

MODELOWANIE PRZEPIĘĆ POWODOWANYCH WYŁADOWANIAM I ATMOSFERYCZNYMI W UKŁADACH ZASILANIA URZĄDZEŃ STEROWANIA RUCHEM KOLEJOWYM

Zofia WRÓBEL

PKP PLK S.A. Zakład Linii Kolejowych w Rzeszowie
tel.: 17 7111343e-mail: zwrobel@prz.edu.pl

Streszczenie: Sieci trakcyjne i urządzenia sterowania ruchem kolejowym (srk) obejmując swym zasięgiem znaczne obszary kraju są narażone na oddziaływanie wyładowań atmosferycznych. Zagrożenie to może być wynikiem bezpośredniego trafienia pioruna w sieć trakcyjną czy linię potrzeb nietrakcyjnych (LPN). Może też być wynikiem napięć indukowanych przez pobliskie wyładowania doziemne. Powstałe uszkodzenia urządzeń elektrycznych i elektronicznych lub ich komponentów powodują straty np. w postaci opóźnień pociągów i związanych z tym skutków. Zapobieganie tego rodzaju zakłóceniom jest problemem bardzo złożonym i wymaga wzajemnego połączenia wielu zagadnień, a jedną z metod jest analiza matematyczna.

W referacie przedstawiono wyniki modelowania przepięć indukowanych wywołanych wyładowaniami atmosferycznymi. Analizę przeprowadzono w pakiecie Lightning –Inducet OverVoltage (LIOV).

Słowa kluczowe: kompatybilność elektromagnetyczna, przepięcia indukowane, modelowanie cyfrowe

1. WPROWADZENIE

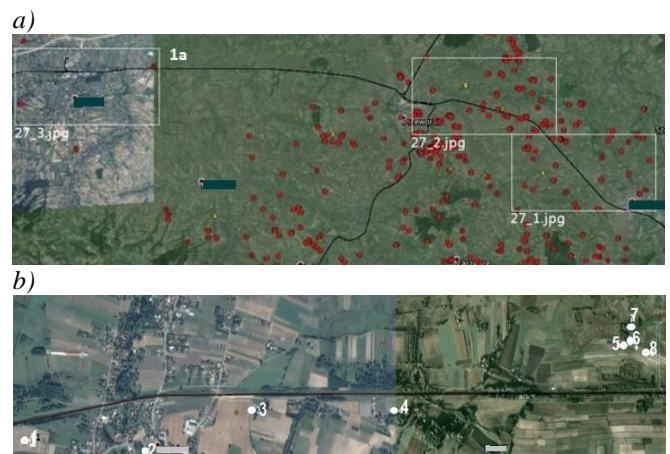
Modelowanie matematyczne jest już od pewnego czasu domeną analiz komputerowych. Znaczna różnorodność dostępnych symulatorów komputerowych, wśród których można znaleźć wyspecjalizowane pakiety obliczeniowe przygotowane do analizy ściśle określonych problemów sprawia, że nie jest konieczne tworzenie własnych programów obliczeniowych. Zaawansowane modele matematyczne zawsze jednak zawierają założenia upraszczające. W symulatorach utworzonych do analizy linii transmisyjnych można znaleźć metody od najczęściej stosowanych, jak: metoda różnic skończonych w dziedzinie czasu (Finite Difference Time Domain), metoda elementów skończonych (Finite Element Method), metoda momentów (Method of Moment), metoda macierzy linii transmisyjnej (Transmission Line Matrix) po rzadziej stosowane, jak: metoda elementów brzegowych (Boundary Element Method) i metoda linii (Method of Lines) stosowana przez firmę Eagleware [1].

Wybrany do modelowania przepięć indukowanych pakiet LIOV [2] został utworzony w wyniku współpracy kilku uczelni europejskich: Wydziału Elektrycznego Uniwersytetu w Bolonii, Laboratorium Techniki Wysokich Napięć

Szwajcarskiego Instytutu Technologicznego i Wydziału Elektrycznego Uniwersytetu "La Sapienza" w Rzymie.

2. PRZYJĘTE DO ANALIZY MODELE UKŁADÓW

Na rysunkach 1.a i 1.b zamieszczono przykładowe, zarejestrowane wzdłuż trasy kolejowej wyładowania atmosferyczne. Dla wybranych udarów wyznaczono w artykule przepięcia indukowane. Wartości wybranych udarów zamieszczono odpowiednio w tabelach 1 i 2.



Rys. 1. Fragmenty linii kolejowej z zarejestrowanymi wyładowaniami atmosferycznymi podczas burz w dniach:
a) 27 maja 2014 r. [3] i b) 17 lipca 2014 r. [4]

Numerację udarów z rysunku 1.a celowo pominięto, ponieważ w przedstawionej analizie z tego zapisu wykorzystano tylko dane udaru o wartości maksymalnej, oznaczonego na rysunku 1.a jako 1a.

Pozostałe wyładowania atmosferyczne mieściły się na dwóch osobnych zdjęciach oznaczonych jako 27_1 i 27_2 na ogólnym zdjęciu (rys. 1.a). Dodatkowo, na rysunku 1b zaznaczono osiem wyładowań atmosferycznych wymienionych w tabeli 2.

Tabela 1 – Wybrane, zarejestrowane w dniu 27 maja 2014 r. udary w pobliżu fragmentu linii kolejowej [3]

Data	G (GMT)	Wyładowanie		Numer na mapie
		1 - doziemne	Wartość maksymalna (kA)	
		2- między chmurami	+ polaryzacja dodatnia - polaryzacja ujemna	
2014.05.27	15:51:09.960	1	157.5	1
2014.05.27	15:20:35.983	1	-018.9	2
2014.05.27	14:41:30.727	1	007.0	3
2014.05.27	15:18:19.539	1	-009.2	4
2014.05.27	15:17:52.940	1	-025.3	5
2014.05.27	15:17:52.901	1	-021.6	6
2014.05.27	15:17:52.864	1	-031.4	7
2014.05.27	15:18:19.397	1	-011.5	8
2014.05.27	15:18:19.365	1	-046.9	9
2014.05.27	15:16:49.721	1	-068.6	10
2014.05.27	15:17:23.547	1	-009.2	11
2014.05.27	15:17:23.528	1	-020.0	12
2014.05.27	15:13:54.591	1	-016.3	13

Tabela 2. Wybrane udary, zarejestrowane w dniu 17 lipca 2014 r. w pobliżu fragmentu linii kolejowej [4]

Data	G (GMT)	Wyładowanie		Numer na mapie
		1 - doziemne	Wartość maksymalna (kA)	
		2- między chmurami	+ polaryzacja dodatnia - polaryzacja ujemna	
2014.07.17	15:11:54.494	1	-023.2	1
2014.07.17	15:01:26.532	1	-013.3	2
2014.07.17	15:12:11.254	1	-015.3	3
2014.07.17	15:08:20.088	1	-021.9	4
2014.07.17	15:11:55.107	1	-010.7	5
2014.07.17	15:11:54.906	1	-007.8	6
2014.07.17	15:11:54.603	1	-015.6	7
2014.07.17	15:11:54.772	1	-043.8	8

Rejestrację udarów wykonano w systemie LINET. System zanotował bardzo wiele wyładowań w promieniu 2 km od linii kolejowej w czasie obydwu burz. Dokładność lokalizacji miejsca wystąpienia wyładowania wykonano z błędem 150-200 m. Polega ona na zastosowaniu techniki TOA (Time-of-Arrival) zoptymalizowanej dzięki wykorzystaniu systemu GPS przy średnim błędzie rozdzielczości czasu dla całego systemu wynoszącym 0,2 μs. W zamieszczonych tabelach 1 i 2 pominięto dane dotyczące lokalizacji udarów tj. długość i szerokość geograficzną.

3. MODELOWANIE NAPIĘĆ INDUKOWANYCH

Zgodnie z normą [5] wyróżnia się trzy rodzaje wyładowań: wyładowanie dodatnie, pierwszą składową wyładowania ujemnego i składowe kolejne (sekwencyjne) [6]. Prądy wyładowań dodatnich mogą osiągać wartości maksymalne rzędu 200 kA. Wyładowania dodatnie są zjawiskami rzadkimi i charakteryzują się tym, że wyładowanie ma swój początek w górnej części chmury burzowej. Ten rodzaj wyładowania charakteryzuje się dużą energią, co ma znaczenie w analizie i modelowaniu [7].

Pakiet LIOV (Lightning-Induced Over Voltage) [1] daje możliwość wyznaczania napięć dla napowietrznej linii transmisyjnej umieszczonej w określonej odległości od kanału wyładowania atmosferycznego. W modelowaniu sprzężenia pola elektromagnetycznego wyładowania atmosferycznego z linią transmisyjną wyznaczone są składowe pola elektrycznego i magnetycznego w pobliżu linii. Pakiet LIOV składa się z podprogramów: MTLF (Modified-Transmission Line Fields) and MTLV (Modified-Transmission Line Voltages). Podprogram MTLF.exe służy do wyznaczania pola magnetycznego powstałego w wyniku przepływu prądu w kanale wyładowania przy uwzględnieniu prędkości prądu w kanale wyładowania atmosferycznego. Podprogram MTLV.exe natomiast służy do wyznaczania napięć indukowanych wzdłuż linii.

W pakiecie założono, że prąd u podstawy kanału wyładowania atmosferycznego jest określony zależnością zaproponowaną przez Heidlera [8] i zastosowaną również w normie [5]:

$$i(0,t) = i_{H1}(0,t) + i_{H2}(0,t) + i_{DE}(0,t) \quad (1)$$

czyli jest sumą dwóch funkcji Heidlera $i_{H1}(0,t)$ i $i_{H2}(0,t)$ opisanych zależnością (2) i parametrami zestawionymi w tabeli 3 oraz trzeciej - funkcji dwuwykładniczej opisanej zależnością (4):

$$i(0,t) = \sum_{k=1}^2 \frac{I_{mk}}{\eta_k} \frac{\left(\frac{t}{\tau_k}\right)^2}{1 + \left(\frac{t}{\tau_k}\right)^2} \exp\left(-\frac{t}{\tau_{2k}}\right) \quad (2)$$

w której: I_{mk} - wartość maksymalna prądu,
 τ_{1k} - podstawa czasu pierwszego członu funkcji,
 τ_{2k} - podstawa czasu drugiego członu funkcji.

Współczynnik η_k wyznacza się z zależności:

$$\eta_k = \exp\left(-\frac{\tau_{1k}}{\tau_{2k}} \left(\frac{\eta_k \tau_{2k}}{\tau_{1k}}\right)^{1/n_k}\right) \quad (3)$$

Tabela 3. Parametry funkcji opisanej wzorem (4) [1]

Prąd piorunowy – kolejna składowa wyładowania ujemnego					
k	I_{mk}, kA	$\tau_{1k}, \mu\text{s}$	$\tau_{2k}, \mu\text{s}$	n_k	η_k
1	10,7	0,25	2,5	2	0,639
2	6,5	2,1	230	2	0,874

W pakiecie przyjęto, że prąd u podstawy kanału wyładowania atmosferycznego ma postać zapisaną wzorem:

$$i_{DE}(0,t) = I_m ((1 - e^{-\alpha t}) - (1 - e^{-\beta t})) \quad (4)$$

Przykładowo, podane w normie [5] dla I-ego poziomu ochrony wartość maksymalna i kształty przebiegów prądu, wynoszą dla:

- długotrwałej składowej wyładowania: 400 A; 0,5 s,
- pierwszej składowej wyładowania: 200 kA; 10/350 μs,
- kolejnych składowych wyładowania: 50 kA; 0,25/100 μs.

W normie [5] postać czasowa prądu piorunowego dla pierwszego (10/350 μs) i kolejnych (0,25/100 μs) składowych wyładowań zapisana jest wzorem (o parametrach podanych w tabeli 4):

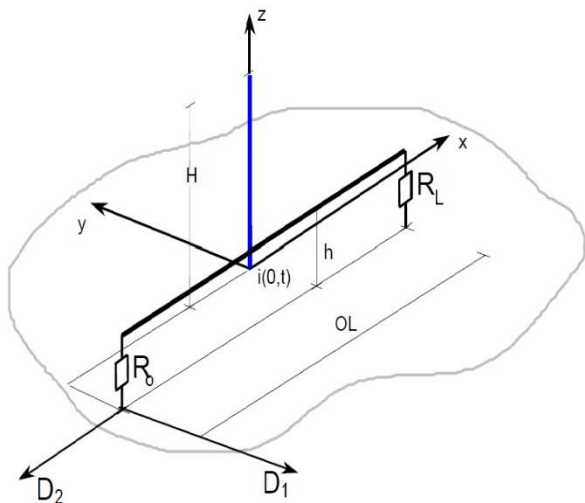
$$i(t) = \frac{I}{k} \frac{(t/\tau_1)^{10}}{1 + (t/\tau_1)^{10}} \exp(-t/\tau_2) \quad (5)$$

gdzie:

- k – współczynnik korekcyjny wartości maksymalnej,
- τ_1 – stała czasowa czoła udaru,
- τ_2 – stała czasowa grzbietu udaru.

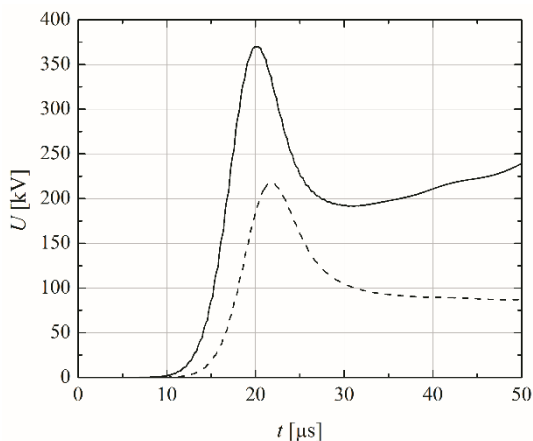
Tabela 4. Parametry udarów piorunowych dla różnych poziomów ochrony odgromowej [5]

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
τ_1 (μ s)	19	19	19	0,454	0,454	0,454
τ_2 (μ s)	485	485	485	143	143	143



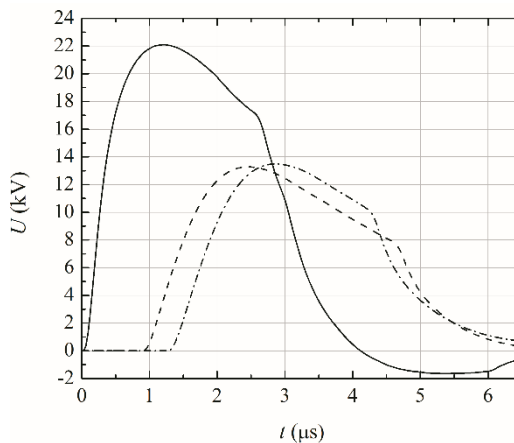
Rys. 2. Układ kanału wyładowania – linia transmisyjna [1]

W modelowaniu dla oszacowanej wartości udaru z rysunku 1.a [3], zmodyfikowano model źródła udaru do wartości maksymalnej pierwszego wyładowania. W normie [5] podane są parametry dla udaru o wartości maksymalnej 150 kV. Takie dane przyjęto do obliczeń (tabela 4). Proponowane jako przykładowe dane w programie LIOV zawierają sygnał wejściowy, czyli prąd pioruna, wprowadzony w danej odległości (rys. 2) od napowietrznej linii transmisyjnej o zadanych parametrach elektrycznych i geometrycznych [9]. Program zawiera również takie dane, jak: czas obserwacji, liczba próbek przyjętych do analizy. Ich wartości wpisuje się w kolejne okna programu.

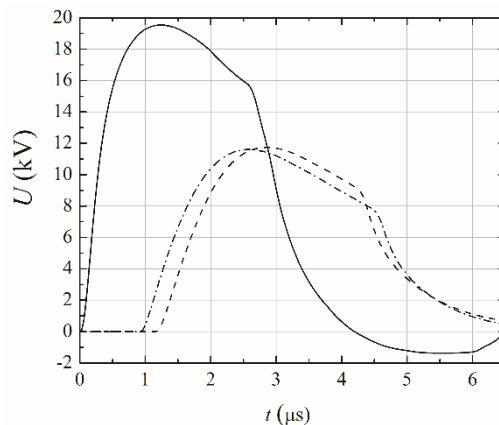


Rys. 3. Przebiegi przepięć dla: linii LPN (dla odległości - 40 m); linie przerywane – przepięcia na obu końcach linii, linia ciągła – napięcie najbliższej kanału wyładowania

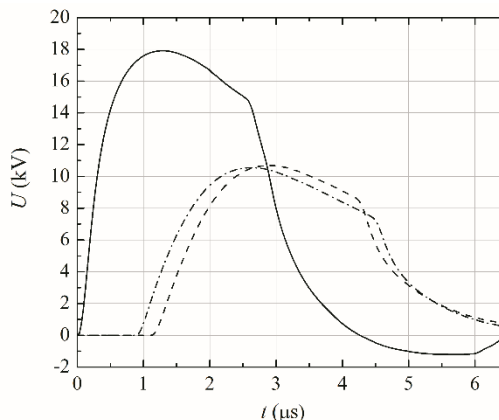
a)



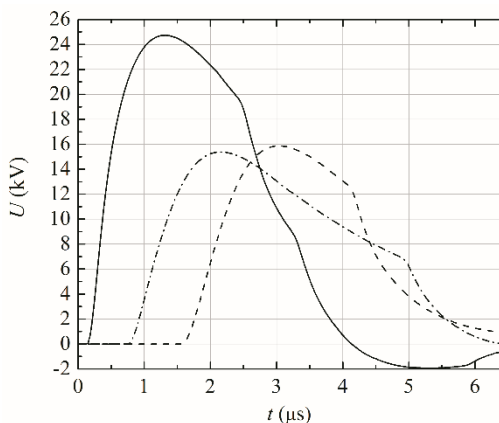
b)



c)



d)



Rys. 4. Przykładowe wyniki dla napięć indukowanych w linii LPN otrzymane w programie LIOV dla lokalizacji udarów (rys. 1.b), oznaczonych numerami: a) 5, b) 6, c) 7, d) 8 i o parametrach, jak w tabeli 2

Do obliczeń dla przewodów LPN o symetrycznym trójkątnym układzie przewodów przyjęto średnicę $d = 1$ cm, jak w przyjętym modelu (rys. 2). Jako obciążenie linii zadano impedancje równe wartości impedancji falowej przewodów (linii LPN). Przyjęty do obliczeń odcinek linii miał długość 1000 m (rys. 1.a). Kanał pioruna usytuowano (w połowie linii) na prostopadłej osi symetrii linii w odległości $y = 40$ m tj. takiej, jak dla analizowanej sytuacji, czyli uderu o wartości około 157 kA. Wyniki przedstawiono na rysunku 3. Dla analizowanego wyładowania atmosferycznego przepięcia indukowane w linii LPN osiągnęły wartości znacznie 350 kV. Z analizy dokumentacji dotyczącej rejestracji usterek urządzeń kolejowych wynika, że ten uder był niszczący dla uszkodzonych urządzeń srk. Celowym byłoby przeprowadzenie podobnej analizy dla napięć indukowanych w kablach zasilających urządzenia srk. Dla wyników analizy zawartych na rysunkach 4.a÷4.d założono, że w połowie linii znajdowała się szafa odcinka blokady liniowej, w której nastąpiło uszkodzenie urządzeń. Kanał pioruna był wprowadzany na prostopadłej osi symetrii linii w odległościach y takich, jak dla wybranych przykładowo zarejestrowanych uderów. Z rysunku 1.b w analizie uwzględniono cztery punkty 5÷8 znajdujące się w pobliżu miejsca uszkodzenia urządzeń zasilających samoczynną blokadę liniową (sbl). Miejsca uderzenia pioruna znajdowały się odpowiednio w odległościach dla kolejnych uderów: 5 - 218 m, 6 - 245 m, 7 - 265 m i 8-190 m od linii LPN. Odległość kanału pioruna od szafy do toru wynosiła odpowiednio dla kolejnych uderów: 5 - 40 m, 6 i 7 - 60 m, 8 - 130 m. W analizie przyjęto jednakową wartość amplitudy prądu uderu, jak w modelu programu LIOV (tabela 4). Przedstawione na rysunkach 4.a÷4.d wyniki analizy ilustrują wpływ odległości uderu od linii LPN na wzrost napięć indukowanych. Linia ciągłą oznaczono napięcie indukowane w miejscu zainstalowania szafy z urządzeniami sbl. Linia kreskowana oznacza przebieg napięcia na początku układu, a linia oznaczona jako kreska-kropka, na końcu analizowanego odcinka 1000 m. Uwzględniając parametry uderów zawarte w tablicy 2 można przypuszczać, że to właśnie ostatni uder nr 8 o wartości maksymalnej 43,8 kA mógł spowodować uszkodzenie urządzeń sbl. Potwierdzają to również rejestracje uszkodzeń urządzeń zasilających sbl.

4. PODSUMOWANIE

Linie potrzeb nietrakcyjnych nie są chronione przewodami odgromowymi. Przepięcia pojawiające się

w przypadku bezpośredniego uderzenia pioruna mogą osiągać wartości megawoltów. Jest to bardzo dużym zagrożeniem dla urządzeń srk i trakcji. Przepięcia indukowane są równie niebezpieczne jak w przypadku bezpośredniego uderzenia pioruna. Chociaż przy uderzeniu pioruna w pobliżu linii potrzeb nietrakcyjnych ich wartości są niższe, to obszar oddziaływania tego rodzaju napięć i liczba wyładowań piorunowych w roku są znacznie większe. Zawarta w artykule analiza, z wykorzystaniem danych dotyczących zarejestrowanych rzeczywistych uderów, może być przydatna w projektowaniu układów zabezpieczających urządzenia srk od przepięć pochodzenia atmosferycznego i koordynacji izolacji.

5. BIBLIOGRAFIA

1. Swanson D.G. Hoefler W.R.J.: Electromagnetic Simulators – Theory and Practice. Proceedings of 15th International Zurich Symposium and Technical Exhibition on Electromagnetic Compatibility, EMC Zurich'03, 18-20 Feb. 2003, pdf files: T3.pdf, 1t3.pdf-8t3.pdf.
2. LIOV: Lightning-Induced Over Voltage Code: <http://www.ing.unibo.it/die/liov/>
3. Materiały udostępnione przez PKP Polskie Linie Kolejowe S.A. Zakład Linii Kolejowych w Rzeszowie ©.
4. Materiały udostępnione przez PKP Polskie Linie Kolejowe S.A. Zakład Linii Kolejowych w Rzeszowie ©.
5. PN-62305-1:2012 (wersja angielska). Ochrona odgromowa - Część 1: Wymagania ogólne.
6. Rakov V.A., Uman M.A.; Lightning Physics and Effects. Cambridge University, 2003.
7. Zofia Wróbel, Robert Ziemia, Mariusz Gamracki: Szacowanie zagrożenia piorunowego sieci trakcyjnych, Technika Transportu Szynowego, nr 11/2008, 31-34.
8. Heidler F.: Traveling Current source model for LEMP calculation. Proceedings of VI Symposium EMC, Zurich 1985 s. 157-162.
9. Napolitano F., Borghetti A., Nucci C.A., Rachidi F., Paolone M.: Use of the full-wave Finite Element Method for the numerical electromagnetic analysis of LEMP and its coupling to overhead lines. Electric Power Systems Research 94 (2013) 24-29.

THE MODELLING OF SURGES INDUCED DUE TO LIGHTNING STROKES IN THE POWER SUPPLY SYSTEMS OF THE RAILWAY TRAFFIC CONTROLLING DEVICES

The tench of the power supply systems of the railway traffic controlling devices needs are not protected by lighting wires. Surges appearing in the case of the direct thunderbolt shock can be a range of megavolts. This is a very large threat for rtc devices and the traction. Surges induced are dangerous the same as in the case of the direct thunderbolt shock. Though, at the shock of the thunderbolt near the line of the power supply systems of the railway traffic controlling devices wires needs, their value is lower, the influence area of such like voltages and the number of fulminic discharges in one year are considerably greater. The contained in the article analysis with the utilization of given data concerning registered real strokes can be useful in the projection of the rtc devices protectors of atmospherical origin surges or of the isolation co-ordination.

Keywords: electromagnetic compatibility, surges induced, numerical modelling.