

Stanisław WOJTAS¹
Marek OLESZ²

UWZGLĘDNIENIE REJESTRACJI WYŁADOWAŃ ATMOSFERYCZNYCH W PROJEKTOWANIU OCHRONY ODGROMOWEJ

W referacie przedstawiono systemy i wstępne wyniki współczesnych rejestracji parametrów wyładowań atmosferycznych na obszarze Polski. Podstawą tych rozważań są wyniki uzyskane z systemu rejestracji LINET, którego jedna z anten znajduje się na terenie Politechniki Gdańskiej. Parametry wyładowań atmosferycznych otrzymane współczesnymi metodami rejestracji antenowych zostały porównane z rejestracjami przeprowadzanymi metodami klasycznymi w ubiegłym wieku. Dotyczy to zwłaszcza gęstości powierzchniowej oraz amplitudy prądu wyładowań atmosferycznych. Obliczenia przeprowadzone na podstawie danych pochodzących z systemu LINET wskazują, że na północ od równoleżnika 51°30' liczba wyładowań na kilometr kwadratowy w latach 2007 – 2012 jest zawarta w granicach od 1,5 do 1,9. Wyniki te są zbliżone z wartością przyjętą w przepisach normalizacyjnych $-1,8/\text{km}^2$. Na południe od równoleżnika 51°30' otrzymano dla poszczególnych lat gęstość wyładowań $3,0 \div 3,4$, co daje wartość średnią $3,2/\text{km}^2$ przekraczającą o prawie 30% dane znormalizowane ($2,5/\text{km}^2$). Prezentowane wstępne wyniki rejestracji wskazują, że gęstość powierzchniowa występowania wyładowań jest większa, a amplituda prądu mniejsza od wartości oszacowanych metodami klasycznymi i wpisanymi do aktów normatywnych.

Słowa kluczowe: wyładowania atmosferyczne, rejestracja wyładowań, ochrona odgromowa

1. Wstęp

Parametry wyładowań atmosferycznych zamieszczone w aktualnie obowiązujących przepisach normalizacyjnych [9, 10] są wynikiem badań prowadzonych w XX wieku. W połowie ubiegłego stulecia nastąpiła znaczna intensyfi-

¹ Autor do korespondencji: Stanisław Wojtas, Politechnika Gdańska, Wydział Elektrotechniki i Automatyki 80 – 234 Gdańsk, ul. Własna Strzecha 18A, 583471611, s.wojtas@ely.pg.gda.pl

² Marek Olesz, Politechnika Gdańska, Wydział Elektrotechniki i Automatyki, 80 – 234 Gdańsk, ul. Własna Strzecha 18A, 583471820, m.olesz@ely.pg.gda.pl

cja badań i obserwacji wyładowań z zastosowaniem klidonografów i pręcików magnetycznych, a potem liczników wyładowań atmosferycznych. Dzięki pracom badawczym prowadzonym w latach 1950 - 1970 pod kierunkiem prof. S. Szpora z Politechniki Gdańskiej, Polska była zaliczana do czołówki światowej w badaniach parametrów wyładowań atmosferycznych. Wyniki tych badań były uwzględniane przy opracowywaniu uzgodnień parametrów prądów piorunowych dla potrzeb normalizacji międzynarodowej.

W ostatniej dekadzie ubiegłego wieku nastąpił intensywny rozwój technik detekcji oraz analizy numerycznej parametrów wyładowań piorunowych opartych na rejestracji pola elektromagnetycznego emitowanego przez kanał piorunowy. W wielu rejonach świata zainstalowano anteny tworzące sieci lokalizacji wyładowań, wspomagane zwykle przez systemy satelitarne.

Etapowi wstępnego rozwoju wyładowania, czyli wyładowaniom strimerowym i liderowym towarzyszy emisja pola elektromagnetycznego wysokiej częstotliwości (VHF), natomiast podczas wyładowania głównego, korzystającego z kanału zjonizowanego wyładowaniem wstępnym, jest emitowana największa energia w paśmie małych (LF) i bardzo małych częstotliwości (VLF). W zależności od częstotliwości sygnałów wykorzystywanych przez detektor (VLF, LF, HF lub VHF), są stosowane różne techniki lokalizacji wyładowań [1].

Do najstarszych metod lokalizacji wyładowań atmosferycznych należy technika detekcji nazywana MDF (Magnetic Direction Finder). W tej technice wykorzystuje się przynajmniej dwie, a lepiej trzy anteny kierunkowe usytuowane w różnych miejscach. Zasada lokalizacji źródła sygnału polega na zarejestrowaniu azymutów (kątów określających kierunek), skąd nadeszły sygnały do każdej z anten i wyznaczeniu punktu leżącego w miejscu przecięcia się prostych odpowiadających tym kierunkom. Metoda MDF wykorzystuje sygnały LF oraz VLF i pozwala na lokalizację wyładowań doziemnych.

System lokalizacji wyładowań nazywany TOA (Time of Arrival) polega na precyzyjnym pomiarze różnicy czasów, w których sygnał ze źródła dotarł do poszczególnych anten. System ten wymaga przynajmniej trzech anten oraz ich precyzyjnej synchronizacji czasowej za pomocą sygnałów z systemu GPS (Global Positioning System). Precyzyjne wyznaczenie momentu dotarcia sygnału do każdej z anten pozwala na wyznaczenie różnic czasowych między poszczególnymi antenami. Stałe różnice czasu dla każdej pary anten tworzą krzywe o kształcie hiperbol. Punkty przecięcia wielu hiperbol wyznaczają miejsce wystąpienia wyładowania. Technika TOA umożliwia wykrywanie zarówno wyładowań doziemnych, jak i między chmurami.

Połączenie technik TOA oraz MDF umożliwiło wzrost dokładności i efektywności lokalizacji wyładowań atmosferycznych i zostało wdrożone jako system pod nazwą IMPACT (Improved Accuracy Using Combined Technology). Dzięki jednoczesnej rejestracji azymutu oraz czasu wyładowania otrzymuje się dobrą dokładność lokalizacji wyładowania nawet w przypadku danych tylko z

dwóch anten. Systemy IMPACT są obecnie instalowane w większości krajów Europy.

Wyładowania atmosferyczne są więc zjawiskiem, które obecny poziom techniki pozwala dokładnie rejestrować ze znacznych odległości. Burze i pioruny z kolei towarzyszą innym zjawiskom atmosferycznym takim jak ulewne deszcze czy huragany, więc detekcja wyładowań piorunowych może ostrzegać o nadciągających żywiołach. Po powodzi 1997 roku w Polsce przystąpiono do budowy nowoczesnego systemu detekcji i lokalizacji chmur burzowych i wyładowań atmosferycznych [2, 3].

Według meteorologów zmiany klimatyczne w postaci ocieplenia klimatu wywołują wzrost liczby wyładowań atmosferycznych. Szacuje się, że liczba wyładowań rośnie o 10 do 100% (średnio ok. 50%) na każdy stopień wzrostu temperatury [4]. Jeżeli przyjąć tezę ekologów na temat ocieplenia klimatu, należy oczekiwać wzrostu gęstości wyładowań piorunowych. Wzrost liczby wyładowań atmosferycznych powinien być uwzględniany podczas projektowania systemów ochrony odgromowej różnych obiektów.

Celem pracy jest przedstawienie wstępnych wyników rejestracji z terenu Polski uzyskanych w ostatnich latach z systemu LINET [13]. Prezentowane dane dotyczą gęstości wyładowań doziemnych oraz amplitudy prądu piorunowego. Zauważony wzrost gęstości wyładowań w stosunku do wytycznych normalizacyjnych może mieć wpływ na projektowanie systemów odgromowych chronionych obiektów.

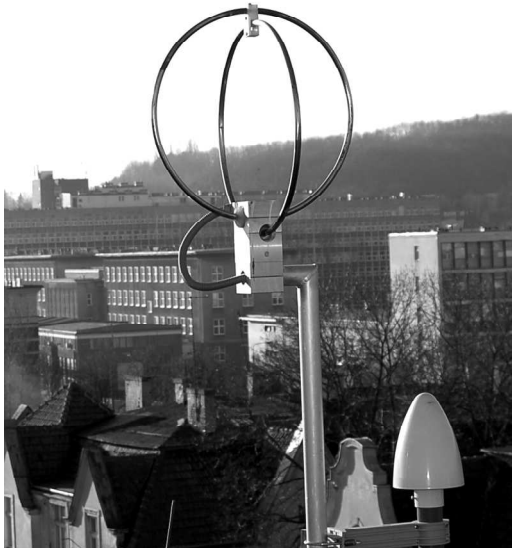
2. Systemy rejestracji wyładowań piorunowych na obszarze Polski

Negatywne skutki powodzi w 1997 r. wpłynęły na przyspieszenie prac nad budową polskiego systemu rejestracji i lokalizacji wyładowań atmosferycznych, który jednocześnie jest elementem systemu ostrzegania o niebezpieczeństwie intensywnych opadów. W 2002 r. rozpoczął pracę system detekcji i lokalizacji wyładowań atmosferycznych PERUN złożony z 9 anten SAFIR 3000 firmy Vaisala-Dimensions zainstalowanych w: Warszawie, Białymstoku, Olsztynie, Kaliszu, Gorzowie Wlkp., Toruniu, Włodawie, Sandomierzu i Częstochowie. System SAFIR bazuje na interferometrycznej technice pomiaru różnicy faz fali elektromagnetycznej docierającej do poszczególnych elementów anteny. Rozmieszczenie anten co około 200 km pozwala na 1-kilometrową dokładność lokalizacji wyładowań atmosferycznych i skuteczność na poziomie 95%. Stacje detekcji są synchronizowane za pomocą satelitarnego systemu GPS. System PERUN zapewnia takie informacje na temat wyładowań jak: miejsce (długość i szerokość geograficzna), wartość maksymalna prądu, czasy narastania i zaniku impulsu prądowego, typ wyładowania i jego polaryzacja [2].

W ostatnich kilku latach zespół pod kierownictwem prof. Betza z Uni wer-

sytetu w Monachium wprowadził i ciągle rozwija nowy system lokalizacji wyładowań atmosferycznych o nazwie LINET. System ten działa w oparciu o technikę TOA, a obróbka danych w programie 3D pozwala na lokalizację zarówno wyładowań doziemnych jak również między chmurami. System LINET charakteryzuje się właściwościami, które podnoszą jego użyteczność, np. zbliżona czułość w wykrywaniu wyładowań doziemnych i między chmurami, możliwość detekcji wysokości źródła emisji w przypadku wyładowań między chmurami, dobra dokładność lokalizacji wyładowania oraz niskie koszty instalacji i eksploatacji systemu [5].

Początkowo system LINET był ograniczony do terytorium Niemiec, ale w 2006 roku rozpoczęto jego rozszerzanie na obszar krajów sąsiadujących. W 2007 r. w Polsce zainstalowano 5 stacji, a dziś łączna liczba anten LINET w naszym kraju wynosi 14. W Gdańsku stacja została zainstalowana przed sezonem burzowym 2007 na budynku Katedry Wysokich Napięć i Aparatów Elektrycznych PG. Rysunek 1 przedstawia fotografię stacji składającej się z anteny o podwójnej, skrzyżowanej pętli do pomiaru pola elektromagnetycznego oraz anteny GPS do precyzyjnego pomiaru czasu. Każda stacja jest wyposażona w komputer z ciągłym połączeniem internetowym i możliwością przesyłania danych do bazy w Monachium [6].



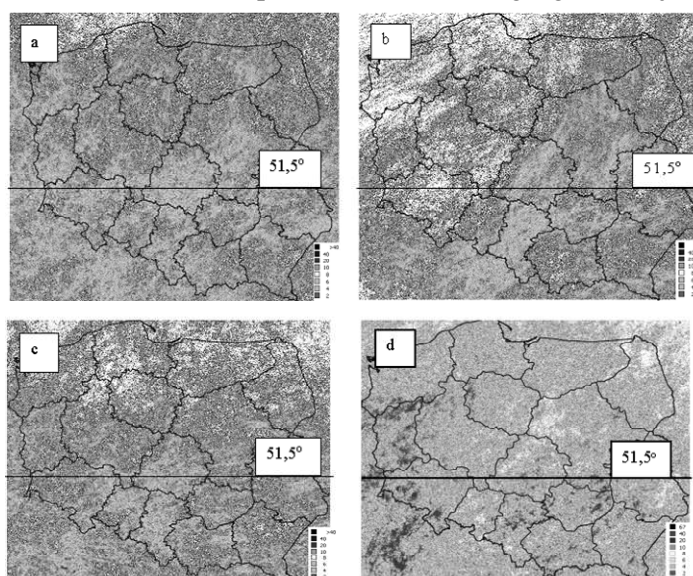
Rys. 1. Widok anteny systemu LINET zainstalowanej na jednym z budynków PG

Fig. 1. View of the LINET system antenna installed on a GUT building

Wyładowania atmosferyczne pojawiające się nad Europą w rejonie naszego kraju są lokalizowane przez różne systemy rejestracji i ich rozwój oraz kierunki przemieszczania się mogą być śledzone na bieżąco na stronach internetowych poszczególnych operatorów, np. EUCLID, BLIDS czy SAFIR [11, 12, 13]. System wczesnego ostrzeżenia o zbliżającej się burzy może być użyteczny dla firm, których charakter działalności powoduje uzależnienie ciągłości pracy od zagrożeń powodowanych wyładowaniami atmosferycznymi.

3. Wyniki rejestracji z systemu LINET

Dane odnośnie gęstości wyładowań zostały udostępnione przez operatora sieci LINET w postaci pliku tekstowego bazującego na układzie ETRS89 oraz systemie współrzędnych Poland CS92, zawierającego liczbę wyładowań doziemnych na kilometr kwadratowy analizowanej powierzchni. Liczba wierszy pliku odpowiadała powierzchni prostokąta opisanego na konturze granic Polski, tj. ok. 480000. Do wizualizacji danych został wykorzystany program MapInfo generujący mapy obrazujące gęstość doziemnych wyładowań atmosferycznych na obszarze Polski w latach 2007 – 2012 (rys. 2). Na poszczególnych mapach dodatkowo zaznaczono położenie szerokości geograficznej $51,5^{\circ}$.



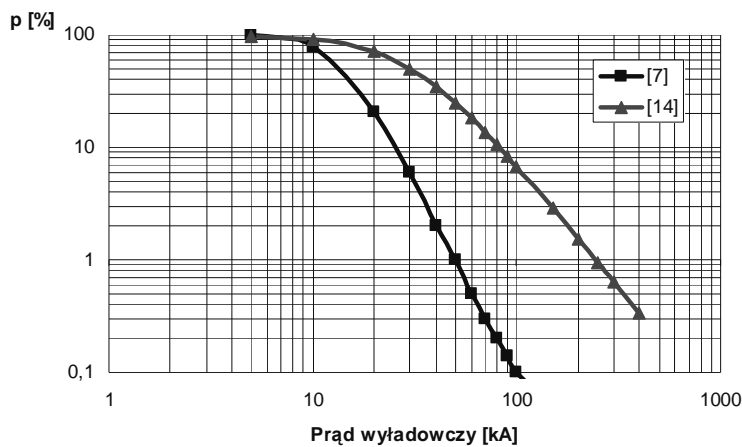
Rys. 2. Gęstość wyładowań atmosferycznych doziemnych (liczba na kilometr kwadratowy) na obszarze Polski zarejestrowana przez system LINET: w roku 2007 – a, w 2008 – b, w 2009 – c, w 2012 – d

Fig. 2. The density of lightning strokes (number per square kilometer) in the Polish registered by the system LINET: in 2007 - and in 2008 – b, in 2009 – c, in 2012 – d

Przy podejmowaniu decyzji o stosowaniu urządzenia piorunochronnego w danym obiekcie należy uwzględnić między innymi gęstość wyładowań na kilometr kwadratowy. Zaznaczona na mapach pokazanych na rysunku 2 linia równoleżnikowa $51^{\circ}30'$ wskazuje, że stosowany sposób podziału kraju na strefy charakteryzowane przez średnie roczne liczby wyładowań 1,8 oraz $2,5/\text{km}^2$ może znacznie odbiegać od gęstości rzeczywistej.

Obliczenia przeprowadzone na podstawie danych przedstawionych na mapach z rysunku 2 wskazują, że na północ od równoleżnika $51^{\circ}30'$ liczba wyładowań na kilometr kwadratowy w latach 2007 – 2012 jest zawarta w granicach od 1,5 do 1,9. Wyniki te są zbliżone do wartości pochodzących ze starszych badań i przyjętych w przepisach normalizacyjnych jako $1,8/\text{km}^2$. W rezultacie analogicznych obliczeń przeprowadzonych dla obszaru na południe od wspomnianego równoleżnika otrzymano dla poszczególnych lat gęstość wyładowań w granicach od 3,0 do 3,4, co daje wartość średnią $3,2/\text{km}^2$. W tym przypadku występuje większa, prawie 30%, różnica w stosunku do wartości znormalizowanych. Jeszcze większą gęstość uzyskano dla prostokąta o powierzchni ok. 20000 km^2 opisanego na obszarze województwa Śląskiego, gdzie średnia gęstość wyładowań w analizowanym okresie wynosi 4,6. Wartość ta prawie 2-krotnie przewyższa dane dotychczas używane w procesie projektowania ochrony odgromowej.

Różnice między wynikami uzyskanymi w ubiegłym wieku metodami klasycznymi, a współczesnymi rejestracjami dotyczą także amplitud prądu, co można zauważyć na rysunku 3.



Rys. 3. Krzywe procentowe szczytowych wartości prądów piorunowych: 1 - wyniki z systemu LINET [7], 2 - badania z ubiegłego wieku [14]

Fig. 3. Percentage curves of peak lightning currents: 1 - results from the LINET system [7], 2 - studies of the last century [14]

Według metod klasycznych średnia wartość prądu piorunowego (odpowiadająca prawdopodobieństwu 50%) wynosi 30 kA, a podobna wartość uzyskana z systemu LINET jest szacowana na ok. 14 kA [7]. Ta okoliczność, po weryfikacji wyników, może wpłynąć na podniesienie poziomu rzeczywistego bezpieczeństwa przy wybranych poziomach ochrony, co można zauważyć w tabeli 1.

Tabela 1. Rozkład amplitud prądu [7, 14] oraz poziomy i skuteczność ochrony odgromowej dla obszaru Polski

Table 1. Distribution of current amplitudes [7, 14], and the levels and effectiveness of lightning protection for Polish area

Lp.	Amplituda [kA]	Prawdopodobieństwo amplitudy		Poziom ochrony	Skuteczność systemu [%]
		Badania klasyczne [%]	Rejestracje współczesne [%]		
1	14	8,4	50,0		
2	20	30	78,1		
3	30	50,0	93,51		
4	50	74,5	98,94		
5	100	94,4	99,94	III, $i < 100$ kA	90
6.	150	97,2	99,99	II, $i < 150$ kA	95
7.	200	98,5	99,998	I, $i < 200$ kA	98

4. Wpływ wyników rejestracji na dobór urządzeń ochrony odgromowej

Możliwy wpływ przedstawionych wyników rejestracji na projektowanie ochrony odgromowej został przedstawiony na przykładzie 4 kondygnacyjnego budynku mieszkalnego o powierzchni 35 m x 14 m i wysokości 11 m położonego w województwie Śląskim.

W celu wykonania szacunkowych obliczeń dla powyższej lokalizacji zastosowano według nieobowiązującej normy PN-E 5003 [8] wskaźnik zagrożenia piorunowego:

$$W = n \cdot m \cdot N \cdot A \cdot p \quad (1)$$

gdzie: n - współczynnik zależny od liczby przebywających osób,

m - współczynnik zwartości zabudowy,

N - gęstość roczna wyładowań na metr kwadratowy,

A - powierzchnia równoważna zbierania wyładowań przez obiekt,

p - prawdopodobieństwo wywołania szkody przez wyładowanie.

Zakładając, że w analizowanym budynku mieszkalnym przebywa nie więcej niż 1 osoba na 10 m^2 , brak zabudowy zwartej, obiekt wykonany z materiałów niepalnych z typowym wyposażeniem, wskaźnik zagrożenia piorunowego według wzoru (1) wynosi $4,1 \times 10^{-5}$ dla obowiązującej na tym terenie gęstości normatywnej wyładowań $2,5 \times 10^{-6} \text{ m}^{-2}$. Taki wskaźnik zagrożenia upoważnia do stwierdzenia, że zagrożenie jest małe i ochrona odgromowa jest zbędna.

Przyjmując w przedstawionych powyżej obliczeniach gęstość wyładowań o wartości 3,2, jak to wynika z rejestracji LINET, wskaźnik zagrożenia wzrasta do $5,2 \times 10^{-5}$, co oznacza średnie zagrożenie piorunowe i zalecenie ochrony. Zakładając liczbę wyładowań $4,6 \times 10^{-6} \text{ m}^{-2}$, która została obliczona z rejestracji dla rejonu województwa Śląskiego, wskaźnik zagrożenia piorunowego analizowanego obiektu wzrasta do $7,5 \times 10^{-5}$, i przez to zbliża się do klasyfikowanego jako duże zagrożenie wymagające koniecznej ochrony odgromowej.

Zgodnie z wymaganiami normy [9] chcąc uzyskać odpowiednio niski poziom ryzyka utraty życia ludzkiego, przy założeniu średniego poziomu paniki w obiekcie (4 kondygnacje), zasilania kablowego z bliskim sąsiedztwem stacji SN/nn oraz trzech dodatkowych, nieekranowanych linii kablowych dochodzących do obiektu należy zastosować następujące alternatywne rozwiązania:

- w przypadku gęstości normatywnej wyładowań $2,5 \times 10^{-6} \text{ m}^{-2}$ nie trzeba stosować ochrony odgromowej i przeciwprzebieciowej,
- w przypadku gęstości normatywnej wyładowań $3,2 - 4,5 \times 10^{-6} \text{ m}^{-2}$ trzeba zastosować ochronę odgromową klasy 4 i przeciwprzebieciową na wprowadzeniu linii do obiektu.

Z przeprowadzonych obliczeń wynika, że ze względu na mniejsze prawdopodobieństwo wystąpienia wysokich amplitud rejestrowanych prądów piorunowych, jak to zostało przedstawione w tabeli 1, poziomy ochrony wyznaczane na podstawie obecnych przepisów mogą okazać się przewymiarowane.

5. Przykłady wyładowań w niskie obiekty budowlane

W czasie silnych wyładowań atmosferycznych w okolicach Gdańska we wrześniu 2010 roku miały miejsca bezpośrednie trafienia pioruna w stosunkowo niskie domy jednorodzinne. Ciekawy przypadek wystąpił w jednej z dzielnic Gdańska, gdzie dom w czasie budowy zlokalizowany w pobliżu wieży kościoła, ale jednak poza jej strefą ochronną został trafiony bezpośrednio przez wyładowanie atmosferyczne. Skutkiem przepływu prądu wyładowczego przez prowizoryczną, niedokończoną instalację piorunochronną nastąpiło zapalenie elementów konstrukcyjnych budynku (rys. 4).

Inny przypadek miał miejsce w pobliżu Gdańska, gdzie wystąpiło bezpośrednio lub pobliskie wyładowanie atmosferyczne do obiektu nie wyposażonego w instalację piorunochronną. Na dachu budynku, o konstrukcji podobnej jak na

rysunku 4, pokrytego dachówką ceramiczną wyprowadzono kominki wentylacyjne, kwasoodporną rurę pieca gazowego oraz antenę satelitarną, które wyprowadzały potencjał ziemi na górne powierzchnie obiektu. W otoczeniu domu znajdowały się budynki o podobnej konstrukcji i wysokości.



Rys. 4. Szkody wywołane w budynku bezpośrednio uderzonego piorunem. Nieprawidłowe wymiary zwodu pionowego – zbyt duży kąt ochronny

Fig. 4. The damage caused to the building by a direct lightning stroke. Incorrect vertical dimensions of the air terminal - too large protection angle

Zasilanie budynku odbywało się ze złącza kablowego zintegrowanego z pomiarem energii elektrycznej do którego dochodził 4-przewodowy kabel typu YAKY 4x120 mm², a dalej do budynku oddalonego o ok. 50 metrów przewód YKY 5x10 mm² prowadzony w ziemi na głębokości 0,7 m. W budynku wg projektu powinny być umieszczone 4 ograniczniki przepięć, w rzeczywistości zastosowano błędnie tylko 3 o napięciu obniżonym 1200 V przy udarowym prądzie wyładowczym 5 kA.

W budynku mieszkalnym uszkodzeniu uległy urządzenia elektroniczne o dość przypadkowej lokalizacji. Uszkodzenia miały miejsce na obu poziomach mieszkalnych oraz na zewnątrz budynku (domofon). We wnętrzu uległy uszkodzeniu elementy elektroniczne urządzeń pracujących w II klasie izolacji – takie jak sterownik do podlewania ogrodu, sterownik pieca, amplituner, dekodery cyfrowy, DVD, monitor ciekłokrystaliczny.

Na podstawie przedstawionych przypadków zagrożenia wyładowaniami atmosferycznymi obiektów niskich należy zauważyć, że w przypadku instalacji na dachu anten, odbiorników elektrycznych, czy elementów wynoszących potencjał ziemi na górne części budynku należy zgodnie z zaleceniami najnowszej edycji norm [9, 10] wykonywać ochronę odgromową.

6. Wnioski

Wyładowania atmosferyczne pojawiające się nad Polską mogą być lokalizowane przez różne systemy detekcji i lokalizacji, które pokrywają obszar naszego kraju. Umożliwia to porównywanie wyników parametrów wyładowań otrzymywanych z poszczególnych systemów, co pozwala na weryfikowanie wiarygodności i czułości poszczególnych systemów.

Parametry wyładowań atmosferycznych uzyskiwane ze współczesnych systemów lokalizacji i detekcji różnią się od wyników sprzed pół wieku otrzymanych metodami klasycznymi, np. podobna liczba dni burzowych, ale większa liczba wyładowań przy mniejszych amplitudach prądu, linia podziału kraju na 2 strefy aktywności burzowej powinna prawdopodobnie przebiegać bardziej na północ od obecnie obowiązującej.

Przyjęcie uzyskanej z przedstawionych rejestracji zwiększonej gęstości wyładowań może nie tylko zmieniać projektowany poziom ochrony odgromowej, lecz także decydować o zastosowaniu ochrony do obiektu, który jej nie wymagał przy normatywnych gęstościach. Natomiast mniejsze amplitudy prądu wynikające z rejestracji mogą obniżać wymagane w dotychczasowych przepisach poziomy ochrony.

Dane z systemu LINET wskazują, że rejon Gdańska należy do obszarów w Polsce o najmniejszej aktywności burzowej. Jednak i w tym rejonie mogą występować uderzenia w obiekty, które według obowiązujących przepisów zostały uznane za bezpieczne z punktu widzenia wyładowań atmosferycznych.

Literatura

- [1] Cummins K., Murphy M.: Overview of Lightning Detection in the VLF, LF and HF Frequency Ranges, Int. Conf. on Lightning Detection (ICLD), Tucson 2000
- [2] Bodzak P.: System detekcji i lokalizacji wyładowań atmosferycznych, Gazeta Obserwatora IMGW nr 5, 2004
- [3] Łoboda M.: Lokalizacja i rejestracja wyładowań atmosferycznych na obszarze Polski, Elektro-Info, Nr 3, 2003.
- [4] Price C.: Thunderstorms, Lightning and Climate Change, 29-th ICLP, 2008 Uppsala
- [5] Łoboda M. i inni: New Lightning detection Networks in Poland - LINET and LLDN, 29-th ICLP, 2008 Uppsala
- [6] Wojtas S., Olesz M.: Rejestracja wyładowań atmosferycznych w Polsce, Gdańskie Dni Elektryki – 2008
- [7] Kminikowski M.: Wyniki współczesnych rejestracji wyładowań atmosferycznych, Praca dyplomowa, Wyd. EiA PG, 2010.
- [8] PN-E-05003.01:1986 Ochrona odgromowa obiektów budowlanych. Wymagania ogólne
- [9] PN-EN 62305-2:2012E Ochrona odgromowa. Część 2: Zarządzanie ryzykiem.

- [10] PN-EN 62305-3:2011E Ochrona odgromowa. Część 3: Uszkodzenia fizyczne obiektów budowlanych i zagrożenia życia.
- [11] Strona internetowa: <http://www.euclid.org>
- [12] Strona internetowa: <http://www.pa.op.dlr.de/linet/>
- [13] Strona internetowa : <http://www.nowcast.de>
- [14] Szpor S., Samuła J., Ochrona odgromowa t.1, WNT, Warszawa 1983

TAKING INTO ACCOUNT OF LIGHTNING DISCHARGE RECORDINGS IN LIGHTNING PROTECTION DESIGN

Summary

The paper deals with systems as well as initiated results of lightning detection in Poland. Basic results of the presentation are general characteristics of the LINET system. One of its sensors has been installed in Gdańsk University of Technology. Lightning current parameters obtained using present methods have been compared with those obtained about a half century ago with classic methods. Problems to be taken into consideration refer to both surface density of lightning strokes and their current amplitudes.

Accounts carried out on base of data from the LINET system indicate, that a number of lightning strokes on square kilometer on north from the parallel of $51,30^{\circ}$ in 2007 – 2012 years is included in a range from 1,5 to 1,9. These results are consistent with the value adopted in the standardization regulations - $1.8 / \text{km}^2$. On south from the parallel of $51,30^{\circ}$ discharge density calculated in the same way is included in a range from 3.0 to 3.4 and it gives an average value of $3.2 / \text{km}^2$ exceeding by almost 30% normalized data ($2.5 / \text{km}^2$).

Presented results indicate, that a surface density of lightnings seems to be higher than that obtained by classic methods and their amplitudes seem to be lower in comparison to those evaluated in previous century and introduced to standard regulations. Lightning flash localization and detection results can have an influence on lightning protection system design methods in future.

Keywords: lightning discharge, lightning detection, lightning protection

DOI: 10.7862/re.2013.24

Tekst złożono w redakcji: lipiec 2013

Przyjęto do druku: grudzień 2013

Zofia WRÓBEL¹

WYBRANE ZAGADNIENIA W MODELOWANIU ZAGROŻENIA PIORUNOWEGO SIECI TRAKCYJNYCH DLA USZYNIEŃ GRUPOWYCH W UKŁADZIE OTWARTYM

W referacie przedstawiono model odcinka sieci trakcyjnej z uszynieniami grupowymi w układzie otwartym przy uwzględnieniu wymuszenia o kształcie $8/20 \mu\text{s}$ dla udaru prądowego i $1,2/50 \mu\text{s}$ dla udaru napięciowego. Do analizy przyjęto 54 sekcje uszynienia grupowego. W tym celu opracowano modele poszczególnych elementów układu: sieć trakcyjna, sieć szynowa, słup, izolator, odgromnik, udar. Zaprezentowano możliwości symulacji przy zastosowaniu programu LTspice i wykazano celowość podejmowania problemu ochrony przepięciowej sieci trakcyjnych i urządzeń sterowania ruchem kolejowym. Przedstawiono wyniki modelowania impulsowych zaburzeń elektromagnetycznych wywołanych wyładowaniami atmosferycznymi, które stanowią poważne zagrożenie dla pracy elektronicznych urządzeń sterowania ruchem kolejowym i telekomunikacyjnych. Rozeznane możliwości programu symulacyjnego z zastosowaniem przedstawionych modeli elementów sieci trakcyjnych mają charakter poznawczy i zostaną wykorzystane do dalszej analizy i oceny zagrożenia układów zasilających urządzenia srk powodowanych zwarciami i przepięciami pochodzenia atmosferycznego. Otrzymane wyniki symulacji komputerowych mogą stanowić narzędzie wspomagające pomiary i projektowanie ochrony przepięciowej.

Słowa kluczowe: sieć trakcyjna, sieć szynowa, słup, izolator, odgromnik, udar.

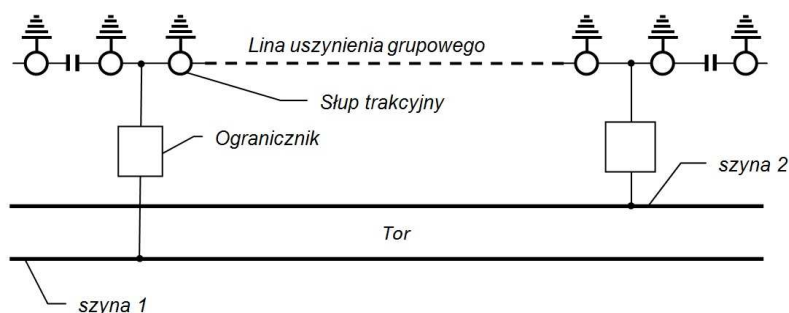
1. Wprowadzenie

System uszynień grupowych w układzie otwartym powinien zapewniać wyłączalność zwarć będących następstwem uszkodzeń izolacji głównej sieci trakcyjnej (zerwaniem przewodów sieci jezdnej i opadnięciem na konstrukcje włączone do uszynienia grupowego). Powinien również powodować zmniejszenie potencjałów międzytorowych i potencjałów szyn względem ziemi do wartości bezpiecznych szczególnie przy powstaniu przerwy w powrotnej sieci trak-

¹ Zofia Wróbel, PKP PLK S.A., Zakład Linii Kolejowych w Rzeszowie, 35-005 Rzeszów, ul. Batorego 26, tel.17 7111343, zwrobel@prz.edu.pl

cyjnej. W wyniku takich oddziaływań, elektroniczne urządzenia sterowania ruchem kolejowym są narażone na częste uszkodzenia oraz mogą one powodować błędy przy przesyłaniu sygnałów. Uszkodzeniu ulegają elementy urządzeń srk, a nawet zniszczone zostają kompletne urządzenia.

System uszynień grupowych w układzie otwartym składa się z sekcji o długości $2,5 \div 3,5$ km. Ogólny schemat przyjętego do obliczeń modelu sieci zasilającej i powrotnej przedstawiono na rysunku 1 [4, 5]. W układzie tym wszystkie konstrukcje wsporcze sieci trakcyjnej są elektrycznie połączone liną, której końce poprzez ograniczniki niskonapięciowe wielokrotnego działania i przewody w izolacji są połączone do szyny. Konstrukcje wsporcze sekcji uszynienia grupowego są uziemione indywidualnie.



Rys.1. Fragment systemu uszynienia grupowego w układzie otwartym [4, 5]

Fig. 1. The schema of the group connection to the rail system in the open lay-out [4, 5]

W stanie pracy normalnej ograniczniki stanowią izolację pomiędzy liną uszynienia grupowego a szynami toru kolejowego. Uszkodzenie izolacji sieci jezdnej powoduje zadziałanie ograniczników, które przechodząc w stan przewodzenia zamykają pętlę zwarciovą.

2. Model układu

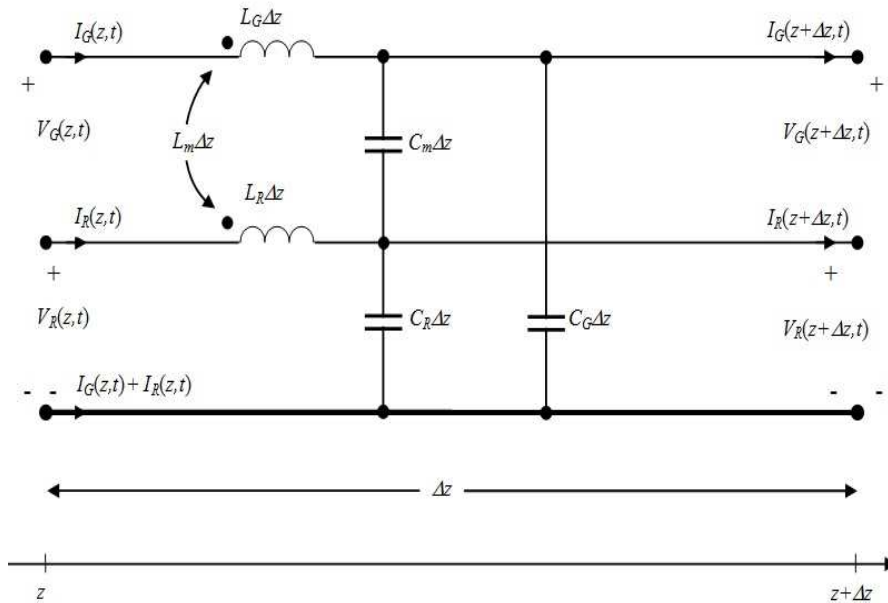
Do modelowania przyjęto jedną sekcję uszynienia grupowego zawierającą 54 odcinki. Długość odcinków odpowiadającą odległości pomiędzy słupami trakcyjnymi przyjęto równą 64 m [7].

W modelowaniu uwzględniono pięć przewodów: linę uszynienia grupowego, linę nośną, sieć trakcyjną oraz dwa przewody jako szyny. Dodatkowo wprowadzono połączenia wyrównawcze pomiędzy szynami co około 300 m [18, 19]. Do analizy przyjęto, że prędkość rozchodzenia się fal jest równa prędkości światła oraz nie uwzględniono odbić fal prądowych od szczytu kanału wyładowania [17].

2.1. Model wieloprzewodowej linii bezstratnej

W analizie linii wieloprzewodowych podstawowym założeniem jest przyjęcie rozchodzenia się linii pola elektromagnetycznego w postaci poprzecznej fali TEM (ang. Transverse Electro-Magnetic) [9]. Oznacza to, że wektory natężenia pól elektrycznego i magnetycznego są do siebie prostopadłe i leżą w płaszczyźnie (xy) oraz są prostopadłe do kierunku rozchodzenia się fali (z). Straty w linii powstają w wyniku dwóch mechanizmów: strat w przewodach (straty podłużne) i strat w otaczającym ośrodku (straty poprzeczne). Dla wyznaczenia parametrów sprzężenia indukcyjnego i pojemnościowego, można pominąć straty w formułowaniu równań wieloprzewodowej linii długiej (MTL - Multiconductor Transmission Lines). Upraszcza to rozwiązanie i daje podstawy do dokładnego wyznaczenia parametrów sprzężenia. Aby uzyskać równania wieloprzewodowej linii długiej wyznacza się jednostkowy, równoważny układ sekcji o długości Δz , jak przedstawiono na rysunku 2. Wzajemnie sprzężone przewody (G) i (R) mają te same parametry jednostkowe: indukcyjności L_G i L_R i wzajemną jednostkową indukcyjność L_m .

Jako założenia upraszczające do analizy przyjęto, że prędkość rozchodzenia się fal jest równa prędkości światła i nie uwzględniono odbić fal prądowych.



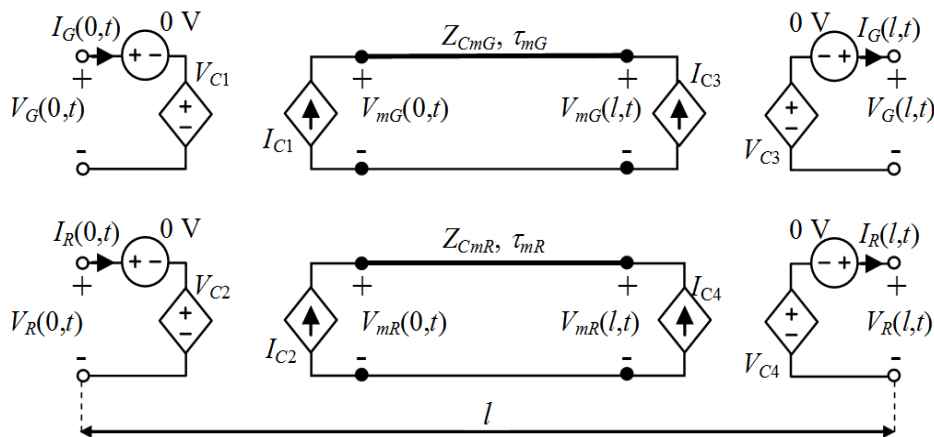
Rys. 2. Jednostkowa sekcja elementarna dwuprzewodowej linii bezstratnej [9]

Fig.2. The individual elementary section of the loss-free two-wire line [9]

Prądy wzdlużne wytwarzają strumień magnetyczny przenikający każdą z pętli utworzoną przez przewód i przewód odniesienia oraz indukcyjność wynikającą z prawa Faradaya. Napięcia pomiędzy każdym przewodem a przewodem odniesienia wytwarzają ładunki w liniach. Generuje to pole elektryczne pomiędzy każdą z par tych przewodów i jest reprezentowane przez pojemności linii.

Jednostkowe pojemności i konduktancje własne przewodów względem przewodu odniesienia definiowane są odpowiednio przez C_G i C_R a jednostkowa pojemność wzajemna przez C_m . Wyznaczenie parametrów L i C linii długiej przy uwzględnieniu parametrów jednostkowych i zastosowaniu równań analizy obwodów elektrycznych, oraz założeniu, że $\Delta z \rightarrow 0$ omówiono w [9].

Równania MTL w postaci macierzowej mają identyczną postać, jak równania dla dwóch przewodów linii. Rozwiązanie tych równań daje podobne wyniki, ale w postaci macierzowej. Właściwość ta pozwala na modelowanie i rozwiązanie układu linii składających z więcej niż z dwóch przewodów [8, 9]. Model odcinka linii w programie SPICE dla dwóch przewodów przedstawiono na rysunku 3. Równania opisujące ten model odcinka linii można rozwiązać poprzez eliminację sprzężenia pomiędzy przewodami. Pozwala to na zredukowanie pary przewodów do obwodu o dwóch przewodach, bez oddziaływań wzajemnych.

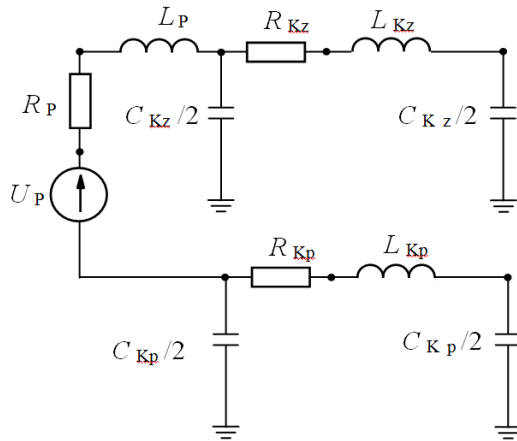


Rys. 3. Model dwuprzewodowej linii długiej z wykorzystaniem źródeł sterowanych w programie SPICE [9]

Fig.3. The SPICE model for a two-conductor line with the utilization of controlled source [9]

2.2. Model podstacji

W analizie modelu podstacji (rys. 4) przyjęto następujące parametry: napięcie podstacji $U_p = 3450$ V, indukcyjność podstacji i systemu zasilania $L_p = 4,774$ mH [2]. Parametry kabla powrotnego i zasilającego wprowadzono zgodnie z wynikami pomiarów zamieszczonymi w pracy [2] dla częstotliwości 10 kHz i długości kabla 200 m jako: $R_{Kz} = R_{Kp} = 3 \Omega$, $L_{Kz} = L_{Kp} = 0,13$ mH, $C_{Kz} = C_{Kp} = 0,4 \mu\text{F}$.



Rys. 4. Uproszczony schemat podstacji trakcyjnej i połączeń kablowych [2]

Fig. 4. The scheme of the substations and connections cable [2]

2.3. Model słupa

Dla analizy przepięć pochodzenia atmosferycznego model słupa może być reprezentowany przez szeregowe połączenie indukcyjności i rezystancji. Przyjmując indukcyjność jednostkową $L_0 = 1,67 \mu\text{H/km}$ wyliczoną ze wzoru:

$$L = 0,2 \mu_r \frac{2h}{r} \quad [\mu\text{H/km}] \quad (1)$$

gdzie: μ_r - przenikalność magnetyczna względna (dla powietrza $\mu_r = 1$)

h - wysokość słupa

r - promień słupa

otrzymano indukcyjność słupa $L = 13,7 \mu\text{H}$. Dla uszynień grupowych rezystancja uziemienia słupa wynosi $R = 50 \Omega$ [7].

2.4. Odgromniki, iskierniki i zwierniki

W analizie jako model izolatora uwzględniono wyłącznik sterowany napięciem 90 kV. Model odgromnika rożkowego wprowadzono natomiast jako wyłącznik sterowany napięciem o wartości napięcia przeskoku 23,8 kV i powietrznej przerwie o rezystancji 100 MΩ.

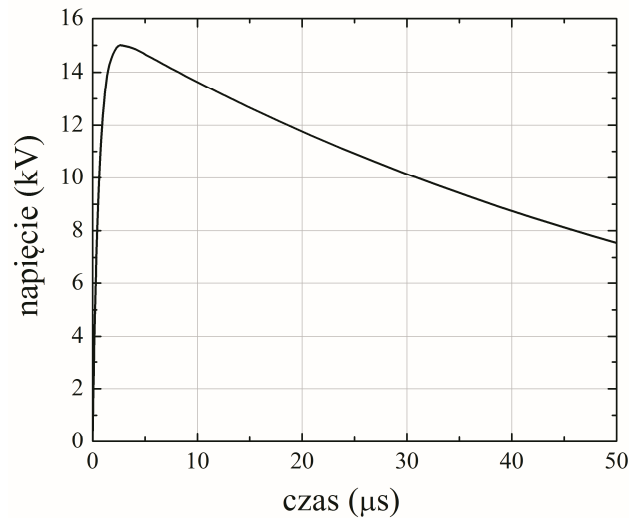
Stosowane do ochrony sieci trakcyjnej odgromniki rożkowe są instalowane co 1200 m lub 600 m (dla terenów o dużej intensywności burzowej, więcej niż 30 dni w roku). W analizie uwzględniono odległości 600 m [3].

Stosowane w uszynieniach grupowych zwierniki można zamodelować jako odpowiednio wyłącznik napięciowy o napięciu 120 V i prądowy o wartości prądu 15 kA [4, 5].

3. Wymuszenia udarowe.

Poziomy odporności na udary urządzeń srk są określone w normie PN-EN50121-4, 2008(U) [10]. Jednym z proponowanych do badań udarów w normie PN-EN 61000-4-5 (2010) [11, 16] jest udar napięciowy 1,2/50 μs. Kształt udaru napięciowego 1,2/50 μs przybliżono przebiegiem dwuwykładniczym wyznaczonym wzorem [6]:

$$u(t) = 1,0354 U_m [\exp(-1,478 \cdot 10^4 t) - \exp(-1,635 \cdot 10^6 t)] \quad (2)$$



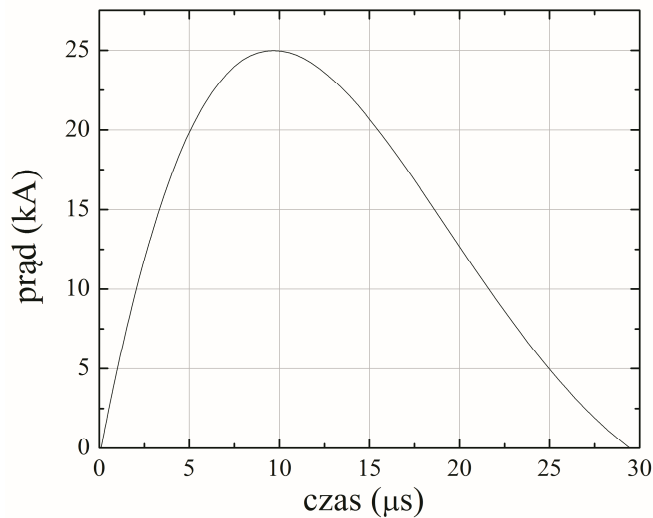
Rys. 5. Udar napięciowy 1,2/50 μs dla $U_m = 15$ kV

Fig. 5. Surge voltage of 1.2/50 μs for $U_m = 15$ kV

W stanie zwarcia z generatora udaru napięciowego 1,2/50 μs otrzymuje się przebieg prądu 8/20 μs .

Parametry udaru prądowego 8/20 μs określono wzorem [1]:

$$i(t) = 2,18 I_m [\exp(-0,065 \cdot 10^6 t) * \sin(0,107 \cdot 10^6 t)] \quad (3)$$



Rys. 6. Udar prądowy 8/20 μs dla $I_m = 25 \text{ kA}$

Fig. 6. Current surge 8/20 μs for $I_m = 25 \text{ kA}$

W programie LTSPICE, model udaru wyznaczony zależnością (3) opisano instrukcją `.subckt UDAR` jako źródło prądowe sterowane napięciem g^2 . Modelowanie udaru w dowolnym czasie umożliwia wprowadzenie czasu opóźnienia $T_d = t_0$ [20, 21]. W analizie przyjęto opóźnienia równe 0,1 μs . Udar (rys. 5) może być doprowadzony deklaracją xudar do dowolnego węzła modelowanego układu.

Przykład 1

```
.subckt UDAR wy Params: to= 0.1us
epior2 1 0 value={2.18*25e3*(exp(-
+0.065meg*time)*sin(0.107meg*time))}
```

2 Oznaczenia węzłów (1, 0, 1f, wy, udar) i elementów: pior2, op, c, piorun - w programie LTSPICE są dowolne (e - źródło napięciowe sterowane napięciem, g - źródło prądowe sterowane napięciem, R - rezystancja, T - czas), a- węzeł do którego doprowadzono udar.

```

Top 1 0 1f 0 z0=100 Td={to}
Rc 1f 0 100
g wy 0 1f 0 1
.ENDS UDAR
xudar a UDAR

```

Do analizy przyjęto wartość impedancji równą 400Ω . Przy takim założeniu napięcie, jakie może wstąpić w danym układzie może osiągnąć wartość $10\ 000\text{kV}$.

4. Wybrane wyniki modelowania

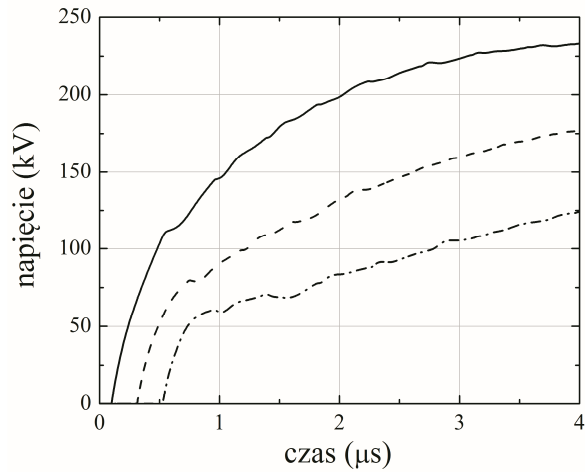
Z opisanych powyżej elementów składowych analizowanego układu utworzono układ w postaci sekcji typu II, tworząc trzy modele sekcji zawierające odcinek sieci trakcyjnej i toru o długości 64 m oraz:

- 1 - słup z izolatorem,
- 2 - słup z odgromnikiem różkowym,
- 3 – słup, do którego został doprowadzony udar [12, 22].

W modelowaniu, dla uproszczenia, przyjęto metaliczne zwarcie na wyłączniku słupa. Analizowany odcinek zawiera 54 sekcje. Zapis podprogramu dla modelu linii pięcioprzewodowej jest bardzo rozbudowany i ze względów objętościowych nie może być tutaj przedstawiony.

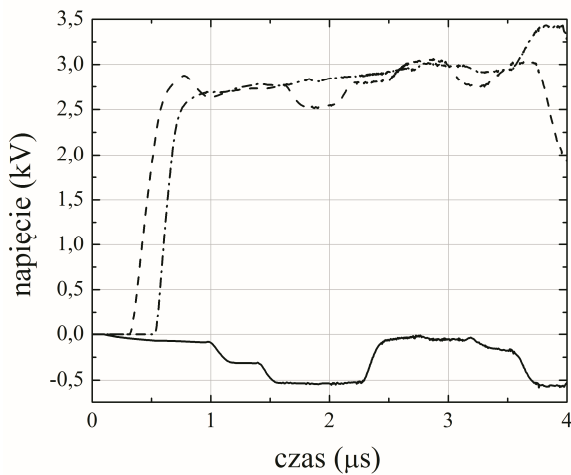
Model udaru doprowadzono do węzła 27 liny nośnej na wybranym słupie analizowanego układu sieci trakcyjnej z uszynieniami grupowymi. Do przykładowej analizy dla modelu udaru prądowego o kształcie $8/20\ \mu\text{s}$ (rys. 6) przyjęto wartość szczytową prądu $I_m = 25\ \text{kA}$ [11, 13, 14, 15, 16]. Do obserwacji wyników modelowania na trzech kolejnych słupach (rys. 7) oraz szynach (rys. 8 i 9) przyjęto czas $4\ \mu\text{s}$.

W przeprowadzonych pomiarach opisanych w pracach [3, 15] do badań stosowano również udar napięciowy (rys. 5) o kształcie $1,2/50\ \mu\text{s}$ i wartości maksymalnej $U_m = 15\ \text{kV}$ [3, 11]. Wyniki modelowania dla tego udaru przedstawiono na trzech kolejnych rysunkach 10, 11 i 12.



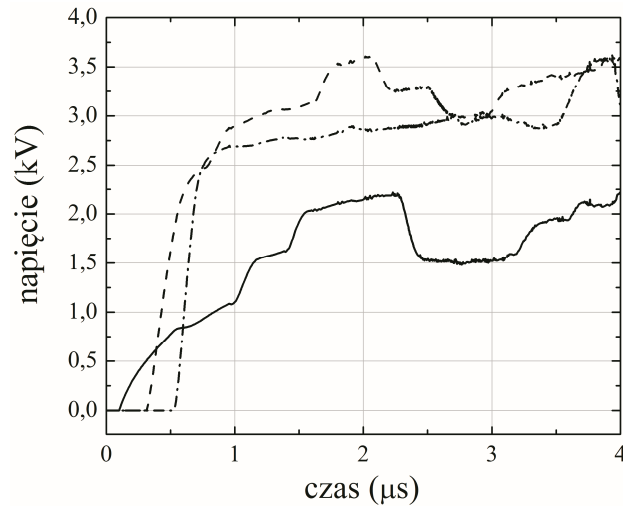
Rys.7. Przebiegi napięć na linii nośnej uszynienia grupowego dla słupa z udarem prądowym o kształcie 8/20 μs ($I_m = 25 \text{ kA}$) doprowadzonym do linii nośnej (linia ciągła) oraz kolejnych w odległości 64 m (linia kreskowana) i 128 m (kropkowana i kreskowana)

Fig. 7. Courses of voltages on a line of the group connection to the rail for a tower with a current stroke of 8/20 μs for $I_m = 25 \text{ kA}$ led to a catenary wire (full line) as well as the following in a distance of 64 m (the dashed line) and 128 m (the dotted - dashed)



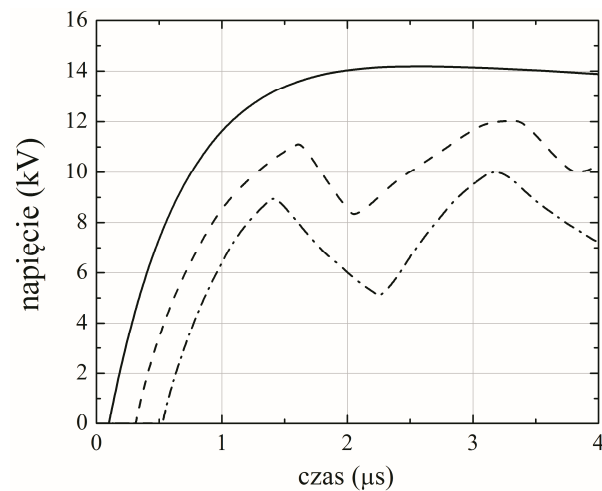
Rys. 8. Przebiegi napięć na szynie 1 uszynienia grupowego dla słupa z udarem prądowym 8/20 μs $I_m = 25 \text{ kA}$ doprowadzonym do linii nośnej (linia ciągła) oraz kolejnych w odległości 64 m (linia kreskowana) i 128 m (kropkowana i kreskowana)

Fig. 8. Courses of voltages on a rail 1 of the group connection to the rail for a tower with a current stroke of 8/20 μs for $I_m = 25 \text{ kA}$ led to a catenary wire (full line) as well as the following in a distance of 64 m (the dashed line) and 128 m (the dotted - dashed)



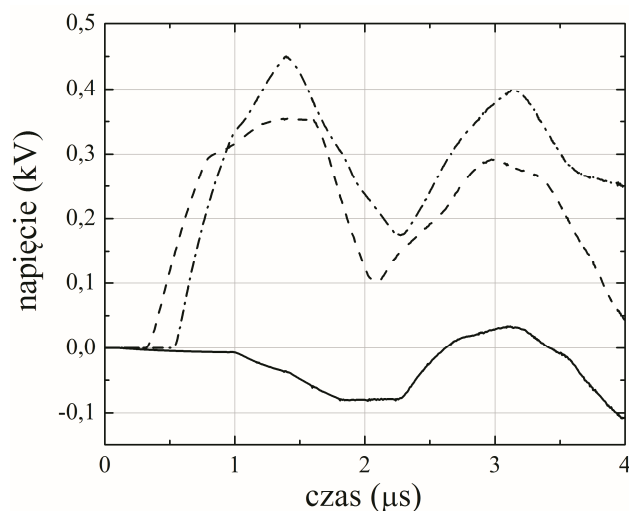
Rys. 9. Przebiegi napięć na szynie 2 uszynienia grupowego dla słupa z udarem prądowym $8/20 \mu\text{s}$ $I_m = 25 \text{ kA}$ doprowadzonym do liny nośnej (linia ciągła) oraz kolejnych w odległości 64 m (linia kreskowana) i 128 m (kropkowana i kreskowana)

Fig. 9. Courses of voltages on a rail 2 of the group connection to the rail for a tower with a current stroke of $8/20 \mu\text{s}$ for $I_m = 25 \text{ kA}$ led to a catenary wire (full line) as well as the following in a distance of 64 m (the dashed line) and 128 m (the dotted - dashed)



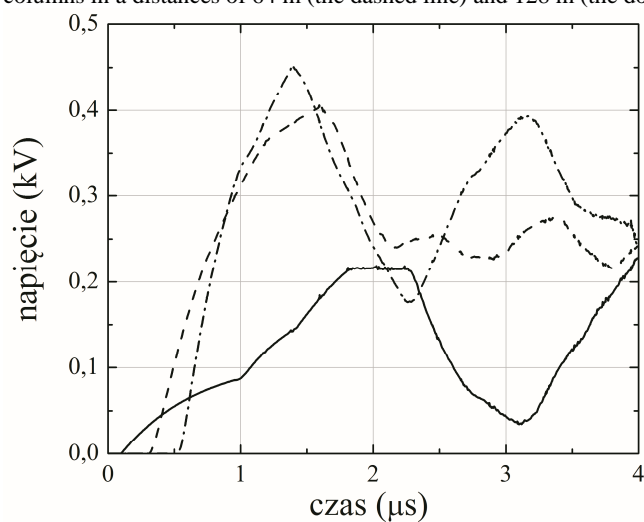
Rys. 10. Przebiegi napięć na linii nośnej uszynienia grupowego dla słupa z udarem napięciowym o kształcie $1,2/50 \mu\text{s}$ ($U_m = 15 \text{ kV}$) doprowadzonym do liny nośnej (linia ciągła) oraz kolejnych w odległości 64 m (linia kreskowana) i 128 m (kropkowana i kreskowana)

Fig. 10. Courses of voltages on a line of the group connection to the rail for a tower with the surge voltage of $1,2/50 \mu\text{s}$ for $U_m = 15 \text{ kV}$ led to the catenary wire (the full line) and the following columns in a distances of 64 m (the dashed line) and 128 m (the dotted - dashed)



Rys. 11. Przebiegi napięć na szynie 1 uszynienia grupowego dla słupa z udarem napięciowym o kształcie $1,2/50 \mu\text{s}$ ($I_m = 15 \text{ kV}$) doprowadzonym do liny nośnej (linia ciągła) oraz kolejnych w odległości 64 m (linia kreskowana) i 128 m (kropkowana i kreskowana)

Fig. 11. Courses of voltages on a rail 1 of the group connection to the rail for a tower with the surge voltage of $1,2/50 \mu\text{s}$ for $U_m = 15 \text{ kV}$ led to the catenary wire (the full line) and the following columns in a distances of 64 m (the dashed line) and 128 m (the dotted - dashed)



Rys. 12. Przebiegi napięć na szynie 2 uszynienia grupowego dla słupa z udarem napięciowym o kształcie $1,2/50 \mu\text{s}$ ($U_m = 15 \text{ kV}$) doprowadzonym do liny nośnej (linia ciągła) oraz kolejnych w odległości 64 m (linia kreskowana) i 128 m (kropkowana i kreskowana)

Fig. 12. Courses of voltages on a rail 2 of the group connection to the rail for a tower with the surge voltage of $1,2/50 \mu\text{s}$ for $U_m = 15 \text{ kV}$ led to the catenary wire (the full line) and the following columns in a distances of 64 m (the dashed line) and 128 m (the dotted - dashed)

Powyżej przedstawiono przykładowe wyniki modelowania impulsowych zaburzeń elektromagnetycznych wywołanych wyładowaniami atmosferycznymi, które stanowią poważne zagrożenie dla pracy elektronicznych urządzeń sterowania ruchem kolejowym i telekomunikacyjnych. W tym celu opracowano model odcinka sieci trakcyjnej z uszynieniami grupowymi w układzie otwartym oraz modele poszczególnych elementów układu: sieć trakcyjna, sieć szynowa, słup, izolator, odgromnik, udar. Zaprezentowane wyniki stanowią część pracy analitycznej mającej na celu porównanie ich z wynikami otrzymanymi dla układu z uszynieniami indywidualnymi. Celem analizy jest ocena obu systemów w kontekście zagrożenia urządzeń sterowania ruchem kolejowym od przepięć pochodzenia atmosferycznego.

5. Wnioski

Wykorzystując w programach symulacyjnych sprawdzone modele elementów układów i urządzeń elektrycznych oraz zjawisk fizycznych można uzupełniać czy zastępować badania laboratoryjne i „terenowe” rzeczywistych układów. Opisane w referacie elementy składowe przyjętego do analizy modelu układu sieci trakcyjnej z uszynieniami grupowymi w układzie otwartym poddano działaniu udaru o kształcie dla wymuszenia prądowego $8/20 \mu\text{s}$ i napięciowego $1,2/50 \mu\text{s}$. Przedstawiono możliwości symulacji przy wykorzystaniu programu LTSPICE oraz uzasadniono konieczność podejmowania problemu skuteczności ochrony odgromowej urządzeń kolejowych.

Analizowane możliwości programu mają charakter poznawczy. Zostaną one wykorzystane do dalszej analizy i oceny zagrożenia układów zasilających urządzenia srk przepięciami pochodzenia atmosferycznego.

Literatura

- [1] Bajorek J., Knott M., Wyderka S.: Efficiency of ZnO arrester models simulation of lightning overvoltages. 21st ICLP, BERLIN, Germany 1992, Pap. No. 5.07.
- [2] Białoń A., Kaźmierczak A., Zajac W.: Opracowanie dopuszczalnych parametrów zakłóceń dla urządzeń srk, łączności i pojazdów trakcyjnych. Sprawozdanie końcowe. Praca 6915/23, CNTK, Warszawa 1999.
- [3] Budowa i poligonowe badania prototypowego systemu ochrony przed przepięciami z ogranicznikami warystorowymi. Etap 1. Zbadanie i określenie na drodze pomiarowej tłumienności przez sieć trakcyjną przepięć w funkcji drogi”. Praca nr 3889/10. Instytut Kolejnictwa Zakład Sterowania Ruchem Kolejowym i Teleinformatyki. Warszawa, listopad 2011r. ©.
- [4] Centrum Naukowo-Techniczne Kolejnictwa Zakład Sterowania Ruchem i Teleinformatyki - Doświadczalne badanie systemu uszynień grupowych ze zmodyfikowaną długością ciągłości elektrycznej (zbliżoną do długości szlaków tj.: 8-12 km), Etap1 Badania symulacyjne wyłączalności zwarć izolacji głównej sieci trakcyjnej z

- układem połączeń uszynień grupowych ze zmodyfikowaną długością sekcji. Zadanie nr 3568/10, Warszawa grudzień 2008©.
- [5] Centrum Naukowo-Techniczne Kolejnictwa Zakład Sterowania Ruchem i Teleinformatyki: - Doświadczalne badanie systemu uszynień grupowych ze zmodyfikowaną długością ciągłości elektrycznej (zbliżoną do długości szlaków tj.: 8-12 km) Etap 2 Sprawozdanie z badań wyłączalności zwarć izolacji głównej sieci trakcyjnej do uszynienia grupowego ze zmodyfikowaną długością sekcji. Praca nr 3568/10, Warszawa grudzień 2009 ©.
 - [6] FFTSES User's Manual: Fast Fourier Transforms, Safe Engineering Services & Technologies Ltd, Montreal, Canada, 1997.
 - [7] Głowacki K., Onderka E.: Sieci trakcyjne. EMTRAK s.c. 2002.
 - [8] Mazloom Z., Theethayi N., Thottappillil R.: A method for interfacing lumped-circuit models and transmission-line system models with application to railways. IEEE Transaction on Electromagnetic Compatibility, Vol. 51, No 3. August 2009.
 - [9] Paul C. R.: Introduction to Electromagnetic Compatibility. John Wiley & Sons, Inc. Published by John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey. Published simultaneously in Canada, 2006.
 - [10] PN-EN 50121-4: 2008; Zastosowania kolejowe. Kompatybilność elektromagnetyczna. część 4. Emisja i odporność na zakłócenia urządzeń sygnalizacji i telekomunikacji.
 - [11] PN-EN 61000-4-5: 2010; Kompatybilność elektromagnetyczna. (EMC).- Część 4-5: Metody badań i pomiarów-Badanie odporności na udary.
 - [12] PN-EN 62305-1:2006 (U): Ochrona odgromowa – część 1. Wymagania ogólne.
 - [13] PN-EN 62305-2:2006/AC: 2007(U): Ochrona odgromowa – część 2. Zarządzanie ryzykiem.
 - [14] PN-EN 62305-4:2006 (U); Ochrona odgromowa – część 4. Urządzenia elektryczne i elektroniczne w obiektach budowlanych.
 - [15] Poligonowe badania ochrony przeciwprzebiegowej z ogranicznikami warystorowymi. Część I. Sprawozdanie z pomiarów przeprowadzonych w warunkach poligonowych. Politechnika Białostocka, Wydział Elektryczny. Białystok, listopad 2010 ©.
 - [16] Sowa A.: Ochrona odgromowa urządzeń oraz systemów elektronicznych przed narażeniami piorunowymi. Oficyna Wydawnicza Politechniki Białostockiej. Białystok 2011.
 - [17] Szelaż A.: Zagadnienia analizy i projektowania systemu trakcji elektrycznej prądu stałego z zastosowaniem technik modelowania i symulacji. Prace Naukowe, Elektryka z. 123, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2002.
 - [18] Wróbel Z., Ziemia R.: Zastosowanie wybranych programów komputerowych w analizie zagrożeń przepięciowych urządzeń sterownia ruchem kolejowym cz. 1, 2. XII Ogólnopolska Konferencja Naukowa Trakcji Elektrycznej, II Szkoła Kompatybilności Elektromagnetycznej w Transporcie, Zakopane, 2006
 - [19] Wróbel Z.: Computer modelling of lightning discharge threat to railway installation. Modern Electric Traction. Power Supply. Edited by Krzysztof Karwowski, Adam Szelaż, Gdansk University of Technology, Faculty of Electrical and Control Engineering. Gdańsk 2009.
 - [20] Wróbel Z.: Possibility of the modelling of combination waves generators. Przegląd Elektrotechniczny, PL ISSN 0033-2097, R. 86 NR 9/2010.

- [21] Wróbel Z.: Modelowanie wybranych elementów ochrony przepięciowej sieci trakcyjnych w analizie zagrożeń udarowych urządzeń sterowania ruchem kolejowym. Politechnika Krakowska im. Tadeusza Kościuszki, Wydział Inżynierii Elektrycznej i Komputerowej; XV Ogólnopolska Konferencja Naukowa Trakcji Elektrycznej, VII Szkoła Kompatybilności Elektromagnetycznej w Transporcie, Zakopane, październik 2012.
- [22] Wróbel Z.: The railway devices modelling for the purpose of the lightning discharge analysis. Przegląd Elektrotechniczny,(vol 2013, No 3a), PL ISSN 0033-2097, R. 89 NR 3a/2013.

CHOSEN QUESTIONS IN MODELLING OF LIGHTENING RISK OF CATENARY FOR THE GROUP CONNECTION TO THE RAIL IN THE OPEN LAY-OUT

Summary

In the paper I spoke components of the model describing the accepted to the analysis system of the traction wires net with the group connection to the rail in an open system at an extortion current $8/20 \mu\text{s}$ and voltage's $1.2/50 \mu\text{s}$. To the analysis, one section of the group connection to the rail containing 54 fragments was taken into account. For this purpose models of particular elements in the lay-out were worked out: contact line, rail return, tower, insulator, surge. I represented possibilities of the simulation at the utilization of the programme LTspice and I based the necessity of the treat of the problem of the lightning protection efficiency of railways devices. Analysed possibilities of the programme have the cognitive character and will be put-upon to further analysis and estimations of the threat of feeding parley of the rts devices caused by surges of the atmospherical origin. The results of the presented analysis that a credible simulation of the over-voltage protection can be used to choose adequate models of elements and a correct parameters estimation of the measurement and analysis.

Keywords: Lightning protection, catenary, group connection to the rail system, numerical modeling, simulations.

DOI: 10.7862/re.2013.25

Tekst złożono w redakcji: listopad 2013

Przyjęto do druku: grudzień 2013