

ANALIZA ROZPŁYWU PRĄDU UDAROWEGO W URZĄDZENIU PIORUNOCHRONNYM I DOŁĄCZONYCH INSTALACJACH

Grzegorz MASŁOWSKI, Stanisław WYDERKA, Lesław KARPIŃSKI, Robert ZIEMBA
Grzegorz KARNAS, Kamil FILIK, Paweł SZCZUPAK

Politechnika Rzeszowska,
Wydział Elektrotechniki i Informatyki, ul. W. Pola 2, 35-959 Rzeszów
tel.: +48 17 8651253 e-mail: maslowski@prz.edu.pl

Streszczenie: W artykule przedstawiono poligon badawczy systemów ochrony odgromowej należący do Politechniki Rzeszowskiej. Przeprowadzono badania rozptyłu prądów udarowych w urządzeniu piorunochronnym obiektu budowlanego i dołączonej instalacji. W badaniach wykorzystano mobilny generator udarów prądowych i oryginalny system pomiarowy. Uzyskane wyniki potwierdzają rejestracje dokonane na Florydzie z wykorzystaniem wyładowań atmosferycznych prowokowanych. Kształty fal prądowych nie są jednakowe w różnych miejscach badanego układu i zależą od parametrów częstotliwościowych poszczególnych elementów instalacji, natomiast efektywność odprowadzania prądu piorunowego do ziemi przez urządzenie piorunochronne zależy od relacji między wartościami impedancji uziemienia obiektu budowlanego i uziemienia najbliższej stacji transformatorowej.

Słowa kluczowe: wyładowania atmosferyczne, ochrona odgromowa, badania poligonowe, prąd udarowy

1. WSTĘP

Bezpośrednie wyładowania atmosferyczne powodują rozptył prądów udarowych w urządzeniu piorunochronnym obiektu budowlanego i dołączonych do niego instalacjach przewodzących. Badanie tego rozptyłu z wykorzystaniem wyładowań prowokowanych przeprowadzono po raz pierwszy w 1997 r. w Międzynarodowym Centrum Badań Wyładowań Atmosferycznych w Camp Blanding na Florydzie (International Center for Lightning Research and Testing - ICLRT). Uzyskane wyniki eksperymentalne oraz rezultaty modelowania i symulacji komputerowych opisano w pracach [1,2]. Kolejne testy przeprowadzono w ICLRT w latach 2004 i 2005 z wykorzystaniem rzeczywistego obiektu będącego typowym domem jednorodzinny [3,4]. Dzięki podjętej w 2005 r. współpracy z ośrodkiem na Florydzie badania poligonowe kontynuowano w Polsce z wykorzystaniem między innymi mobilnego generatora udarów prądowych i światłowodowego układu pomiarowego z ekranowanymi przetwornikami elektro-optycznymi. Pierwsze testy przeprowadzono w latach 2007 i 2008 na terenie Politechniki Rzeszowskiej [5,6]. Od 2012 r. badania rozpoczęto na nowym poligonie badawczym o znacznie większej powierzchni [7]. W artykule przedstawiono krótką charakterystykę tego poligonu badawczego wraz z opisem

wykorzystywanego układu eksperymentalnego oraz pierwsze uzyskane rejestracje. Dokonano również zwięzłej analizy rozptyłu prądów w badanym układzie.

2. POLIGON BADAWCZY

Nowy poligon badawczy narażeń piorunowych o powierzchni około 5 ha znajduje się na terenie należącym do Politechniki Rzeszowskiej, położonym 50 km na południe od Rzeszowa w miejscowości Huta Poręby (rys. 1).

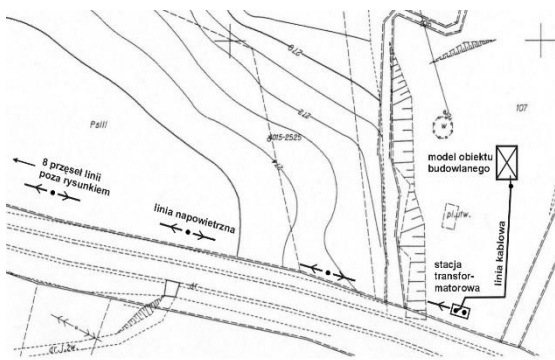


Rys. 1. Satelitarny obraz terenu poligonu badawczego z zaznaczonymi granicami i lokalizacją zbudowanych obiektów

Mapkę części tego terenu z zainstalowanymi obiektami testowymi przedstawiono na rys. 2.

Do podstawowych obiektów poligonu badawczego należą: model budynku mieszkalnego z urządzeniem piorunochronnym i instalacją elektryczną, stacja transformatorowo-rozdzielcza słupowa SN/nn, linie napowietrzna i kablowa. Na terenie poligonu znajduje się także kontener magazynowy do przechowywania urządzeń probierczych i pomiarowych.

Stacja transformatorowa SN/nn (rys. 3) i linia napowietrzna niskiego napięcia zostały zbudowane z urządzeń i elementów zdemontowanych przez służby energetyczne z wcześniej eksploatowanej sieci elektroenergetycznej.



Rys. 2. Mapa geodezyjna części terenu poligonu badawczego z naniesionymi oznaczeniami wybudowanych obiektów



Rys. 3. Słupowa stacja transformatorowo-rozdzielcza z przyłączoną linią napowietrzną

Stacja transformatorowa ŻH-160 jest wyposażona w typowe urządzenia rozdzielcze. Jej głównym urządzeniem jest transformator olejowy T3ZONe 30/20 o mocy 30 kVA, napięciu górnym 15 kV i dolnym 400 V oraz o grupie połączeń Yz5. W czasie badań rolę linii SN będzie pełnił wybudowana wzdłuż drogi powiatowej (rys. 2), niezasilana niskonapięciowa linia napowietrzna, składająca się z 11 prześleń o łącznej długości 484 m oraz długości przewodów ($4 \times \text{AL } 35 \text{ mm}^2$) równej 506 m. Linia kablowa niskiego napięcia (rys. 2) o długości 50 m jest wykonana z zastosowaniem kabla YAKY $4 \times 35 \text{ mm}^2$, ułożonego w gruncie na głębokości 60 cm. Linia ta łączy rozdzielnicę niskiego napięcia stacji transformatorowo-rozdzielczej z wolnostojącym złączem kablowym ZK-1, ulokowanym 2,3 m od ściany modelu budynku mieszkalnego (rys. 4).



Rys. 4. Model budynku mieszkalnego z instalacją elektryczną i urządzeniem piorunochronnym

Żyłą PEN kabla jest z jednej strony połączona z uziemieniem stacji transformatorowo-rozdzielczej, a z drugiej z zaciskiem uziemiającym złącza kablowego, z którym z kolei połączony jest uziom poziomy wykonany z ocynkowanego płaskownika stalowego o długości 20 m, ułożonego na głębokości 45 cm wzdłuż linii kablowej. Zacisk uziemiający złącza kablowego jest połączony także, ułożonym w gruncie ocynkowanym płaskownikiem stalowym, z najbliższym uziomem urządzenia piorunochronnego budynku mieszkalnego.

Podstawowymi urządzeniami probierczymi są trzy w pełni zautomatyzowane, sterowane komputerowo generatory udarów prądowych:

- mobilny generator udarów prądowych, GUP100-8/20, o napięciu pracy do 80 kV, energii 50 kJ i prądzie szczytowym do 100 kA, do symulacji wieloprądowych składowych wyładowań piorunowych (wyładowań głównych);
- mobilny generator udarów prądowych, GUP-80/10, o napięciu pracy do 80 kV, energii 10 kJ i prądzie szczytowym do 50 kA, który również może być wykorzystywany do symulacji oddziaływań wyładowań głównych;
- mobilny generator udarów piorunowych długotrwałych, GUP-10/100, o napięciu pracy do 10 kV, energii 100 kJ, wartości szczytowej prądu do 500 A i czasie trwania impulsów do 100 ms.

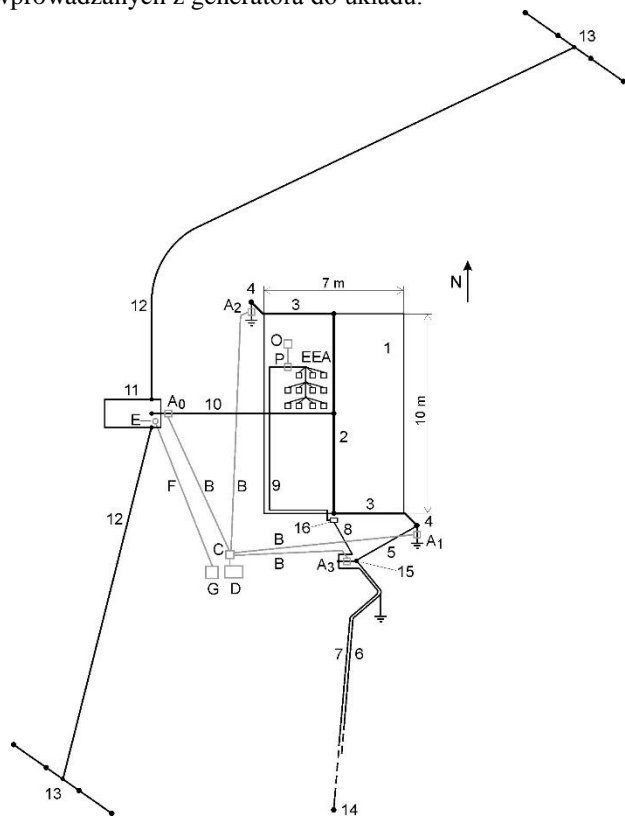
Dwa pierwsze generatory umożliwiają wytwarzanie udarów prądowych odwzorowujących, w szerokim zakresie amplitud i kształtów, wyładowania główne - podstawowe składowe naturalnych wyładowań piorunowych. Trzeci z wymienionych generatorów umożliwia wytwarzanie udarów prądowych odwzorowujących składowe długotrwałe naturalnych wyładowań atmosferycznych, występujące po niektórych wyładowaniach głównych piorunów wielokrotnych. Składowe długotrwałe cechują się energią wielokrotnie większą, nawet ponad rząd wartości, od energii wyładowań głównych i są zasadniczo odpowiedzialne za destrukcyjne efekty wyładowań atmosferycznych, w tym za wzniesienie pożarów.

W przeprowadzonych badaniach rozptyłu prądów piorunowych, obok opisanych wyżej urządzeń probierczych, zastosowano unikatowe układy (nowej generacji) przetwarzania i rejestracji udarów prądowych, oparte na technologii elektrooptycznej. W 2010 roku zbudowano, przy współpracy pracowników Politechniki Rzeszowskiej, Akademii Górniczo-Hutniczej i Politechniki Poznańskiej, prototypowy system składający się z przetwornika analogowo-cyfrowego i elektrooptycznego, które umieszczono w metalowym ekranie bezpośrednio przy boczniku prądowym, optycznego falowodu oraz przetwornika optoelektronicznego [9]. Taka konstrukcja umożliwia transmisję wszystkich danych pomiarowych światłowodem w postaci cyfrowej, co sprawia, że zmierzone przebiegi nie są podatne na zaburzenia elektromagnetyczne i warunki atmosferyczne. Jest to szczególnie istotne w przypadku wykonywania testów z udziałem generatorów prądów udarowych, które są źródłem silnych zaburzeń elektromagnetycznych.

3. UKŁAD EKSPERYMENTALNY

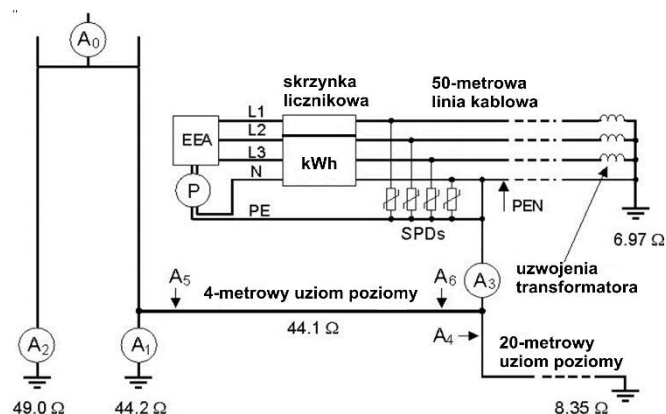
Badania rozptyłu prądów udarowych w urządzeniu piorunochronnym i dołączonych instalacjach przewodzących przeprowadzono w oparciu o układ eksperymentalny

pokazany na rys. 5. Zastępczy schemat elektryczny tego układu, uwzględniający najważniejsze elementy, został natomiast przedstawiony na rys. 6. Rejestracje prądów w wybranych elementach urządzenia piorunochronnego i dołączonej instalacji dokonano za pomocą boczników i pięciokanałowego układu pomiarowego. Prądy o znacznie mniejszych wartościach szczytowych płynące w instalacji elektrycznej obiektu mierzono za pomocą sondy Pearsona i oscyloskopu. Należy podkreślić, iż jedną z najważniejszych zalet eksperymentu była powtarzalność uderów prądowych wprowadzanych z generatora do układu.



Rys. 5. Schemat badanego układu: 1 – model obiektu budowlanego, 2 – zwód poziomy na kalenicy dachu z trzema zwodami pionowymi, 3 – przewody odprowadzające, 4 – uziomy pionowy, 5 – 4-metrowy uziom poziomy, 6 – 20-metrowy uziom poziomy, 7 – żyła PEN 50-metrowego kabla, 8 – przewód PE obwodu zasilającego, 9 – przewody instalacji elektrycznej obiektu, 10 – izolowany przewód miedziany, 11 – generator, 12 – przewody izolowane obwodu powrotnego generatora, 13 – uziom na końcu przewodów powrotnych, 14 – uziom stacji transformatorowej, 15 – złącze kablowe wolnostojące, 16 – skrzynka licznikowa, A – punkty pomiarowe, B – łącza światłowodowe, C – pięć konwerterów elektrooptycznych, D – komputer, E – konwerter optoelektryczny generatora, F – światłowód, G – pulpit sterujący generatorem, O – oscyloskop, P – sonda prądowa, EEA – urządzenia domowe (Electrical

and Electronic Appliances – EEA)

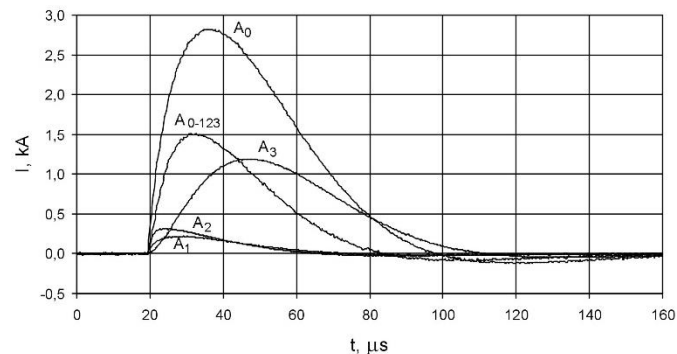


Rys. 6. Zastępczy schemat elektryczny układu

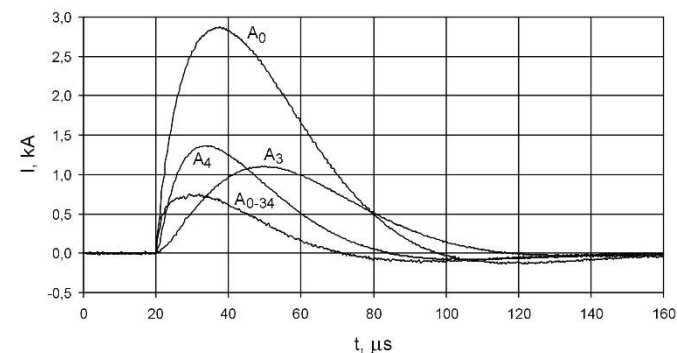
W układzie pomiarowym zastosowano ekranowany dzielnik napięcia, przetwornik analogowo-cyfrowy i przetwornik elektrooptyczny. Przetworzone dyskretnie wartości chwilowe prądu w postaci impulsów światła są przysyłane światłowodem do części pomiarowo-rejestrującej układu składającej się z przetwornika optoelektrycznego z buforem pamięci i laptopa. Zamontowanie ekranowanego przetwornika bezpośrednio na boczniku i światłowodowa transmisja cyfrowa wyeliminowały zakłócenia wysokiej częstotliwości.

4. ANALIZA ROZPŁYwu PRĄDÓw UDAROWYCH

Wprowadzony z generatora udar prądowy rozplywa się w dwóch kierunkach zwodem odgromowym poziomym, a następnie przewodami odprowadzającymi do uziomów i do ziemi. W przypadku uziomu przy narożu budynku po stronie południowej, część prądu wpływa do nieizolowanego przewodu łączącego ten uziom z uziomem złącza kablowego. Część prądu wypływa z tego przewodu bezpośrednio do ziemi, a pozostała wpływa do uziomu złącza kablowego, do żyły PEN linii kablowej, wypływając do ziemi przez uziemienie stacji transformatorowo-rozdziałczej, oraz do żyły PE przewodu przyłączeniowego. Ta ostatnia niewielka część prądu wpływając do przewodu PE instalacji elektrycznej może wpłynąć do żył czynnych tej instalacji przez przyłączone do niej odbiorniki energii elektrycznej. Na rys. 7 i 8 przedstawiono rozplyw prądów zarejestrowany w badanym układzie.



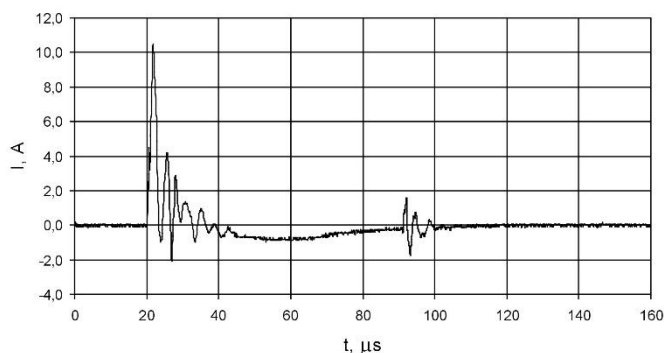
Rys. 7. Rozplyw prądu w badanym układzie: A₀ – prąd wprowadzany z generatora, A₁ i A₂ – prądy płynące do uziomów pionowych, A₃ – prąd wpływający do instalacji elektrycznej obiektu i przewodu PEN kabla, A₀₋₁₂₃ – wyznaczony prąd (A₀₋₁₂₃ = A₀ - A₁ - A₂ - A₃) wpływający do ziemi poprzez 4-metrowy i 20-metrowy uziom poziomy



Rys. 8. Rozplyw prądu w badanym układzie: A₀ – prąd wprowadzany z generatora, A₃ – prąd wpływający do instalacji elektrycznej obiektu i przewodu PEN kabla, A₄ – prąd wpływający do ziemi z 20-metrowego uziomu poziomego, A₀₋₃₄=A₀-A₃-A₄ wyznaczony prąd wpływający do ziemi poprzez uziomy pionowy i 4-metrowy uziom poziomy

Wyraźnie widać, iż kształt fal prądowych nie jest jednakowy w różnych elementach instalacji. Prądy

wpływające do uziomów pionowych (przebiegi A_1 i A_2) mają krótszy czas narastania do wartości szczytowej w porównaniu do prądu wprowadzanego z generatora, natomiast prąd wpływający do przewodu PEN kabła posiada zbrocze narastające dużo łagodniejsze. Świadczy to o większym udziale pojemności w impedancji uziomów pionowych (filtracja składowych widma prądu o niższych częstotliwościach) oraz indukcyjności w przypadku kabła (filtracja składowych widma prądu o wyższych częstotliwościach). Dodatkowo warto zauważyć, iż stosunek wartości szczytowej prądu płynącego do uziemiania transformatora (przebieg A_3) do wartości szczytowej prądu z generatora wynosi ok. 38%. Wartość ta jest miarą efektywności odprowadzania prądów piorunowych do ziemi przez lokalne uziemienie obiektu i zależy od relacji pomiędzy wielkością impedancji uziemienia obiektu i uziemienia stacji transformatorowej.



Rys. 9. Prąd płynący w instalacji elektrycznej z dołączonymi urządzeniami domowymi AGD i RTV (rys.6, punkt P)

Podczas badań rejestrowano również prądy płynące w instalacji elektrycznej obiektu wyposażonego w typowe urządzenia domowe. Jak widać na rys. 9 ich wartości szczytowe są dwa rzędy mniejsze w porównaniu do prądów płynących w urządzeniu piorunochronnym. Wynika to z dużej impedancji obwodu, którym ten prąd płynie do uziemienia transformatora, czyli przewodów fazowych instalacji, kabła, uzwojeń transformatora i jego przewodu neutralnego. Obecność urządzeń domowych jest przyczyną licznych oscylacji związanych ze zjawiskiem odbicia fal prądowych. Oprócz oscylacji nakładających się bezpośrednio na grzbiet opadający zarejestrowanej fali prądowej występują po upływie około 50 μs dodatkowe oscylacje, które trwają około 10 μs .

5. WNIOSKI KOŃCOWE

W artykule zaprezentowano poligon badawczy systemów ochrony odgromowej oraz dokonano analizy rozptyłu prądów udarowych w urządzeniu piorunochronnym obiektu budowlanego wyposażonego w typowe urządzenia domowe i dołączonego poprzez linię kablową do stacji transformatorowej. Uzyskane wyniki potwierdzają rejestracje dokonane na Florydzie, zgodnie z którymi kształty fal prądowych nie są jednakowe w różnych miejscach badanego

układu i zależą od parametrów częstotliwościowych poszczególnych elementów instalacji, natomiast efektywność odprowadzania prądu piorunowego do ziemi przez urządzenie piorunochronne zależy od relacji pomiędzy wielkością impedancji uziemienia obiektu i uziemienia najbliższej stacji transformatorowej.

6. BIBLIOGRAFIA

1. Rakov V.A., Uman M.A., Fernandez M.I., Mata C.T., Rambo K.J., Stapleton M.V., and Sutil R.R., Direct Lightning Strikes to the Lightning Protection System of a Residential Building: Triggered-Lightning Experiments, *IEEE Trans. on Pow. Del.*, 17 (2002), n.2, pp. 575–586.
2. Sutil R.R., Rakov V.A., Uman M.A.: EMTP modeling of direct lightning strikes to the lightning protective system of a residential building, *Proc. of 26th ICLP*, Krakow, Poland, 2002.
3. DeCarlo B. A., Rakov V. A., Jerauld J. E., Schnetzer G. H., Schoene J., Uman M. A., Rambo K. J., Kodali V., Jordan D. M., Maxwell G., Humeniuk S., Morgan M., Distribution of Currents in the Lightning Protective System of a Residential Building - Part I: Triggered-Lightning Experiments, *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 23, n. 4, Oct. 2008, pp. 2439-2446.
4. Li L., Rakov V. A., Distribution of Currents in the Lightning Protective System of a Residential Building - Part II: Numerical Modeling, *IEEE Trans. on EMC*, Vol. 23, No. 4, Oct. 2008, pp. 2447–2455.
5. Maslowski G., Rakov V.A., Wyderka S., Bajorek J., DeCarlo B.A., Jerauld J., Schnetzer G.H., Schoene J., Uman M.A., Rambo K.J., Jordan D.M., Krata, W., Testing of Lightning Protective System of a Residential Structure: Comparison of Data Obtained in Rocket-Triggered Lightning and Current Surge Generator Experiments, *Journ. of High Voltage Eng., China* Vol. 34, No. 12, 2008, pp. 2575-82.
6. Maslowski G., Wyderka S., Rakov V.A., DeCarlo B.A., Li L., Bajorek J., Ziemba R., Experimental investigation and numerical modeling of surge currents in lightning protective system of a residential building, *Journ. of Lightn. Research*, No. 4, 2012, pp. 18-26.
7. Maslowski G., Bajorek J., Wyderka S.: Developing of Lightning Research Center in South East Part of Poland, *Asia- Pacific Int. Conf. on Lightning*, Nov. 1- 4, 2011, Chengdu, China.
8. Maslowski G., Wyderka S., Ziemba R., Karnas G., Filik K., Karpinski L.: Surge Current Distribution in the Lightning Protection System of a Test House Equipped in Electrical and Electronic Appliances, *Proc. of 32nd ICLP*, Shanghai, China, 2014.
9. Buczek L., Wyderka S., Jaworski M., Fiber optic links in broadband registration system of electrical signals in presence of high voltage and strong electromagnetic disturbances, *Electrical Review*, R. 88 No. 9a/2012, pp. 171-174.

ANALYSIS OF IMPULSE CURRENT DISTRIBUTION IN LIGHTNING PROTECTION SYSTEM AND CONNECTED INSTALLATIONS

The paper presents a new test site of lightning protection systems belonging to the Rzeszow University of Technology. Analysis of impulse current distribution in the lightning protection system and the connected installations has been conducted. An impulse current generator was used together with the original measurement system during experimental tests. Obtained results confirm registrations made in Florida with usage of triggered lightning experiments. Current waveforms are not the same in lightning protection system and are influenced by frequency dependent parameters of different parts of the installation. The effectiveness of lightning protection system depends on the relation between the amount of impedances of the local grounding system and the grounding system of the transformer station.

Keywords: lightning, lightning protection, test site experiments, impulse current