

**ANALIZA SYGNATUR POLA ELEKTRYCZNEGO WYŁADOWAŃ ATMOSFERYCZNYCH  
W REJONIE BIESZCZAD NA PODSTAWIE KOMPLEKSOWYCH POMIARÓW IMPULSÓW  
FALI ELEKTROMAGNETYCZNEJ W PAŚMIE CZĘSTOTLIWOŚCI OD 0 DO 3 MHz  
WYKONANYCH W AKADEMICKIM OŚRODKU SZYBOWCOWYM POLITECHNIKI  
RZESZOWSKIEJ I POLITECHNIKI WARSZAWSKIEJ  
W BEZMIECHOWEJ W MAJU 2014 R.**

**Konrad SOBOLEWSKI<sup>1</sup>, Grzegorz KARNAS<sup>2</sup>, Piotr BARAŃSKI<sup>3</sup>, Grzegorz MASŁOWSKI<sup>4</sup>**

1. Konrad Sobolewski, Politechnika Warszawska, Wydział Elektryczny, Zakład Wysokich Napięć i Kompatybilności Elektromagnetycznej, ul. Koszykowa 75, 00-662 Warszawa  
tel.: (22) 234 7856, konrad.sobolewski@ee.pw.edu.pl
2. Grzegorz Karnas, Politechnika Rzeszowska, Politechnika Rzeszowska, Wydział Elektrotechniki i Informatyki, Katedra Elektrotechniki i Podstaw Informatyki, ul. W. Pola 2, 35-959 Rzeszów  
tel.: (017) 8651243, gkarnas@prz.edu.pl
3. Piotr Barański, Instytut Geofizyki Polskiej Akademii Nauk, ul. Księcia Janusza 64, 01-452 Warszawa  
tel.: (22) 6915-872, baranski@igf.edu.pl
4. Grzegorz Masłowski, Politechnika Rzeszowska, Wydział Elektrotechniki i Informatyki, Katedra Elektrotechniki i Podstaw Informatyki, ul. W. Pola 2, 35-959 Rzeszów  
tel.: (017) 8651253, maslowski@prz.edu.pl

**Streszczenie:** W niniejszym artykule przedstawiono kompleksowe pomiary piorunowego pola elektromagnetycznego z równoczesnym wykorzystaniem kilku anten. Przedmiot badań dotyczył incydentu burzowego z dnia 20 maja 2014 r. zarejestrowanego w AOS PRz i PW<sup>1</sup> w Bezmiechowej Górnej. Zestaw pomiarowy składał się z dwóch anten pola „szybkiego” (0,5 Hz - 3 MHz) oraz jednej anteny pola „wolnego” – młynka (0 Hz – 10 Hz). Anteny pola szybkiego pozwoliły na obserwację składowej radiacyjnej, porównanie danych z dwóch identycznych czujników pomiarowych i weryfikację pracy układu wyzwalającego. Dodatkowo na wieży pomiarowej zainstalowano atestowany miernik pola EM Maschek ESM-100 o zakresie 5 Hz – 400 kHz. Umożliwiło to zaobserwowanie dobowych zmian trzech składowych wektora oraz modułu pól elektrycznego i magnetycznego. W artykule przeprowadzono analizę pomiarów z wykorzystaniem programu Matlab, generującego wykresy pola elektromagnetycznego w funkcji czasu.

**Słowa kluczowe:** wyładowania atmosferyczne, detekcja i lokalizacja wyładowań piorunowych, mechanizm wyładowania piorunowego, ochrona odgromowa

## 1. WPROWADZENIE

Jednym z istotnych problemów współczesnego świata jest zapewnienie bezpiecznego środowiska pracy dla urządzeń elektronicznych, które przede wszystkim należy chronić zwłaszcza przed szkodliwymi zakłóceniami EM.

Jednym z zagrożeń wciąż pozostają wyładowania atmosferyczne, których proces inicjacji w chmurach burzowych jest jeszcze niewystarczająco zbadany i wymaga nowych laboratoryjnych oraz polowych akcji pomiarowych. Wyładowania te, będące szerokopasmowym źródłem emisji licznych energetycznych impulsów EM, są w stanie zakłócić pracę rozpowszechnionego sprzętu komputerowego, a nawet doprowadzić do jego kompletnego zniszczenia. Z tego względu niezbędne jest prowadzenie badań terenowych, mających na celu lepsze poznanie naturalnych uwarunkowań wielu złożonych procesów fizycznych, prowadzących do elektryzacji chmur burzowych oraz akumulacji w nich olbrzymich ładunków elektrycznych, sięgających nawet kilku setek C [4].

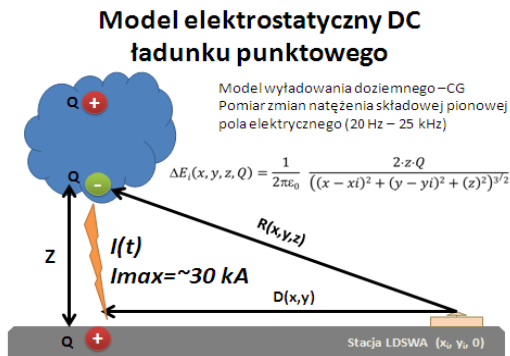
W niniejszej pracy przedstawiono wyniki analizy amplitudowo-częstotliwościowej sygnatur pola elektromagnetycznego wyładowań doziemnych i wewnątrzchmurowych zarejestrowanych podczas jednotygodniowej terenowej akcji pomiarowej w rejonie Bieszczad i elektrowni szczytowo-pompowej Solina.

## 2. METODA POMIAROWA

Nazienne pomiary zmian pola elektrycznego, generowanego przez wyładowania atmosferyczne w

<sup>1</sup> AOS PRz i PW – Akademicki Ośrodek Szybowcowy Politechniki Rzeszowskiej i Politechniki Warszawskiej

atmosferze ziemskiej, w szerokim paśmie częstotliwości od ułamków Hz do dziesiątek GHz [5] pozostają nadal najbardziej dostępnym ekonomicznie i sprzętowo sposobem do wyznaczania podstawowych parametrów udarów piorunowych [7].



Rys. 1 Schemat ideowy obrazujący koncepcję naziemnego pomiaru zmiany pola elektrycznego  $\Delta E$ , wywołanej doziemnym ujemnym udarem piorunowym, oraz jego aplikacji w organizacji wielopunktowej naziemnej sieci pomiarowej LSDWA<sup>2</sup> umożliwiającej badanie struktury elektrycznej doziemnych wyładowań wielokrotnych [8].

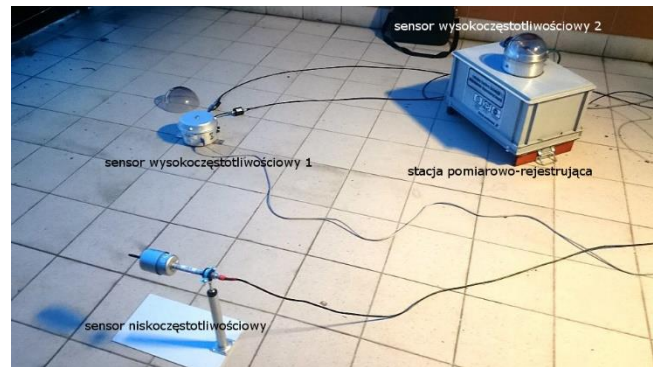
Przykładową organizację takich pomiarów, dającą także możliwość wyznaczania struktury elektrycznej wyładowań doziemnych przedstawiono na rysunku 1.

W zakresie bardzo wolnych zmian natężenia pola elektrycznego od 0 do 10 Hz, za pomocą mierników dynamicznych, np. z wirującym dipolem [1], można poza badaniem krzywych powrotu pola po wyładowaniach atmosferycznych i związanej z ich przebiegiem redystrybucji przestrzennego ładunku elektrycznego w otoczeniu pomiarowym, śledzić cały cykl rozwoju aktywności elektrycznej chmury burzowej, począwszy od chwili pojawienia się w nim pierwszych wyładowań wewnątrzchmurowych do jego stadium dysypacji, w którym zaczynają dominować wyładowania doziemne. Z kolei zastosowanie płaskich lub prętowych anten elektrycznych przyłączonych do specyfikowanych wzmacniaczy ładunkowych [9], pracujących z przetwornikami A/D w radiowym zakresie częstotliwości LF, daje możliwość cyfrowej rejestracji charakterystycznych przebiegów falowych, tzw. sygnatur, obrazujących szybkie zmiany pola E generowane przez poszczególne składowe udarów piorunowych, np. udary krótkotrwałe typu RS (ang. return stroke), czy udary długotrwałe typu CC (ang. continuing current), a także przez ciągi impulsów wyładowań wewnątrzchmurowych. Dzięki temu w zebranych materiale pomiarowym można nie tylko dokonać selekcji między dwoma głównymi grupami wyładowań atmosferycznych, ale także szczegółowo opisać charakterystyką amplitudowo-częstotliwościową wszystkie typy wyładowań doziemnych i ich składowe, tzn. zarówno pojedyncze czy wielokrotne incydenty udarów piorunowych [6].

### 3. SPRZĘT POMIAROWY

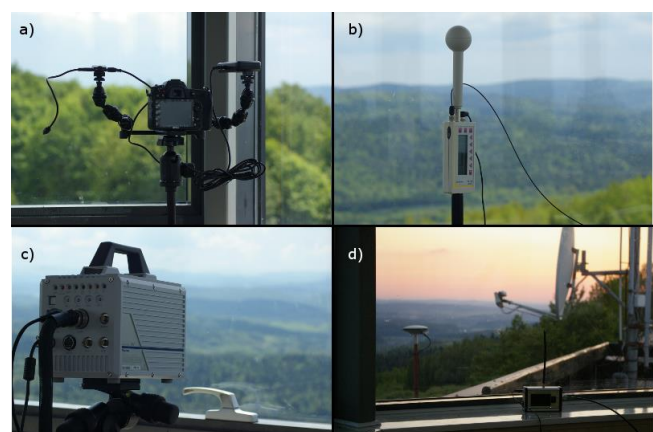
Do przeprowadzenia pomiarów wykorzystano zestaw aparaturowy składający się z dwóch anten pola elektrycznego

mierzących pole elektryczne odpowiednio w zakresie częstotliwości 0,5 Hz ÷ 3 MHz oraz 20 Hz ÷ 100 kHz. Dodatkowo zastosowano czujnik niskiej częstotliwości, tzw. młynek z wirującym dipolem, pracujący w paśmie częstotliwości od 0 Hz do 10 Hz (rys. 2).



Rys. 2 Sensory pomiarowe (nisko- i wysokoczęstotliwościowy) oraz stacja pomiarowo-rejestrująca.

Użyte anteny, sensory oraz układ wyzwalania toru wysokoczęstotliwościowego wykonano w laboratoriach wysokonapięciowych Politechniki Warszawskiej [3] oraz Politechniki Rzeszowskiej [2]. Powyższy zestaw umożliwia rejestrację składowych elektrostatycznej, pośredniej oraz radiacyjnej zmian pola E emitowanego wskutek przepływu prądu udarowego w kanałach wyładowań doziemnych, bliskich i odległych od stacji pomiarowej. Ponadto sygnał z toru wolnego i synchronizujący go z torem wysokoczęstotliwościowym znacznik czasowy (ze wspólnego odbiornika GPS) rejestrowano jednocześnie na dwóch kanałach cyfrowego oscyloskopu. Dodatkowym sprzętem pomiarowym użytym do równoczesnych rejestracji trzech składowych wektora oraz modułu pola elektrycznego E i magnetycznego H, w czasie emisji burzowych zakłóceń elektromagnetycznych w paśmie częstotliwości 5 Hz ÷ 400 kHz, był atestowany miernik firmy Maschek (typ ESM-100) z funkcją archiwizacji danych na komputerze oraz przenośny miernik do celów weryfikacyjnych (rys. 3 b, d).



Rys. 3 Dodatkowy sprzęt wykorzystywany w rejestracjach: a) aparat fotograficzny z akcesoryjnym wyzwalaczem oraz urządzeniem GPS, b) miernik pola elektrycznego Maschek ESM-100, c) szybka kamera cyfrowa firmy Photron, d) miernik wolnych zmian natężenia pola elektrycznego.

<sup>2</sup> LSDWA - Lokalny System Detekcji Wyładowań Atmosferycznych

W trakcie rejestracji kompleksowych zmian pola E podjęto również próbę rejestracji fotograficznej obserwowanych doziemnych wyładowań piorunowych oraz rozwoju czasowego ich kanałów wyładowczych. Wykorzystano do tego celu cyfrowy aparat fotograficzny wyposażony w urządzenie GPS oraz programowalny wyzwalacz, jak również szybką kamerę cyfrową do filmowania, z bardzo dużą szybkością 1000 klatek/s, ewolucji czasowej liderów krokowych bliskich uderzeń doziemnych (rys. 3 a, c). Niestety ze względu na stosunkowo duże zaciemnienie w czasie burzy oba aparaty optyczne należało ustawić w sposób wyjątkowo stabilny, co w dużej mierze ograniczyło możliwość ich łatwego przesuwania i koniecznej adaptacji oświetleniowej oraz zmiany kadru, związanej z szybkim przemieszczaniem się obserwowanych chmur burzowych i miejscem ich wyładowań doziemnych.



Rys. 4 Rozległa chmura burzowa z widocznym rdzeniem silnego opadu, w bliskim otoczeniu punktu pomiarowego.

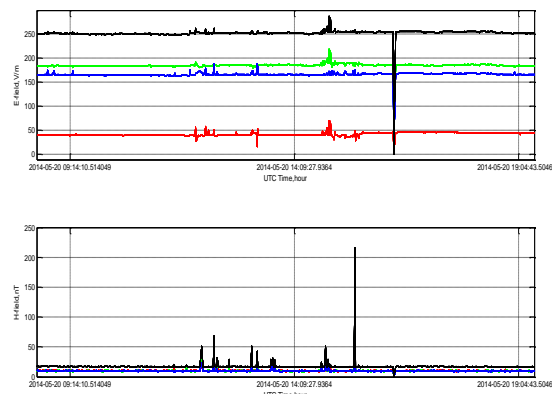
W rezultacie nie udało się wykonać czytelnych zdjęć rozwoju czasowego kanałów wyładowczych wyładowań doziemnych. Natomiast wizualne obserwacje kilku bliskich kanałów, następujących po sobie uderzeń doziemnych, wykazały dużą zmienność w namiarach ich azymutalnych kierunków, od NNE do S. Świadczyły one zatem o jednoczesnej aktywności elektrycznej różnych komór burzowych w otoczeniu stacji pomiarowej.

#### 4. WYNIKI

Szczegółową analizę zebranego materiału pomiarowego przeprowadzono w oparciu o własne skrypty i procedury opracowane do uruchomienia w środowisku programu MATLAB. Procedury te umożliwiły pokazanie na zsynchronizowanych czasowo wykresach charakterystycznych sygnatur pola elektrycznego wyładowań atmosferycznych zarejestrowanych w obu torach pomiarowych oraz wszystkich kanałach miernika Maschek<sup>3</sup>. Jak widać na rysunku 5, w momentach pojawienia się bliskich wyładowań atmosferycznych następuje skokowa zmiana natężenia obu pól. Pole elektryczne obniża się do zera, co wynika z chwilowego zrównania się potencjałów chmury i ziemi na skutek przepływu prądu piorunowego. Drugim efektem jest ujemny skok pola magnetycznego, o nieznacznej

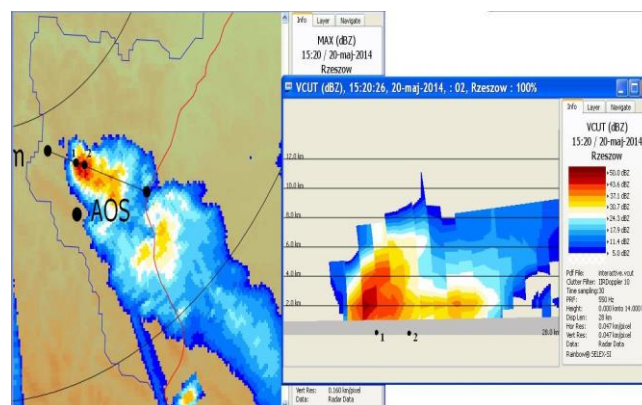
amplitudzie, wynikającej w tym przypadku prawdopodobnie z odległości wyładowania od punktu pomiarowego.

W przypadku wyładowań międzychmurowych występuje odmienny przebieg zjawiska, ponieważ zmiany pola elektrycznego nie są aż tak gwałtowne, jak w przypadku wyładowania doziemnego. Natomiast większe zmiany rejestrowano w polu magnetycznym, szczególnie kiedy wyładowania występują bezpośrednio nad punktem pomiarowym. Zestawiając zatem dwa różne typy przeprowadzonych rejestracji, można dokonać rozróżnienia, czy odnoszą się one do przypadku wystąpienia wyładowania doziemnego, czy też wewnątrzchmurowego.



Rys. 5 Przykładowe<sup>4</sup> rejestracje wartości pola elektrycznego i magnetycznego przy pomocy miernika Maschek.

Dla niektórych zarejestrowanych uderzeń piorunowych naniesiono lokalizacje geograficzne miejsc ich uderzeń na dopasowane czasowo mapy (skany) radarowe (CAPPI, EHT i VCUT) pochodzące z radaru dopplerowskiego IMGW-PIB<sup>5</sup> w Rzeszowie. Metoda ta pozwoliła zidentyfikować charakterystyczne obszary komórek burzowych, w których doszło do inicjacji rozpatrywanych uderzeń doziemnych.



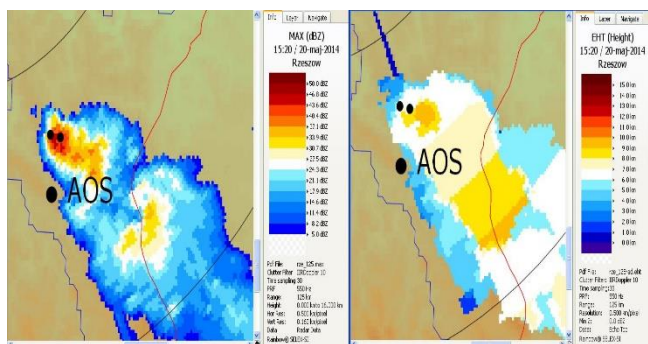
Rys. 6 Skan radarowy oraz przekrój pionowy jednej z chmur burzowych (wzdłuż cienkiej linii pokazanej na skanie radarowym w lewym panelu) w bliskim otoczeniu stacji pomiarowej(AOS) z naniesioną lokalizacją (otrzymaną z systemu LINET) dwóch uderzeń piorunowych (oznaczenia 1 i 2) jednego z doziemnych wyładowań wielokrotnych zarejestrowanych w naszych pomiarach. Odległość horyzontalna uderzeń 1 i 2 od punktu pomiarowego AOS wyniosła ok. 10 km.

<sup>3</sup> Przyrząd udostępnia cztery kanały pomiarowe związane z trzema składowymi pola elektrycznego ( $E_x$ ,  $E_y$ ,  $E_z$ ) oraz wypadkową ( $E_{xyz}$ ).

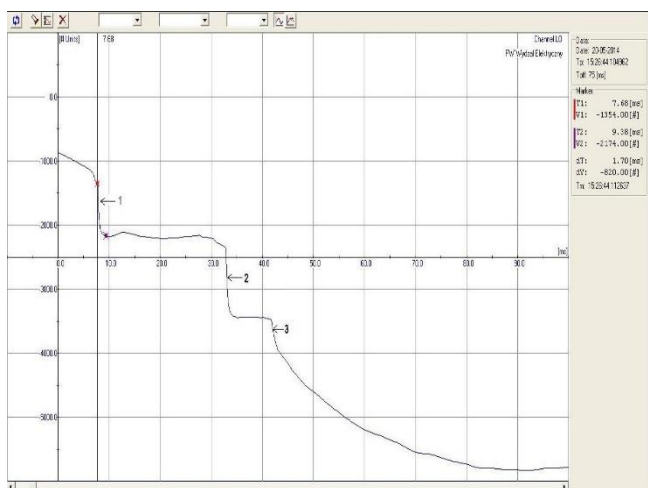
<sup>4</sup> Przykładowe, nawiązujące do skanów radarowych przedstawionych na kolejnych rysunkach.

<sup>5</sup> CAPPI - ang. Constant Altitude Plane Position Indicator, EHT - ang. Echo Height Top, VCUT - ang. Vertical CUT, IMGW-PIB - Instytutu Meteorologii i Gospodarki Wodnej-Państwowy Instytut Badawczy





Rys. 7 Skan radarowy (skan maksymalnej odbiciowości) oraz mapa wysokości wierzchołka echa (EHT) odpowiadające czasowo sytuacji przedstawionej na rys. 5.



Rys. 8 Sygnatura zmian pola E w wielokrotnym wyładowaniu doziemnym zarejestrowana w torze wysokoczęstotliwościowym 2 z własną stacją pomiarową (patrz rys. 2). Składowymi tego wyładowania były dwa ujemne uderzenia krótkotrwałe (typu RS) oznaczone przez 1 i 2 oraz trzeci końcowy uderzenie długotrwałe (oznaczony przez 3), zawierający oprócz fazy RS także fazę CC. Lokalizacje uderzeń 1 i 2 w odniesieniu do bazy pomiarowej (AOS) są podane na odnośnych skanach radarowych (patrz rys. 5 i 6). Amplitudy zmian pola E są tu podane w jednostkach umownych, tj. bitach przetwornika A/D stacji pomiarowej.

Na podstawie powyższych przykładowych skanów radarowych z naniesioną lokalizacją miejsc uderzeń piorunowych jesteśmy w stanie określić, w którym miejscu chmury burzowej miała miejsce ich inicjacja. W tym przypadku zlokalizowano je w bliskim sąsiedztwie głównego rdzenia opadowego tej chmury burzowej i strefie prądu zstępującego. Natomiast rozpoznanie samej struktury doziemnych wyładowań wielokrotnych i ich składowych jest możliwe na podstawie zarchiwizowanych cyfrowych plików pomiarowych, których przykładową wizualizację z przeglądarki danych przedstawia rysunek 8.

## 5. WNIOSKI

Pierwsza wyjazdowa sesja pomiarowa w 2014 r. potwierdziła konieczność dalszego prowadzenia opisanych w referacie badań. Zebrane dane umożliwiły po raz pierwszy przeprowadzenie kompleksowej analizy zmian pola elektrycznego w czasie występowania różnych wyładowań atmosferycznych w rejonie Bieszczad oraz wskazały na możliwość zastosowania nowej techniki pomiarowej do bardziej precyzyjnego wyznaczania ich amplitudowych oraz czasowych parametrów. Może to posłużyć do weryfikacji

obecnie przyjętych normatywnych zakresów zmienności opisywanych parametrów w charakterystyce naturalnych uderzeń piorunowych. Zdobyta wiedza zastosowana w wykonaniu właściwej ochrony przeciwprzebiegowej i odgromowej, może pomóc w ograniczeniu szkodliwych oddziaływań wyładowań atmosferycznych na pracę wrażliwego sprzętu elektronicznego. W konsekwencji będzie można również wprowadzić nowe wytyczne odnośnie projektowania profesjonalnych zabezpieczeń przeciwprzebiegowych, co wypłynie na podniesienie poziomu ochrony odgromowej w życiu codziennym.

Wyznaczone z zebranych danych pomiarowych parametry doziemnych uderzeń piorunowych w rejonie Bieszczad mogą być wykorzystane do zwiększenia poziomu ochrony odgromowej naziemnej infrastruktury gospodarczej, jak np. rozwijające się farmy wiatrowe, czy istniejąca duża zapora wodna w tej części Polski. Należy zauważyć, że dopracowanie własnych procedur komputerowych do analizy amplitudowo - częstotliwościowej danych pomiarowych, otrzymywanych jednocześnie z kilku wolnych i szybkich sensorów zmian pola E w czasie wyładowań doziemnych, może zapewnić większą precyzję czasową w prognozowaniu występowania tego rodzaju groźnych zjawisk atmosferycznych. W efekcie zaowocuje to wzrostem bezpieczeństwa wrażliwej na zakłócenia elektromagnetyczne infrastruktury naziemnej oraz mniejszymi kosztami ewentualnych napraw lub przestojów w dopływie energii elektrycznej.

## 6. BIBLIOGRAFIA

- Berliński J., Pankanin G., Kubicki M.: Large scale monitoring of troposphere electric field, Proceedings of the 13-th ICAE, Beijing, China, August 13-17 2007, vol. I, s. 124-126.
- Karnas G., Masłowski G., Barański P., Berliński J., Pankanin G.: Instrumentation and data analysis process at the new lightning research station in Poland, Przegląd Elektrotechniczny, ISSN 0033-2097, R. 89 NR 6/2013, s. 217-220.
- Łoboda M., Betz H. D., Barański P., Wiszniewski J., Dziewit Z.: New Lightning Detection Networks in Poland – LINET and LLDN, The Open Atmospheric Science Journal, 3, 2009, s. 29-38.
- MacGorman, D.R., Rust W.D.: The electrical nature of storms, Oxford University Press, New York, 1998, s. 49-53.
- Pierce E. T.: Atmospherics and radio noise, Golde R. H. (wyd.) Lightning, vol. 1, Physics of Lightning, Academic Press, New York, 1977, s. 351-384.
- Rakov V. A.: Electromagnetic Methods of Lightning Detection, Surv. Geophys., 34, 2013, s. 731-753.
- Rakov V.A., Uman M.A.: Lightning: Physics and Effects, Cambridge University Press, Cambridge, 2003, s. 108-213.
- Sobolewski K., Barański P., Wiszniewski J., Łoboda M.: Struktura elektryczna doziemnych piorunowych wyładowań wielokrotnych na podstawie danych uzyskanych z Lokalnego Systemu Detekcji Wyładowań Atmosferycznych (LSDWA) w rejonie Warszawy w 2009 r., Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej 289, Elektrotechnika 33, 2013, s. 215-229.
- Uman M. A.: The Lightning Discharge, Academic Press, Orlando, Florida, 1987, s. 345-351.

# **ANALYSIS OF LIGHTNING DISCHARGE ELECTRIC FIELD SIGNATURES OBTAINED FROM THE COMPREHENSIVE MEASUREMENTS OF ASSOCIATED ELECTROMAGNETIC PULSE RADIATION IN THE FREQUENCY RANGE FROM 0 TO 3 MHz, CARRIED OUT AT THE ACADEMIC GILDER CENTER OF THE RZESZÓW AND WARSAW TECHNICAL UNIVERSITIES AT BEZMIECHOWA IN MAY 2014**

We have presented in this paper some results obtained from the amplitude-frequency analysis of electric field signatures associated with cloud-to-ground (CG) and intra-cloud (IC) lightning discharges that were recorded in the Bieszczady region during the one-week field campaign. The apparatus set used in this campaign consisted of three electric field sensors, i.e. the fast-track unit that was operated in the frequency range from 0.5 Hz to 3 MHz, the slow-track unit that was operated in the frequency range from 20 Hz to 100 kHz and the field mill with rotating dipole operating in the frequency range from 0 Hz to 10 Hz. Such complete measuring devices have allowed for recoding both the electrostatic, intermediate and radiation components of the electric field changes associated with close and distant lightning flash incidents. Additionally, we have used the certified Maschek meter (type ESM-100) for simultaneous recordings of three vector components and the module of electric and magnetic fields connected with the electromagnetic interferences in the frequency range from 5 Hz to 400 kHz that have occurred during observed thunderstorms. The data stream obtained from the Maschek meter has been separately archived on a portable computer. The detailed analysis of all collected data was carried out on the basis of own scripts and procedures designed to operate in the Matlab environment. The relevant parameters of lightning CG strokes that we have determined from the collected electric and magnetic field measurement data in the Bieszczady region can be used to increase the level of lightning protection of the ground industrial infrastructure existing in this part of Poland, such as several developing wind farms or the large water dam of the electric power plant "Solina".

**Keywords:** lightning flash, cloud-to-ground lightning stroke, lightning detection and location network, lightning protection.