer modeling, surge arrester*

---

\* Dr inż. Zofia Wróbel, PKP PLK S.A., Zakład Linii Kolejowych w Rzeszowie.

\*\* Dr inż. Robert Ziemba, Zakład Podstaw Elektrotechniki i Informatyki, Wydział Elektrotechniki i Informatyki, Politechnika Rzeszowska.

## 1. Wstęp

Zagrożenie pojawiające się podczas występowania bezpośredniego udaru piorunowego w układach zasilających odbiory potrzeb nietrakcyjnych może występować niemal przy każdym wyładowaniu, nawet dość odległym [1–3], przez co na przepięcia o dużych amplitudach narażone są elementy układów zasilania linii potrzeb nietrakcyjnych i połączone z nimi urządzenia sterowania ruchem kolejowym [4, 5]. Możliwe jest występowanie w układach zasilających zakłóceń o wartościach porównywalnych z sygnałami użytecznymi, wywoływanych wyładowaniami atmosferycznymi lub będących wynikiem zadziałania zdalnych impulsów elektromagnetycznych. Zapobieganie tego rodzaju zakłóceniom stanowi bardzo złożony problem i wymaga połączenia wiedzy z wielu dziedzin. Jedną z metod analizy są badania w rzeczywistym układzie energetycznym wykonywane na podstawie specjalnie organizowanych pomiarów lub za pomocą rejestratorów przepięć zainstalowanych w układach energetycznych, które rejestrują stany nieustalone w czasie pracy układu. Badania te są również często symulowane metodami analizy matematycznej.

W referacie przedstawiono wyniki modelowania impulsowych zaburzeń elektromagnetycznych wywołanych wyładowaniami atmosferycznymi. W tym celu opracowano modele poszczególnych elementów układu: udar, linia potrzeb nietrakcyjnych, wybrane układy zasilania urządzeń sterowania ruchem kolejowym, transformator, słup, izolator, odgromnik. Analizę prowadzono w programie EMTP-ATP [6, 7].

## 2. Źródła wymuszenia – udar

Wyładowania atmosferyczne należą do grupy wyjątkowo niebezpiecznych, niszczących impulsów o szerokim zasięgu, które charakteryzują się dużymi wartościami szczytowymi i krótkimi czasami narastania. Analiza zagrożenia piorunowego urządzeń sterowania ruchem kolejowym wymaga uwzględnienia doświadczeń wynikających z badań i obserwacji [8–10]. Wskazują one na celowość stosowania układów ochronnych i dowodzą, że urządzenia niewyposażone w układy ochrony przeciwprzepięciowej, znajdujące się w obszarze o promieniu 1–1,5 km od miejsca uderzenia pioruna, mogą ulec zniszczeniu.

Z dotychczasowych obserwacji impulsowego pola elektromagnetycznego LEMP (ang. *Lightning Electromagnetic Puls*) wynika, że przeciętnie natężenie pola elektromagnetycznego i magnetycznego narasta od 0 do wartości maksymalnej w czasie od dziesiątych części  $\mu\text{s}$  do kilku  $\mu\text{s}$  [11–13]. Zaobserwowano dwie fazy zmian natężenia pola elektrycznego [8]. Fazę wolnozmienną pierwszego wyładowania głównego (2–8  $\mu\text{s}$ ), o natężeniu pola elektrycznego zmieniającym się w zakresie od 0 do 50% wartości maksymalnej, oraz fazę szybkich zmian gwałtownego narastania natężenia pola elektrycznego do wartości maksymalnej przy czasie narastania 100–200 ns. Dla kolejnego wyładowania głównego w danym kanale faza wolnozmienna trwa 0,5–1  $\mu\text{s}$ , a natężenie pola elektrycznego osiąga 20% wartości maksymalnej. Zakres czasowy dla drugiej fazy mieści się w granicach 100–200 ns.

Impulsowe pole magnetyczne wytworzone przez wyładowania między chmurami lub w chmurze burzowej można podzielić na impulsy jednobiegunowe o czasie narastania około 0,2  $\mu\text{s}$  i czasie trwania około 0,75  $\mu\text{s}$ , pojawiające się mniej więcej co 5  $\mu\text{s}$  w zakresie czasowym 100–400  $\mu\text{s}$ , oraz impulsy o dwubiegunowym charakterze zmian, znacznie

większych amplitudach, przeciętnym czasie trwania impulsu około 63  $\mu\text{s}$  i odstępie czasowym pomiędzy impulsami wynoszącym około 680  $\mu\text{s}$ .

Przebiegi czasowe prądu jako wyładowania zalecane do badań symulacyjnych podane są w normie PN-EN 62305-1:2006 (U); *Ochrona odgromowa – część 1. Wymagania ogólne*. [8]. Zawarto w nich propozycje schematów zastępczych generatorów, które 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 dla:

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

Tabela 1

**Parametry udarów piorunowych dla różnych poziomów ochrony odgromowej [8]**

Parametry	Pierwsze wyładowanie w kanale			Kolejne wyładowanie w kanale		
	Poziom ochrony odgromowej			Poziom ochrony odgromowej		
	I	II	III–IV	I	II	III–IV
$I$ (kA)	200	150	100	50	7,5	25
$K$	0,93	0,93	0,93	0,933	0,933	0,933
$t_1$ ( $\mu\text{s}$ )	19	19	19	0,454	0,454	0,454
$t_2$ ( $\mu\text{s}$ )	485	485	485	143	143	143

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

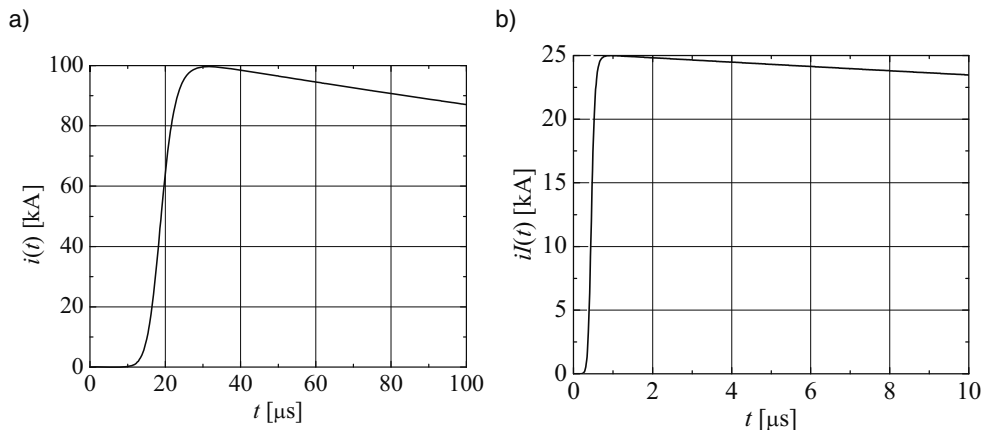
Postać czasowa prądu piorunowego dla pierwszego (10/350  $\mu\text{s}$ ) i kolejnych (0,25/100  $\mu\text{s}$ ) składowych wyładowań doziemnych opisana jest równaniem:

$$i(t) = \frac{I}{k} \frac{(t/\tau_1)^{10}}{1+(t/\tau_1)^{10}} \exp(-t/\tau_2) \quad (1)$$

gdzie:

- $k$  – współczynnik korekcyjny wartości maksymalnej,
- $\tau$  – stała czasowa czoła udaru,
- $\tau_2$  – stała czasowa grzbietu udaru.

Przykładowy przebieg składowej pierwszej dla amplitudy 100 kA przedstawiono na rysunku 1.



Rys. 1. Przebiegi czasowe: a) pierwszej składowej wyładowania 10/350  $\mu\text{s}$ ,  $I_m = 100$  kA; b) kolejnej składowej wyładowania 0,25/100  $\mu\text{s}$ ,  $I_m = 25$  kA [8]

Fig. 1. Waveform of the: a) first short stroke 10/350  $\mu\text{s}$ ,  $I_m = 100$  kA, b) subsequent short stroke 0.25/100  $\mu\text{s}$ ,  $I_m = 25$  kA

### 3. Modelowanie elementów układu

Obecnie istnieje wiele programów komercyjnych, które mogą być stosowane do kompleksowej analizy układów elektroenergetycznych zarówno w dziedzinie czasu, jak i częstotliwości. Standardowe programy obliczeniowe, jak PSPICE [14] czy EMTP-ATP [15, 16], umożliwiają przeprowadzenie symulacji rzeczywistych elementów układu i dobór odpowiednich zabezpieczeń. Wnikliwe analizy porównawcze dają możliwość oceny różnic pomiędzy rzeczywistymi elementami a ich modelami matematycznymi, a także właściwy dobór parametrów.

Linie zasilające urządzenia srk są zaliczane do odbiorów nietrakcyjnych i nazywane liniami potrzeb nietrakcyjnych lpn. Linie te są podzielone na odcinki o długości nieprzekraczającej 30 km, prowadzone wzdłuż szlaków kolejowych i zasilane dwustronnie z podstacji trakcyjnych napięciem przemiennym 15 kV. Dąży się do ujednolicenia napięcia, jednak w sporadycznych przypadkach stosuje się napięcie 6 kV. Od tych linii wykonywane są połączenia do stacji transformatorowych (punktów obniżających napięcie) zasilających m.in. stacje kolejowe, posterunki odstępowe i odgałęźne, kabiny sekcyjne, urządzenia samoczynnej blokady liniowej, oświetlenie itp. Ochronie od przepięć podlegają transformatory i odcinki kablowe, a do ochrony wymienionych elementów zastosowano odgromniki zaworowe.

#### 3.1. Model linii potrzeb nietrakcyjnych

Program EMTP-ATP umożliwia wyznaczanie parametrów napowietrznych linii od pojedynczych urządzeń po rozbudowane systemy energetyczne [6, 7, 15, 16]. Modelowania można dokonywać dla linii o parametrach rozłożonych, wykorzystując model Clarke'a –

w przypadku linii transponowanej, oraz model K.C. Lee – dla linii nietransponowanej. Modele linii o parametrach niezależnych od częstotliwości można podzielić na modele z rezystancjami skupionymi i modele niezniekształcające. W programie istnieje również możliwość analizowania linii przy pełnych charakterystykach częstotliwościowych przez wykorzystanie modelu JMARTI lub SEMLYEN. Należy przy tym zwrócić uwagę, że modele te wymagają wprowadzenia procedury LINE CONSTANTS lub CABLE CONSTANTS. Zaimplementowane w programie EMTP-ATP modele linii przesyłowych reprezentują przewody wykorzystywane jako zasilające linie energetyczne oraz linie telekomunikacyjne. Poprzez dołączenie wyliczonych parametrów linii do pliku danych zawierających pozostałe elementy badanego układu (źródła, elementy skupione RLC, linie transmisyjne, ochronniki itd.) można, obserwując przebiegi czasowe napięć i prądów, ocenić zagrożenie, jakie może wystąpić w wyniku przepięć i przetężeń.

Analiza zjawisk wywołanych przepięciami pochodzenia atmosferycznego polega m.in. na stworzeniu modelu przeznaczonego do badania rozchodzenia się fal wędrownych powodowanych uderzeniem pioruna w obiekty energetyczne. W badaniach tego typu przepięć charakter zjawisk pozwala na zastąpienie trójfazowych układów prądu przemiennego jednofazowymi, a rozważania stanów nieustalonych w układach jednofazowych, przy założeniu takiego przybliżenia, dają prawidłowe i wystarczające informacje. Analiza propagacji fal może być prowadzona na podstawie równań Maxwella lub telegrafistów. Rozważany model linii długiej można opisać równaniami [1, 11, 12]

$$-\frac{\partial u(z, t)}{\partial z} = R_0 i(z, t) + L_0 \frac{\partial i(z, t)}{\partial t} \quad (2)$$

$$-\frac{\partial i(z, t)}{\partial z} = G_0 u(z, t) + C_0 \frac{\partial u(z, t)}{\partial t} \quad (3)$$

gdzie:  $R_0$ ,  $L_0$ ,  $C_0$  i  $G_0$ , są parametrami linii na jednostkę długości.

Dla większości zastosowań praktycznych analizę przeprowadza się z pominięciem oporu  $R_0$  i wpływności  $G_0$ . Otrzymuje się wówczas

$$-\frac{\partial u(z, t)}{\partial z} = L_0 \frac{\partial i(z, t)}{\partial t} \quad (4)$$

$$-\frac{\partial i(z, t)}{\partial z} = C_0 \frac{\partial u(z, t)}{\partial t} \quad (5)$$

Takie uproszczenie jest uzasadnione, jeżeli stałe czasowe  $L/R$  i  $C/G$  są bardzo duże w porównaniu z parametrami czasowymi wymuszeń udarowych. Przy założeniu, że  $R_0 = 0$  i  $G_0 = 0$  wyznaczono prędkość propagacji fali w linii  $v$

$$v = \frac{1}{L_0 C_0} = \frac{1}{\epsilon \mu} \quad (6)$$

impedancję falową linii bezstratnej  $Z_C$

$$Z_C = \frac{L_0}{C_0} \quad (7)$$

Wartości  $Z_C$  i  $\tau = \frac{1}{v}$  przyjęto dla drutu AFL6-35 mm<sup>2</sup> o indukcyjności  $L_0$ , wyliczonej ze wzoru

$$L_0 = 4,6 \left( \log \frac{a}{0,78r} \right) 10^{-4} \text{ [H/km]} \quad (8)$$

gdzie:

- $a$  – odstęp między osiami przewodów przy symetrycznym trójkątnym układzie przewodów ( $a = 1,8$  m),
- $r$  – promień przewodu ( $r = 0,004$  m).

Indukcyjność jednostkowa przewodu wynosi:  $L_0 = 1,27$  mH/km.

Pojemność wyliczona ze wzoru

$$C_0 = \frac{\pi \epsilon_0}{\ln \frac{a}{r}} = \frac{0,0241}{\log \frac{a}{r}} 10^{-6} \text{ [F/km]} \quad (9)$$

wynosi  $C_0 = 9,083$  nF/km.

Zgodnie ze wzorem (9) wartość  $Z_C = 373 \Omega$ . Dla analizowanego wycinka linii lpn, przy założeniu odległości między słupami równej  $l = 140$  m,  $\tau = 0,476 \mu\text{s}$ .

### 3.2. Modele słupów

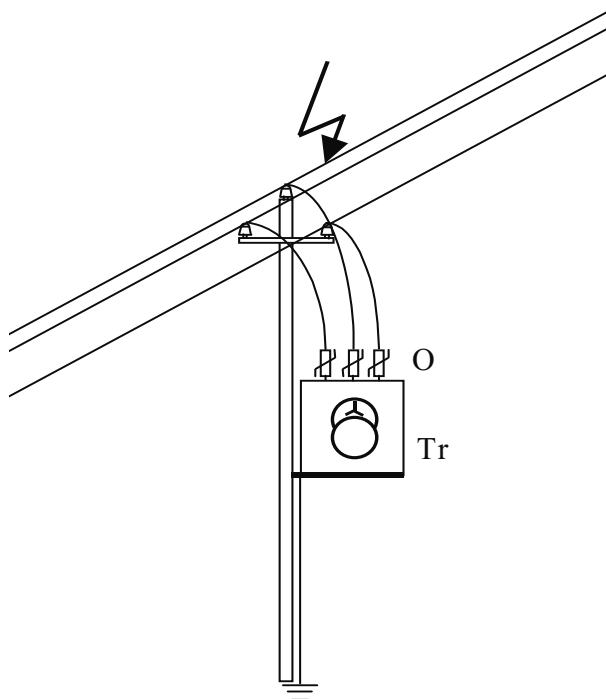
W analizie przepięć pochodzenia atmosferycznego model słupa może być realizowany jako szeregowe połączenie indukcyjności i rezystancji uziemienia [1, 12]. Do analizy przyjęto słup P12 o indukcyjności jednostkowej  $L_0 = 1,7 \mu\text{H/km}$  wyliczonej ze wzoru

$$L_0 = 0,2 \mu_r \ln \frac{2h}{r} \text{ [\muH/km]} \quad (10)$$

gdzie:

- $\mu_r$  – przenikalność magnetyczna względna (dla powietrza  $\mu_r = 1$ ),
- $h$  – wysokość słupa,
- $r$  – promień zastępczy przewodu uziemiającego słupa.

Dla analizowanych słupów z izolatorami  $L = 20,3 \mu\text{H}$ .



Rys. 2. Szkic przyjętego do analizy wycinka linii l<sub>pn</sub> (słupa z transformatorem)

Fig. 2. Accepted to analysis segment of the line-side power supply (lps) (tower with transformer)

Dla rezystancji słupów z zainstalowanymi transformatorami przyjęto  $R = 5 \Omega$ , a dla pozostałych –  $10 \Omega$ .

### 3.3. Transformatory

W uproszczonej analizie przebiegów łączeniowych model transformatora może być zadany jako połączenie indukcyjności górnego i dolnego napięcia. W warunkach przebiegów udarowych, np. pochodzenia atmosferycznego, indukcyjności uzwojenia można pominąć, uwzględniając jedynie doziemną pojemność wejściową [1, 15, 16].

W obliczeniach przykładowego odcinka linii uwzględniono transformator T-3zONG o mocy znamionowej  $S_n = 40 \text{ kVA}$  i napięciu  $U_n = 6 \text{ kV}$ .

Wartość pojemności  $C_1$  górnego napięcia wyliczono ze wzoru

$$C_1 = \varepsilon \frac{S_n}{U_n} \quad (11)$$

i wynosi  $C = 0,0833 \text{ nF}$  dla przyjętej wartości współczynnika  $\varepsilon = 10 \text{ nF/kA}$ .

### 3.4. Modele ochronników przepięciowych

Nieliniowa charakterystyka odgromnika zaworowego po zapłonie może być aproksymowana zależnością

$$U_0 = a \cdot i_0^b \quad (12)$$

gdzie:

- $U_0$  – napięcie na stosie zmiennooporowym podczas przepływu prądu przez odgromnik,
- $a$  – stała zależna od konstrukcji stosu zmiennooporowego,
- $i_0$  – prąd przepływający przez odgromnik,
- $b$  – współczynnik zaworowości stosu zmiennooporowego [15, 16].

Do analizy przyjęto odgromnik GZa 6/5 [17] o nieliniowym przebiegu charakterystyki stosu zmiennooporowego dla danych:  $a = 15,06$ ;  $b = 0,144$ .

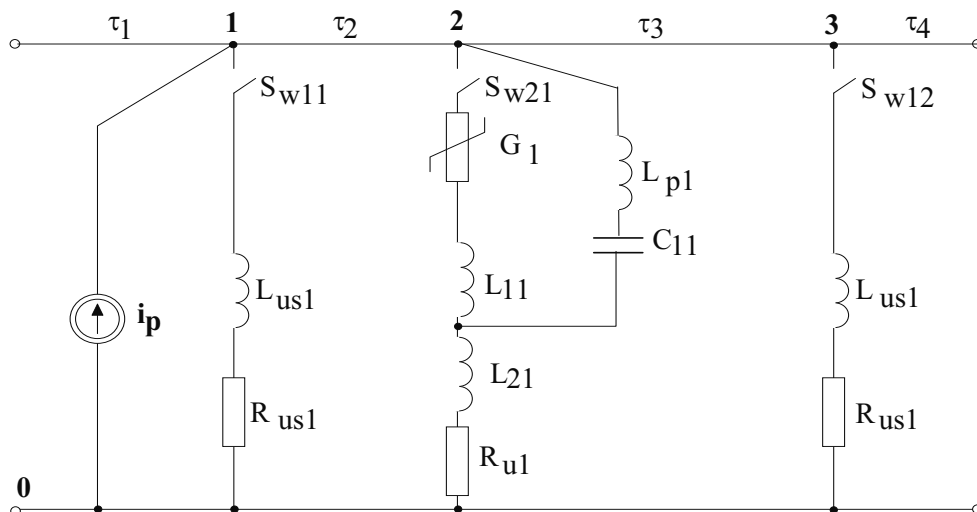
Jako model izolatora przyjęto LWP 8-20 [18] w postaci wyłącznika (rys. 1 – oznaczenia:  $S_{w11}$ ,  $S_{w12}$ ,  $S_{w21}$ ), dla którego parametrem charakterystycznym jest napięcie probiercze pod deszczem o wartości 50 kV.

## 4. Ocena efektywności symulacji za pomocą programu ATP/EMTP

Podczas wyładowań bezpośrednich w linii zasilające obserwuje się zjawiska związane z propagacją fal prądowych [1]. Analizę przedstawionego na rys. 3 fragmentu linii potrzeb nietrakcyjnych prowadzono przy dodatkowych założeniach upraszczających, czyli nie uwzględniając odbić fal prądowych od szczytu kanału wyładowania i doprowadzając udar prądowy o określonym przebiegu, ale nie uwzględniający rzeczywistej impedancji falowej kanału wyładowania. Uwzględnienie tych założeń wymaga zastosowania bardziej zaawansowanych modeli obliczeniowych. Analizowany układ zawiera przyjęte do analizy elementy:  $L_{us(1,2)}$  oraz  $R_{us(1,2)}$  – indukcyjność i rezystancję słupów bez transformatorów,  $S_{w(11,12,21)}$  – izolator,  $G_1$  – odgromnik,  $L_{p1}$  – indukcyjność przewodu łączącego górne uzwojenie transformatora z linią,  $L_{11}$  – indukcyjność górnej części słupa nad transformatorem,  $L_{21}$  – indukcyjność dolnej części słupa pod transformatorem,  $R_{u1}$  – rezystancję słupa z zainstalowanym transformatorem.

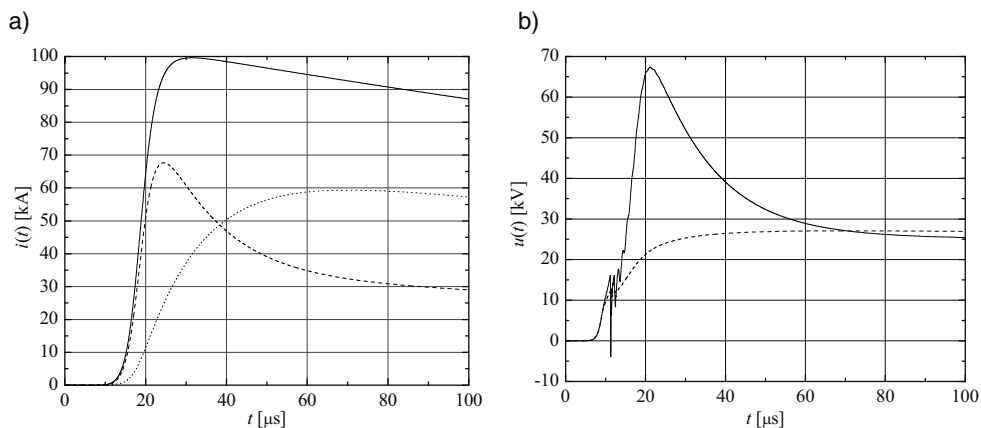
Dla pierwszego wyładowania głównego o wartości maksymalnej 100 kA (III poziom ochrony) kształty przebiegów napięć i prądów nie zawierają oscylacji (rys. 4). Uzasadnia to przyjęte założenie upraszczające o pominięciu zjawisk falowych. Oscylacje pojawiają się dla przebiegów wygenerowanych wymuszeniami w postaci kolejnej składowej wyładowania o kształcie 0,25/100  $\mu$ s i wartości maksymalnej 25 kA (rys. 5). Są wynikiem krótkiego czasu narastania czoła prądu u podstawy kanału wyładowania względem czasu potrzebnego na pokonanie przez falę danej odległości.





Rys. 3. Schemat analizowanego układu

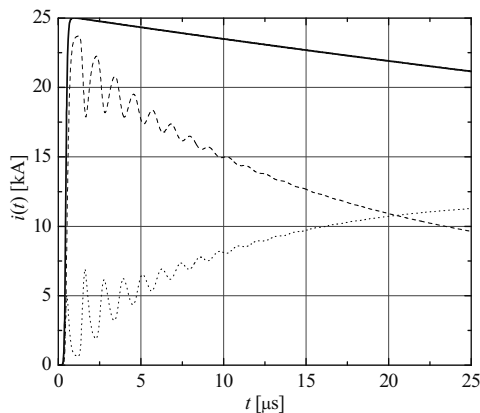
Fig. 3. Scheme of the analysed system



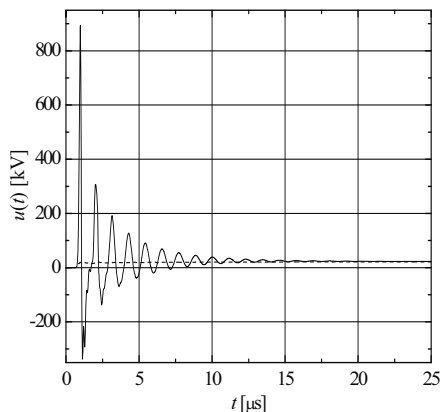
Rys. 4. Wyniki symulacji dla wymuszenia w postaci pierwszej składowej wyładowania (udar 10/350  $\mu$ s, 100 kA): a) rozptyw prądów – prąd uderu (linia ciągła), prąd do słupa uderzonego (linia kreskowana), prąd w kierunku słupa z transformatorem (linia kropkowana); b) rozkład napięć na słupie z transformatorem – napięcie na transformatorze (linia ciągła), napięcie na ochronniku (linia kreskowana)

Fig. 4. Results of simulation for the first short stroke (10/350  $\mu$ s, 100 kA): a) the currents surge (solid line), the current to tower (dashed line), the current in direction of tower with transformer (dotted line); b) the voltages on tower with transformer - the voltage on transformer (solid line), the voltage for surge arrester (dotted line)

a)



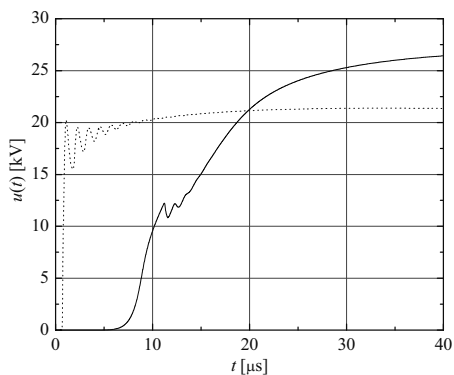
b)



Rys. 5. Wyniki symulacji dla wymuszenia w postaci kolejnej składowej wyładowania (udar 0,25/100  $\mu$ s, 25 kA): a) rozptył prądów – prąd udaru (linia ciągła), prąd do słupa uderzonego (linia kreskowana), prąd w kierunku słupa z transformatorem (linia kropkowana); b) rozkład napięć na słupie z transformatorem – napięcie na transformatorze (linia ciągła), napięcie na ochronniku (linia kreskowana)

Fig. 5. Results of simulation for the subsequent short stroke (0.25/1000  $\mu$ s, 25 kA): a) the currents surge (solid line), the current to tower (dashed line), the current in direction of tower with transformer (dotted line); b) the voltages on tower with transformer – the voltage on transformer (solid line), the voltage for surge arrester (dotted line)

Dodatkowo, na rysunku 6 przedstawiono przebiegi napięć na modelowanym ochronniku dla przyjętego jednakowego okna czasowego 40  $\mu$ s.



Rys. 6. Wyniki symulacji napięć na ochronniku dla wymuszeń jak na rys. 4b (linia ciągła) i 5b (linia kropkowana)

Fig. 6. Results of simulation the voltages on surge arrester for the stroke from Fig. 4.b (solid line) and for Fig. 5.b (dotted line)

## 5. Wnioski

Ocena zagrożeń urządzeń sterowania ruchem kolejowym powodowanych wyładowaniami atmosferycznymi wymaga prowadzenia dokładnych analiz rozptyłu prądu piorunowego i spadków napięć w elementach konstrukcyjnych i instalacyjnych analizowanych urządzeń. Zastosowanie programu ATP znacznie ułatwia żmudną i skomplikowaną analizę oraz ocenę zachodzących zjawisk. Różne możliwości programu mają charakter poznawczy i zostaną wykorzystane do dalszej analizy i oceny zagrożenia układów zasilających urządzenia srk powodowanych przebiegami pochodzenia atmosferycznego.

## Literatura

- [1] Jakubowski J.L., *Podstawy teorii prądów w układach energoelektrycznych*, PWN, Warszawa 1968.
- [2] Laskowski M., Kulawiak A., *Ochrona przeciwprzepięciowa i przeciwporażeniowa w urządzeniach srk z elementami elektronicznymi*, Praca CNTK, nr 1002/24, Warszawa 1994.
- [3] Laskowski M., Malesa R., Wróbel Z. i in., *Określenie istniejących poziomów zakłóceń elektromagnetycznych w ruchomych i stacjonarnych obiektach kolejowych*, Praca CNTK, nr 1049/24, Warszawa 1997.
- [4] Kulawiak A., Kabacińska B., Kaźmierczak A., *Analiza stanu i ocena ochrony przeciwprzepięciowej urządzeń srk na sieci PKP. Etap 1. Przygotowanie zbioru dokumentacji najczęściej uszkodzonych urządzeń srk. Wersja 2, Nr 4036/20, CNTK, Warszawa 2003.*
- [5] Kulawiak A., Kabacińska B., Kaźmierczak A., *Analiza stanu i ocena ochrony przeciwprzepięciowej urządzeń srk na sieci PKP. Etap 2. Analiza uszkodzeń urządzeń srk spowodowanych przebiegami. Wersja 2, Nr 4036/20, CNTK, Warszawa 2003.*
- [6] Wróbel Z., *Analiza skuteczności ochrony odgromowej układów zasilających SRK przy pomocy pakietu ATP*, Second International Conference: Modern Systems and Drives for Electronic Traction, Warszawa 5–7 X 1995, 291-296.
- [7] Wróbel Z., *Modelowanie matematyczne ochronników w obwodach zasilania urządzeń sterowania ruchem kolejowym*, IV Sympozjum Metody Matematyczne w Elektroenergetyce, Zakopane 22–24 X 1998.
- [8] PN-EN 62305-1:2006(U); Ochrona odgromowa – część 1. Wymagania ogólne.
- [9] PN-EN 62305-2:2006/AC:2007(U); Ochrona odgromowa – część 2. Zarządzanie ryzykiem.
- [10] PN-EN 62305-4:2006(U); Ochrona odgromowa – część 4. Urządzenia elektryczne i elektroniczne w obiektach budowlanych.
- [11] PN-IEC 61312-1:2001; Ochrona przed impulsem elektromagnetycznym. Zasady ogólne.
- [12] PN-IEC 61312-2:2003; Ochrona przed impulsem elektromagnetycznym (LEMP). Część 2: Ekranowanie obiektów połączenia wewnątrz obiektów i uziemienia.
- [13] PN-IEC 61312-3:2004; Ochrona przed impulsem elektromagnetycznym. Część 3: Wymagania dotyczące urządzeń do ograniczania przebiegów (SPD).

- [14] Izydorczyk J., *Pspice Komputerowa symulacja układów elektronicznych*, Helion, Gliwice 1993.
- [15] Dommel H.W., *ElectroMagnetic Transients Program*, Reference Manual (EMTP Theory Book), Bonneville Power Administration, Portland 1986.
- [16] *Alternative Transients Program Rule Book*, KU Leuven EMTP Center, Leuven 1987.
- [17] SWW 1114-14 1115-72; *Odgromniki zaworowe*, Katalog Wema, Warszawa 1973, 37-42.
- [18] *Izolatory porcelanowe nisko i wysokonapięciowe*, Zakłady Porcelany Elektrotechnicznej „Zofiówka”, 2.
- [19] 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.
- [20] Sowa A., *Kompleksowa ochrona odgromowa i przepięciowa*, Biblioteka COSiW, SEP, Warszawa 2005.