

doi:10.15199/48.2022.10.34

## Fale napięciowe indukowane w liniach elektroenergetycznych pobliskimi wyładowaniami atmosferycznymi

**Streszczenie.** W ochronie ogromnej obiektów zagrożenie stanowi uderzenia pioruna w obiekt i obok niego oraz uderzenia pioruna między innymi w linie elektroenergetyczne dochodzące do obiektu i w ich pobliżu. Ze względu na zasięg oddziaływania, badanie wpływu pobliskich wyładowań atmosferycznych na linie elektroenergetyczne ma istotne znaczenie w ocenie ryzyka szkód piorunowych. W artykule przedstawiono wyniki symulacji komputerowych mających na celu wyznaczenie fal napięciowych indukowanych w linii elektroenergetycznej SN zasilającej transformator SN/nn dla różnych odległości wyładowania od linii oraz zmiennych parametrów prądu piorunowego przy uwzględnieniu skończonej konduktywności gruntu.

**Abstract.** In lightning protection of buildings, the risk is lightning strikes in and next to the object, and lightning strikes, among others, in power lines reaching the object and strikes in the vicinity of these lines. Therefore, the study of the impact of nearby lightning strikes on power lines is important in assessing the risk of lightning damage. The paper presents the obtained results of computer simulations of the induced voltages in the MV power line supplying the MV/LV transformer for different distances of the lightning channel from the line and variable lightning current parameters, taking into account the finite ground conductivity. (**Voltage waveforms induced in power lines by nearby lightning strikes**).

**Słowa kluczowe:** wyładowania atmosferyczne, ochrona odgromowa, napięcia indukowane, symulacje komputerowe

**Keywords:** lightning discharges, lightning protection, induced voltages, computer simulation

### Wprowadzenie

Wyładowania atmosferyczne doziemne CG (ang. *Cloud to Ground*) [1-3] stanowią duże zagrożenie dla obiektów budowlanych, zarówno w wyniku bezpośredniego uderzenia pioruna w obiekt (zagrożenie pożarowe i porażeniowe dla ludzi, szkody materialne na skutek oddziaływania prądu piorunowego), jak i poprzez indukowanie w okablowaniu strukturalnym fal napięciowych w trakcie wyładowań pobliskich objawiających się w formie przepięć w zasilonych liniach transmisyjnych. Dlatego też w ochronie odgromowej obiektów, przy ocenie ryzyka szkód piorunowych, oprócz bezpośredniego oddziaływania piorunów na obiekt rozpatruje się uderzenia w linie dołączone do obiektu oraz w ich pobliżu, nawet do 2 km od tych linii [4, 5].

W przypadku bezpośrednich wyładowań w linie elektroenergetyczne zagrożenie jest większe, gdyż występuje ryzyko przedostania się do obiektu częściowego prądu pioruna. Jednakże ze względu na stosunkowo mały obszar zbierania bezpośrednich wyładowań, liczba takich zdarzeń jest stosunkowo mała w porównaniu do liczby pobliskich wyładowań doziemnych uderzających w czterokilometrowy pas wokół linii. W związku z tym celowe wydają się analizy tego typu zagrożenia, pomimo iż poziom indukowanych w tym przypadku przepięć jest relatywnie niższy w porównaniu z bezpośrednimi przepięciami atmosferycznymi. Przepięcia pośrednie mogą jednak być przyczyną uszkodzeń lub nieprawidłowego funkcjonowania wrażliwych urządzeń elektrycznych i elektronicznych, jak również powszechnie instalowanych w obiektach budowlanych systemów komputerowych.

W artykule omówiono sposoby modelowania napięć indukowanych w liniach napowietrznych pobliskimi wyładowaniami doziemnymi. Przedstawiono również przykładowe symulacje komputerowe, w których uwzględniono wpływ odległości, kształtu fal różnych rodzajów wyładowań głównych będących składowymi całkowitego prądu piorunowego oraz prędkości przemieszczania się udarów prądowych w kanale piorunowym na indukowane w niezasilonej linii elektroenergetycznej napięcia, zarówno po stronie średniego, jak i niskiego napięcia.

### Modelowanie pośrednich przepięć atmosferycznych

Podczas wyznaczania napięć indukowanych pobliskimi wyładowaniami atmosferycznymi często stosuje się

uproszczone modele pozwalające między innymi oszacować maksymalną wartość tego napięcia. W tym celu wykorzystuje się często wzór [6]:

$$(1) \quad U_m = 36,5 \frac{Ih}{d}$$

gdzie:  $U_m$  – wartość maksymalna indukowanego napięcia w kV,  $I$  – wartość maksymalna prądu pioruna w kA,  $h$  – wysokość linii nad powierzchnią ziemi w m,  $d$  – odległość kanału pioruna od linii.

Zależność do szacowania wartości maksymalnej indukowanego napięcia, z uwzględnieniem prędkości propagacji prądu udarowego w kanale piorunowym ma natomiast postać [6]:

$$(2) \quad U_m = 30 \left( I + \frac{v}{\sqrt{2 \cdot \left(\frac{v}{c}\right)^2}} \right) \frac{Ih}{d}$$

gdzie:  $v$  – prędkość propagacji prądu w kanale,  $c$  – prędkość światła, a pozostałe oznaczenia jak we wzorze (1).

Bardziej dokładne wyznaczenie przepięć indukowanych w napowietrznych liniach elektroenergetycznych wymaga przyjęcia modelu matematycznego, opisującego prawidłowo mechanizm sprzężenia piorunowego pola elektromagnetycznego LEMP (ang. *Lightning ElectroMagnetic imPulse*) na rozpatrywany układ przewodów.

W przypadku linii transmisyjnych do najważniejszych można zaliczyć modele: Ruscka, Chowdhuri-Grossa, Agrawala oraz Taylora. Aktualnie najczęściej używanym w symulacjach komputerowych jest model Agrawala (rys. 1) opisany w przypadku linii bezstratnej zależnościami [7,8]:

$$(3) \quad \frac{\partial u^s(x,t)}{\partial x} + L \frac{\partial i(x,t)}{\partial t} = E_x^i(x,h,t)$$

$$(4) \quad \frac{\partial i(x,t)}{\partial x} + C \frac{\partial u^s(x,t)}{\partial t} = 0$$

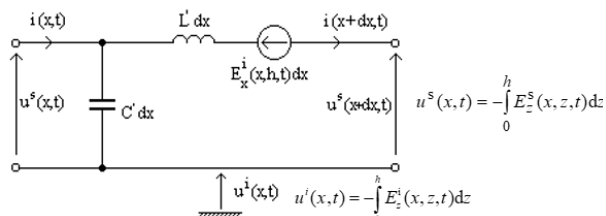
$$(5) \quad u_C(x,t) = u^s(x,t) + u^i(x,t)$$

$$(6) \quad u_C(x,t) = - \int_0^h \{ E_z^s(x,z,t) - E_z^i(x,z,t) \} dz = - \int_0^h E_z(x,z,t) dz$$

gdzie:  $E^s(x,z,t)$  – pole elektryczne rozproszone, będące reakcją linii na umieszczenie jej w zewnętrznym polu elektromagnetycznym;  $E^i(x,z,t)$  – pole elektryczne

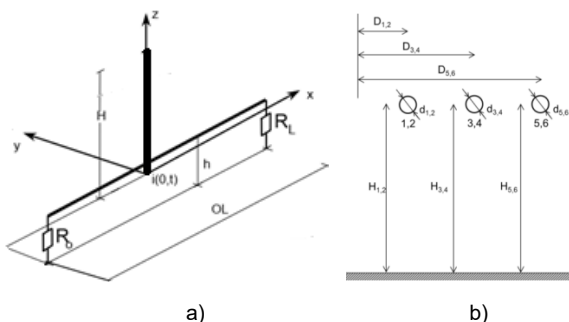
istniejące niezależnie od linii. Napięcie całkowite w linii  $u_c(x,t)$  jest wówczas sumą odpowiednio napięcia rozproszonego  $u^s(x,t)$  i napięcia indukowanego  $u^i(x,t)$ . Pozostałe oznaczenia wyjaśniono na rys. 1.

Model Agrawala został zaimplementowany w module obliczeniowym LIOV (ang. *Lightning-Induced OverVoltages*) wchodzącym w skład pakietu oprogramowania EMTP-RV, wykorzystywanym powszechnie do analizy stanów nieustalonych w systemach elektroenergetycznych [9].



Rys.1. Schemat jednostkowego odcinka linii w modelu Agrawala

Podstawową konfigurację układu zastosowanego w tym artykule do wyznaczania indukowanych fal napięciowych w niezasilonej linii napowietrznej zobrazowano na rys.2. Rysunek ten przedstawia położenie pionowego kanału pioruna o wysokości  $H$  względem linii o długości  $OL$  umieszczonej na wysokości  $h$  nad powierzchnią ziemi.



Rys. 2. Konfiguracja układu: a) do wyznaczania napięć indukowanych w linii w sąsiedztwie kanału piorunowego; b) widok poprzeczny przewodów linii elektroenergetycznej

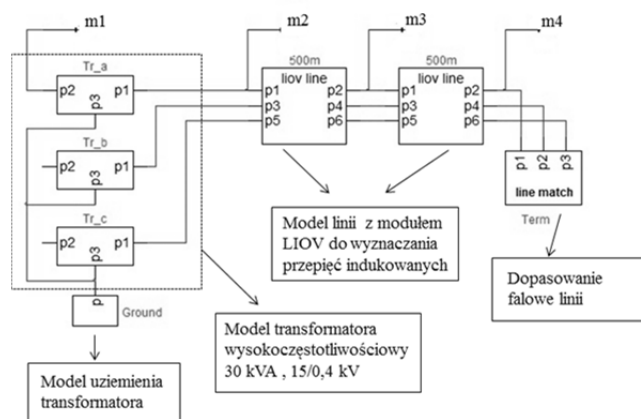
W układzie tym wyznaczono indukowane napięcia atmosferyczne w niezasilonej trójprzewodowej linii napowietrznej z uwzględnieniem geometrii tej linii, kształtu fali prądu piorunowego, odległości kanału piorunowego od linii, rezystywności gruntu oraz prędkości przemieszczania się udaru wyładowania głównego w kanale piorunowym. Z jednej strony linię obciążono impedancją falową natomiast do drugiej strony dołączono wysokoczęstotliwościowy model transformatora SN/nn o mocy 30 kVA [10], co pozwoliło na obserwację indukowanych napięć zarówno po stronie SN jak i nn.

### Symulacje napięć indukowanych w linii

Dla układu jak na rys. 2, wykonano symulacje komputerowe napięć indukowanych w linii o długości 1 km przy położeniu kanału piorunowego w różnych odległościach naprzeciwko jej środka [11,12]. Schemat układu w programie EMTP-RV+LIOV przedstawiono na rys. 3. Reprezentuje on odcinek napowietrznej linii SN w płaskim układzie przewodów niez izolowanych.

W trakcie badań komputerowych wyznaczono przebiegi indukowanych fal napięciowych dla typowych wyładowań doziemnych dodatnich i ujemnych (składowych wieloprądowych wyładowań głównych) o wartości szczytowych prądów piorunowych odpowiadających ich medianom, tj. dla: pierwszego udaru dodatniego 10/350  $\mu$ s,

$I = 35$  kA; pierwszego udaru ujemnego 1/200  $\mu$ s,  $I = 30$  kA; kolejnego udaru ujemnego 0,25/100  $\mu$ s,  $I = 12$  kA.



Rys.3. Schemat symulowanego układu w programie EMTP-RV

W przypadku wyładowań dodatnich brak jest, jak dotychczas, wystarczającej liczby rejestracji kolejnych wyładowań głównych, aby można było oszacować wiarygodną medianę i maksymalne wartości tych składowych prądu piorunowego [1]. Ponadto dla porównania przedstawiono w artykule wartości indukowanych napięć dla prądów piorunowych o wartościach maksymalnych zgodnych z I klasą ochrony odgromowej [4], czyli odpowiednio 200 kA dla pierwszego dodatniego udaru, 100 kA dla pierwszego ujemnego udaru oraz 50 kA dla kolejnego ujemnego udaru.

Celem zbadania wpływu prędkości propagacji udaru względnie kanału piorunowego, do obliczeń przyjęto prędkości  $v = 1,0 \cdot 10^8$  m/s oraz  $v = 1,5 \cdot 10^8$  m/s. Zbadano także wpływ odległości kanału od linii przyjmując wartości  $y_1=50$  m,  $y_2=500$  m i  $y_3=2000$  m.

W tabeli 1 zestawiono wartości maksymalne (szczytowe) indukowanych napięć w linii dla ww. typowych wartości składowych prądu piorunowego, natomiast tabela 2 przedstawia wartości napięć dla maksymalnych prądów piorunowych z normy [4], przy  $v = 1,5 \cdot 10^8$  m/s.

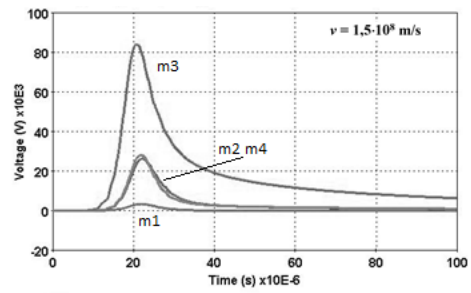
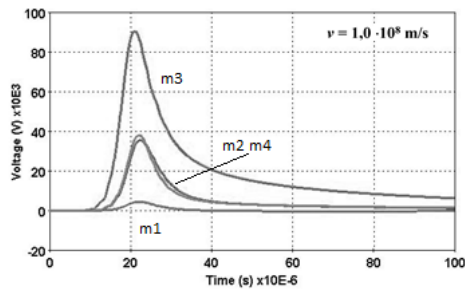
Tabela 1. Wartości maksymalne indukowanych napięć w kV w przypadku typowych wyładowań doziemnych

	1 dod 35 kA		1 ujem 30 kA		Kol ujem 12 kA		
	$v=1,0 \cdot 10^8$	$v=1,5 \cdot 10^8$	$v=1,0 \cdot 10^8$	$v=1,5 \cdot 10^8$	$v=1,0 \cdot 10^8$	$v=1,5 \cdot 10^8$	
y=50	max SN	90	85	190	193	86	92
	max nn	4,5	3,3	13	11	7,4	6,5
y=500	max SN	13,8	14	22	27	9,5	11,8
	max nn	0,8	0,7	1,3	1,5	0,55	0,6
y=2000	max SN	1,25	1,65	3,2	4,5	1,4	8,2
	max nn	0,1	0,13	0,18	0,27	0,08	0,5

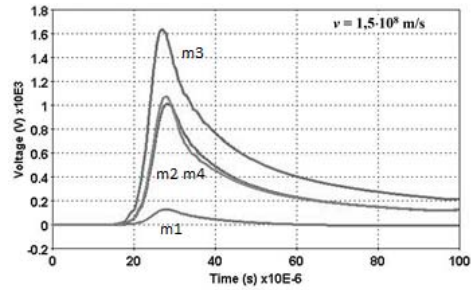
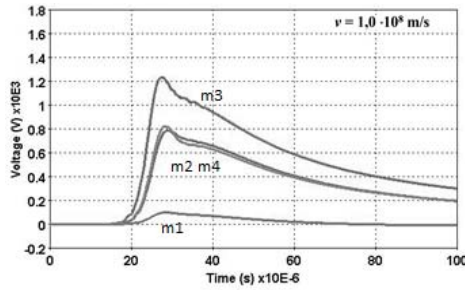
Tabela 2. Wartości maksymalne indukowanych napięć w kV w przypadku prądów przyjętych dla I klasy ochrony odgromowej

	1 dod 200 kA		1 ujem 100 kA		Kol ujem 50 kA	
	y=50	max SN	480	650	380	
	max nn	19	37	27		
y=500	max SN	80	92	49		
	max nn	4	4,8	2,5		
y=2000	max SN	9,4	15	8,2		
	max nn	0,73	0,9	0,5		

Wybrane przebiegi czasowe indukowanych fal napięciowych w linii dla różnych rodzajów wyładowań głównych będących krótkotrwałymi składowymi prądów piorunowych, różnych prędkości  $v$  przemieszczania się w kanale tych składowych oraz różnych odległości kanału pioruna od linii przedstawiono na rysunkach 5, 6 i 7.

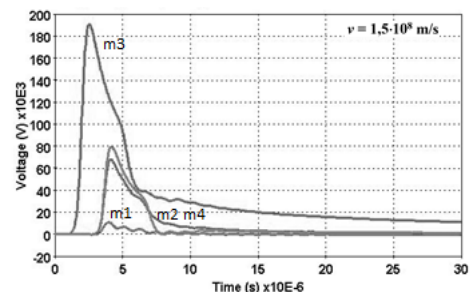
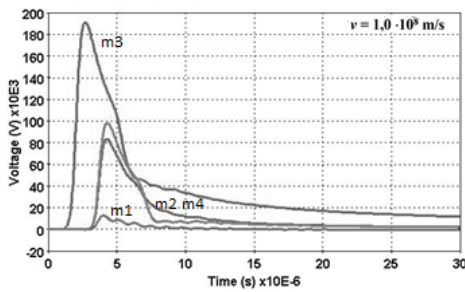


y = 50 m

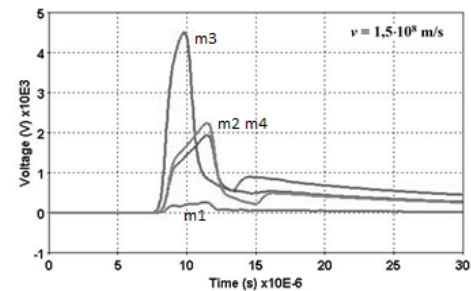
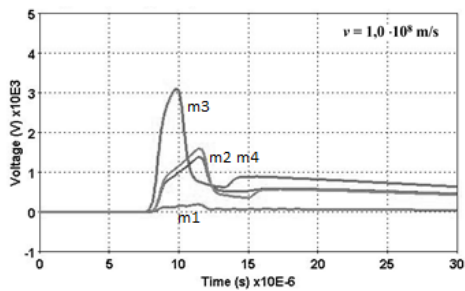


y = 2000 m

Rys. 5. Porównanie indukowanych fal napięciowych dla pierwszego udaru dodatniego 10/350  $\mu$ s,  $I = 35$  kA.

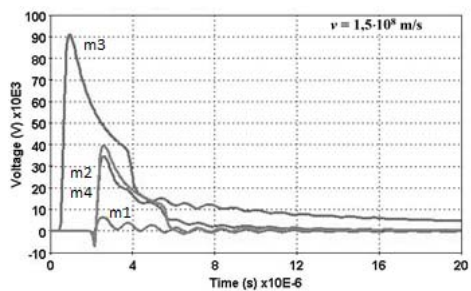
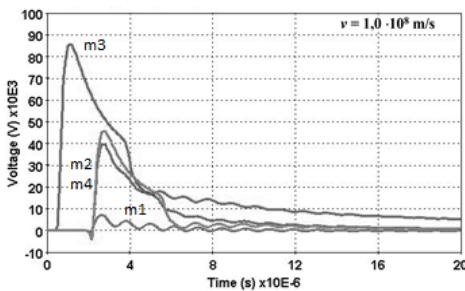


y = 50 m

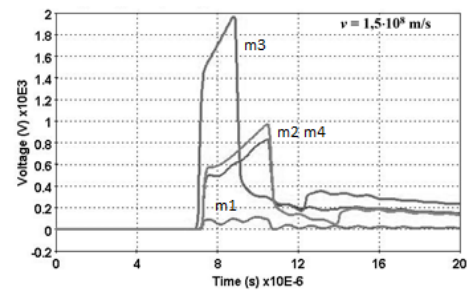
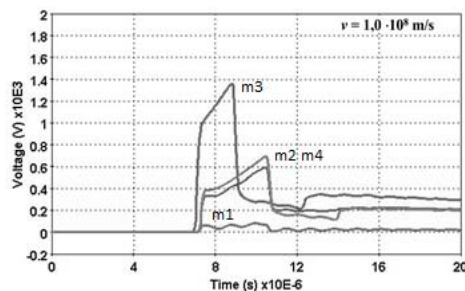


y = 2000 m

Rys. 6. Porównanie indukowanych fal napięciowych dla pierwszego udaru ujemnego 1/200  $\mu$ s,  $I = 30$  kA.



y = 50 m



y = 2000 m

Rys. 7. Porównanie indukowanych fal napięciowych dla kolejnego udaru ujemnego 0,25/100  $\mu$ s,  $I = 12$  kA.

Oznaczenie na wykresach miejsc, w których wyznaczane są przebiegi czasowe ( $m_1$ ,  $m_2$ ,  $m_3$  i  $m_4$ ) jest zgodne z zaznaczonymi punktami na schemacie z rys. 3.

Jak wynika z rys. 5, 6 i 7 (górne wiersze) wpływ prędkości  $v$  w przypadku wyładowań w bezpośrednim sąsiedztwie linii ( $y = 50$  m) jest niewielki. Dla najszybszych kolejnych wyładowań głównych ujemnych  $0,25/100 \mu\text{s}$  można zaobserwować nieznaczny wzrost napięcia szczytowego przy wzroście prędkości  $v$ , natomiast w przypadku pierwszego wyładowania ujemnego  $1/200 \mu\text{s}$  w zasadzie prędkość ta nie wpływa na wartość szczytową indukowanego napięcia. Co ciekawe dla relatywnie wolnozmiennych wyładowań dodatnich  $10/350 \mu\text{s}$  uzyskuje się nawet niewielki spadek napięć indukowanych przy zwiększaniu prędkości udaru wyładowania w kanale piorunowym. Inna sytuacja występuje w przypadku wyładowań odległych ( $y = 2000$  m), dla których wpływ prędkości  $v$  na poziom indukowanych przepięć jest znaczący dla wszystkich rodzajów wyładowań głównych (wzrost 33% dla wyładowań  $10/350 \mu\text{s}$ , wzrost 50% dla wyładowań  $1/200 \mu\text{s}$ , wzrost 42% dla wyładowań  $0,25/100 \mu\text{s}$  - dla napięć indukowanych w środku linii).

Jeśli chodzi o kształty indukowanych napięć to również zależą one od rodzaju wyładowań głównych, a zatem są zdeterminowane konkretnymi kształtami prądu piorunowego. Z uwagi na bardzo strome zbocze narastające prądu o kształcie  $0,25/100 \mu\text{s}$  napięcia indukowane mają w tym przypadku największe oscylacje. Ponadto uwidacznia się wpływ odległości wyładowań od linii na kształt wyznaczonych przebiegów. Istotną rolę ogrywają również parametry gruntu, zwłaszcza dla wyładowań odległych, dla których istotne stają się straty energii przemieszczającej się fali LEMP nad ziemią. Przedstawione wyniki uzyskano zakładając rezystywność gruntu na poziomie  $\rho = 100 \Omega\text{m}$ .

Jeśli chodzi o zagrożenie wynikające z oddziaływania w bezpośrednim sąsiedztwie linii typowych wyładowań to największy poziom napięć generują pierwsze wyładowania główne ujemne (ok. 200 kV), podczas gdy wyładowania dodatnie oraz szybkozmiennie wyładowania kolejne ujemne indukują napięcia na poziomie 90 kV. Jeśli chodzi o napięcia przedostające się poprzez transformator do sieci nn to nie przekraczają one 15 kV w przypadku najbardziej groźnych pierwszych wyładowań ujemnych ( $m_1$  na rys. 5, 6 i 7).

Warto również zauważyć, że dla prądów określonych w normie [4] dla pierwszej klasy ochrony odgromowej maksymalne napięcia mogące się indukować podczas wyładowań w pobliżu linii wynoszą odpowiednio: 650 kV (pierwsze ujemne wyładowanie główne  $1/200 \mu\text{s}$  - 100 kA), 480 kV (pierwsze dodatnie wyładowanie główne  $10/350 \mu\text{s}$  - 200 kA) oraz 380 kV (kolejne ujemne wyładowanie główne  $0,25/100 \mu\text{s}$  - 50 kA). Po stronie niskiego napięcia wyznaczono przebiegi o wartościach szczytowych, które nie przekraczały 40 kV, przy założeniu, że izolacja wysokonapięciowa transformatora nie uległa uszkodzeniu.

## Podsumowanie

W artykule przedstawiono wyniki symulacji komputerowych przepięć indukowanych w linii elektroenergetycznej przez pobliskie uderzenie pioruna. Zbadano wpływ odległości pioruna od linii, kształtu prądu piorunowego oraz prędkości propagacji udarów wzdłuż kanału piorunowego na przebiegi indukowanych fal napięciowych w linii SN i nn.

Na podstawie uzyskanych wyników można stwierdzić, iż przepięcia atmosferyczne pośrednio indukowane w liniach napowietrznych zależą, dla określonych parametrów gruntu, głównie od odległości kanału piorunowego od linii, wartości

szczytowej prądu piorunowego i jego kształtu, oraz od prędkości propagacji fali prądowej wyładowania w kanale piorunowym.

Najwyższego poziomu przepięć indukowanych można spodziewać się w przypadku oddziaływania prądu pierwszych ujemnych wyładowań głównych, które charakteryzują się nieco większymi czasami narastania w porównaniu z kolejnymi wyładowaniami ujemnymi, ale posiadają za to dużo większe wartości szczytowe.

Największy wpływ prędkości przemieszczania się udarów wyładowań głównych w kanale piorunowym na przepięcia atmosferyczne pośrednio występuje w przypadku wyładowań odległych. Zwiększenie prędkości fali prądowej pierwszego wyładowania głównego ujemnego wędrującego od ziemi w kierunku chmury od wartości  $100 \text{ m}/\mu\text{s}$  do  $150 \text{ m}/\mu\text{s}$  skutkuje prawie 50% wzrostem wartości szczytowej indukowanego napięcia w linii odległej 2 km od tego wyładowania.

*Praca finansowana z subwencji Ministerstwa Edukacji i Nauki na utrzymanie potencjału badawczego (UPB) w zakresie dyscypliny automatyka, elektronika i elektrotechnika.*

**Autorzy:** dr hab. inż. Grzegorz Masłowski, prof. PRz, Politechnika Rzeszowska, Katedra Elektrotechniki i Podstaw Informatyki, ul. W. Pola 2, 35-959 Rzeszów, E-mail: maslowski@prz.edu.pl; dr inż. Robert Ziemia, Politechnika Rzeszowska, Katedra Elektrotechniki i Podstaw Informatyki, ul. W. Pola 2, 35-959 Rzeszów, E-mail: ziemia@prz.edu.pl.

## LITERATURA

- [1] Rakov V. A. and Uman M. A., *Lightning: Physics and Effects*. Cambridge, 2003.
- [2] Masłowski G., *Analiza i modelowanie wyładowań atmosferycznych na potrzeby ochrony przed przepięciami*. Rozprawy i monografie, Wydawnictwa AGH, 2010.
- [3] Masłowski G., Rakov V.A.: New Insights Into Lightning Return-Stroke Models with Specified Longitudinal Current Distribution. *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, Vol. 51, No. 3, August 2009, 471–478.
- [4] PN-EN 62305-1 Ochrona odgromowa. Część 1: Zasady ogólne.
- [5] PN-EN 62305-2 Ochrona odgromowa. Część 1: Zarządzanie ryzykiem.
- [6] IEEE Std. 1410-2010 IEEE Guide for Improving the Lightning Performance of Electric Power Overhead Distribution Lines.
- [7] Agrawal A.K., Price H.J., Gurbaxani S.H., "Transient response of a multiconductor transmission line excited by a nonuniform electromagnetic field", *IEEE Trans. on EMC*, Vol. EMC-22, No. 2, pp. 119-129, May 1980.
- [8] Paolone M., Rachidi F., Borghetti A., Nucci C. A., Rubinstein M., Rakov V. A., Uman M. A., Lightning electromagnetic field coupling to overhead lines: theory, numerical simulations, and experimental validation, *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, vol. 51, no. 3, pp. 532–547, Aug. 2009.
- [9] Napolitano, F. ; Borghetti, A. ; Nucci, C. A. ; Paolone, M. ; Rachidi, F. ; Mahseredjian, J., An Advanced Interface Between the LIOV Code and the EMTP-RV, 29th International Conference on Lightning Protection (ICLP), 2008.
- [10] Masłowski G. and Wyderka S., "Modeling of Currents and Voltages in the Lightning Protection System of a Residential Building and an Attached Overhead Power Line," in *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*. vol. 62. no. 5, pp. 2164-2173, Oct. 2020, doi: 10.1109/TEMC.2020.2982127.
- [11] Masłowski G., Ziemia R., T. Kossowski: Overvoltage induced in overhead power lines by nearby lightning stroke. *Przegląd Elektrotechniczny*, 2/2018, 41-44.
- [12] Masłowski G., Ziemia R.: Modelowanie przepięć atmosferycznych w liniach elektroenergetycznych z uwzględnieniem kanału pioruna. *Przegląd Elektrotechniczny*, 3/2007, 153–156.