

System detekcji i lokalizacji wyładowań atmosferycznych Blitzortung

Streszczenie. W pracy przedstawiono możliwości, jakie dają współczesne systemy detekcji i lokalizacji wyładowań atmosferycznych. Skupiono się na systemach opartych o analizę rozprzestrzeniającego się piorunowego pola elektromagnetycznego rejestrowanego przez rozmieszczone naziemne systemy antenowe. Scharakteryzowano krótko wybrane systemy profesjonalne oraz szerzej amatorski system Blitzortung, który swoją wysoką sprawność zawdzięcza bardzo dużej liczbie stacji rejestrujących rozmieszczonych głównie w Europie, Stanach Zjednoczonych i Australii. Opisano także podstawowe techniki używane w systemach detekcji i lokalizacji a także ich wady i zalety.

Abstract. The paper presents the possibilities offered by the modern lightning detection and location systems. The study focused on the analysis of the propagation lightning electromagnetic field recorded by ground-based distributed antenna systems. Selected professional systems have been characterized together with the amateur Blitzortung system. This system owes high efficiency due to the very large number of detecting stations located mainly in Europe, the United States and Australia. Also, the basic techniques used in the lightning detection and location systems and their advantages and disadvantages are described. (**Lightning detection and location system Blitzortung**).

Słowa kluczowe: piorun, zaburzenie elektromagnetyczne, pole magnetyczne, systemy detekcji i lokalizacji wyładowań atmosferycznych.

Keywords: lightning, electromagnetic disturbance, magnetic field, lightning detection and location systems.

Wstęp

Prowadzone w różnych ośrodkach badawczych na świecie pomiary i rejestracje zjawisk piorunowych doprowadziły do lepszego poznania kształtów składowych pola elektromagnetycznego powstającego podczas wyładowania atmosferycznego. Kształt fali piorunowej został opisany w międzynarodowych normach a w ostatnich latach powstała także norma dotycząca burzowych systemów ostrzegawczych [1]. Opisane są tam kolejno fazy prądowe występujące podczas wyładowania atmosferycznego a także zestawione podstawowe techniki używane podczas detekcji i lokalizacji wyładowań. Systemy detekcji podzielone zostały także na cztery klasy wykrywające poszczególne fazy zjawiska. Bardzo szerokie spektrum częstotliwościowe pola elektromagnetycznego pochodzącego od pola piorunowego pozwala na stosowanie metod bazujących na częstotliwościach zarówno bardzo niskich jak i bardzo wysokich. Istniejące naziemne systemy lokalizacji wyładowań oparte są przeważnie o dwie techniki detekcji, które wzajemnie się uzupełniają. Z najbardziej znanych systemów można wymienić europejskie LINET, SAFIR (polski PERUN), ATD, EUCLID i amerykańskie NALDN, IMPACT, LPATS, LDAR. Bardzo dynamicznie rozwija się także amatorska sieć detekcji i lokalizacji wyładowań atmosferycznych pod nazwą Blitzortung. Jej duża skuteczność i możliwości wynikają głównie z bardzo dużej ilości detektorów rozmieszczonych na terenie całej Europy, Stanów Zjednoczonych i Australii. Obecnie naziemne systemy detekcji i lokalizacji wyładowań piorunowych są szeroko wykorzystywane w takich dziedzinach jak meteorologia, lotnictwo, pożarnictwo, energetyka, ubezpieczenia, ochrona ludzi i inne [2-4].

Metody detekcji wyładowań piorunowych

Fala elektromagnetyczna powstająca podczas wyładowania atmosferycznego ma bardzo szerokie spektrum częstotliwości poczynając od ekstremalnie niskich częstotliwości, poprzez bardzo niskie (VLF - very low frequencies: 3 kHz – 30 kHz), częstotliwości niskie (LF - low frequencies: 30 kHz – 300 kHz), częstotliwości średnie aż do bardzo wysokich (VHF - very high frequencies: 30 MHz – 300 MHz) i częstotliwości gigahercowych [1]. Tak bardzo duży zakres częstotliwości wynika ze specyfiki zjawiska a stosowanie odpowiedniej techniki detekcji i związanym z nim przedziałem częstotliwości, w którym analizuje się

sygnały, pozwala na pozyskanie informacji nawet o typie wyładowania (wyładowania doziemne, wewnątrz- i międzychmurowe, dodatnie i ujemne). Stosowane obecnie techniki detekcji bazują najczęściej na analizie częstotliwości z zakresów VLF, LF i VHF [1, 2]. Techniki łączące dwa zakresy częstotliwości pozwalają znacznie poszerzyć możliwości detekcji względem metod opartych tylko na jednym zakresie. W zależności od zastosowanej techniki i związanej z nią częstotliwości detekcji na podstawie rejestrowanych przez stacje sygnałów można rozpoznać poszczególne fazy wyładowania: fazę początkową, fazę wzrostu, fazę dojrzałą i fazę rozpraszania [1]. Największy zasięg detekcji sygnałów mają stacje pracujące na niskich i bardzo niskich częstotliwościach a ich detekcja sięga nawet tysięcy kilometrów, czego przykładem jest brytyjski ATD z 7 stacjami na terenie Europy [2]. Pole elektromagnetyczne z tego zakresu częstotliwości emitowane przez kanał piorunowy jest wyjątkowo silne dla wyładowań głównych [3].

Metody lokalizacji wyładowań piorunowych

W systemach lokalizacji często stosuje się łączone techniki detekcji pozwalające wykorzystywać różne zakresy częstotliwości (np. LF + VHF) i różne techniki lokalizacji wyładowań [1, 2]. Najbardziej popularne techniki lokalizacji wyładowań stosowane w systemach naziemnych to TOA (time of arrival) oraz MDF (magnetic direction finder). Technika TOA polega na pomiarze różnic czasowych w rejestrowanych sygnałach docierających do rozmieszczonych na pewnym obszarze stacji detekcji i na tej podstawie wyznacza się współrzędne miejsca wyładowania. Technika TOA może być stosowana zarówno dla pasma LF jak i VHF. Stosowany zakres częstotliwości determinuje zasięg detekcji i możliwość wykrywania określonego typu wyładowań. Dla pasma LF detekcja obejmuje tylko wyładowania doziemne, ale ma duży zasięg detekcji, natomiast dla VHF wszystkie typy wyładowań, ale mały zasięg detekcji [1, 2]. Zastosowanie techniki detekcji wysokich częstotliwości (VHF) pozwala uzyskać dużą dokładność lokalizacji sięgającą nawet do 0,5 km jednak wymaga zastosowania dużej ilości stacji rozmieszczonych w niewielkich odległościach rzędu 100 km. Technika bazująca na analizie sygnałów niskich częstotliwości pozwala natomiast na umieszczanie stacji w odległościach nawet tysięcy kilometrów od siebie lecz lokalizacja

wyładowań takich systemów jest ograniczona co do dokładności i nie umożliwia rozpoznawania wyładowań wewnątrz i między chmurami [1, 2].

Wybrane systemy lokalizacji wyładowań piorunowych

Najbardziej popularne obecnie metody detekcji używane w systemach lokalizacji wyładowań atmosferycznych bazujące na analizie pochodzącego od wyładowania piorunowego promieniowania elektromagnetycznego nie obejmują swoim zasięgiem terenu całej kuli ziemskiej. Pozwalają jednak na uzyskanie dużych dokładności lokalizacji wyładowań. Detektory pola elektromagnetycznego pracują najczęściej w połączonej sieci pozwalającej lokalizować wyładowania na obszarze wielkości pojedynczego państwa lub nieco większym. Istniejące satelitarne systemy optyczne (OTD - optical transient detector) rejestrują wyładowania na bardzo dużym obszarze kuli ziemskiej, także nad oceanami, jednak dokładność lokalizacji pojedynczych wyładowań z takich systemów są małe [1, 2]. Poza tym systemy tego typu są dostępne tylko dla nielicznych państw, mających dostęp do odpowiednich satelitów.

Na podstawie danych z pojedynczej naziemnej stacji detekcji nie jesteśmy w stanie określić dokładnej lokalizacji miejsca wyładowania. Wynika to głównie z faktu, że każde wyładowanie jest inne, o różnym natężeniu prądu piorunowego i czasie jego trwania [5, 6, 7]. Stacja taka pozwala jedynie na określenie intensywności wyładowań w jej otoczeniu i tylko oszacowaniu lokalizacji poszczególnych wyładowań, dlatego też stosuje się systemy składające się z sieci wielu detektorów wysyłających rejestrowane dane do odpowiednich serwerów i tam przetwarzane.

W roku 2006 Polska przystąpiła do ogólnoeuropejskiego systemu o nazwie LINET [8]. Jest to profesjonalny system, który potrafi wykonać detekcję i lokalizację wszystkich typów wyładowań atmosferycznych oraz uzyskać informacje o parametrach prądu piorunowego. Swoim zasięgiem obejmuje większą część Europy a detektory rozmieszczone w poszczególnych państwach są połączone w jeden system. Obecnie na terenie Polski rozmieszczonych jest 14 stacji detekcji pokrywających swoim zasięgiem cały kraj (rys. 1). Jedna ze stacji systemu LINET znajduje się w budynku Politechniki Rzeszowskiej.

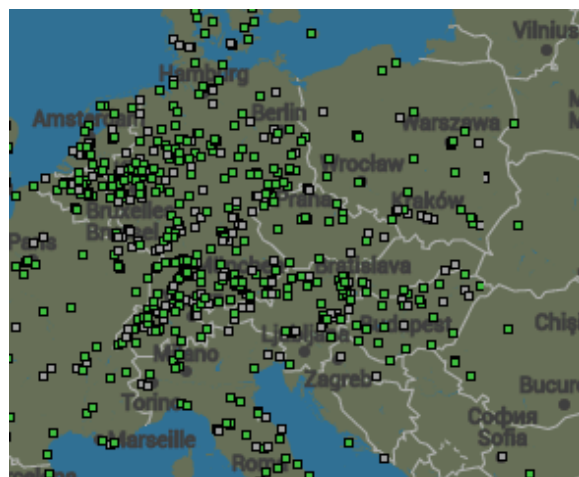


Rys.1. Rozmieszczenie stacji detekcyjnych systemu LINET na terenie Europy [8]

Polski system o nazwie PERUN jest systemem typu SAFIR (Francuski system detekcji i lokalizacji wyładowań atmosferycznych) zbudowanym tylko z 9 stacji rozmieszczonych na terenie Polski średnio w odległościach ok. 200 km, działającym od roku 2002 [2]. Lokalizacja

wyładowań w tym systemie jest realizowana za pomocą techniki znajdowania kierunku DF, realizowanej na technice elektromagnetycznej interferometrii w paśmie bardzo wysokich częstotliwości VHF. System PERUN bazuje na interferometrycznym pomiarze różnicy faz fali elektromagnetycznej odbieranej przez dwie różne anteny. Różnica faz jest ściśle zależna od kierunku rozchodzenia się fali i jest używana do wyznaczenia kątowej pozycji (kąty azymutu i elewacji) źródła fali [1, 2]. Dokładność i skuteczność lokalizacji jest różna na terenie Polski i ze względu na rozmieszczenie stacji dokładność wynosi od ok. 1 km na terenie 90% części Polski do ok. 2-3 km na terenach przygranicznych (Pomorze, Bieszczady) a skuteczność detekcji sięga 95%. PERUN jest systemem zamkniętym to znaczy dostęp do danych pomiarowych mają tylko uprawnione jednostki dysponujące dostępem do odpowiednich terminali.

Spośród systemów detekcji i lokalizacji wyładowań atmosferycznych na wyróżnienie zasługuje także amatorski system Blitzortung [9]. System powstał około roku 2003 a od 2012 bardzo dynamicznie się rozwija. Pierwsze stacje o nazwie GREEN podłączane były do dowolnego komputera PC i za pośrednictwem sieci Internet przekazywały zarejestrowane wyniki do serwera. Obecnie system pracuje głównie z wykorzystaniem kontrolerów o nazwie RED podłączanych bezpośrednio do sieci LAN. W planach jest już nowa, udoskonalona wersja systemu o nazwie BLUE. Twórcą systemu jest prof. Egon Wanke z Uniwersytetu w Dusseldorfie. Z założenia system jest otwarty dla osób chcących uczestniczyć w projekcie. Należy w tym celu zakupić odpowiedni zestaw do samodzielnego zmontowania i wykonać odpowiednią antenę. Niewątpliwą zaletą systemu jest bardzo duża liczba stacji detekcji rozmieszczonych głównie w Europie (rys. 2), ale także w USA, Australii, Azji. Obecnie na całym świecie jest już ponad 1200 stacji, z czego jednocześnie działa ok. 800, co pozwala w sposób ciągły pokryć swoim zasięgiem detekcji duży obszar nawet w sytuacji, gdy nie pracuje część stacji.



Rys.2. Mapa stacji systemu Blitzortung w Europie środkowej. Kolor zielony – stacje aktywne, kolor szary – stacje nieaktywne [9]

System pracuje z wykorzystaniem dwóch rodzajów anten odbierających składową magnetyczną pola i składową elektryczną. Anteny „magnetyczne” mogą być wykonane, jako tzw. anteny pętlowe o średnicy od 40 cm do 1 m umieszczone w dwóch prostopadłych płaszczyznach pionowych lub też, jako anteny ferrytowe o małych wymiarach. Dodatkowo oba typy anten mogą być ekranowane w celu wyeliminowania niepotrzebnej w tym wypadku składowej elektrycznej pola. Antena „elektryczna” wykonana jest z pionowego, miedzianego przewodnika,

najczęściej drutu. Długość tej anteny zależy głównie od „zaszumienia” elektromagnetycznego środowiska, w którym jest ona umieszczona i wynosi od 20 cm do ok. 80 cm.

Działanie systemu Blitzortung

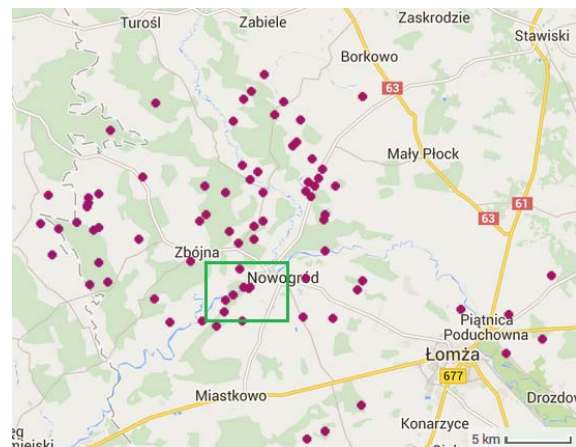
System Blitzortung lokalizuje wyładowania z użyciem metody TOA. Każdy zarejestrowany przez stację sygnał napięciowy, którego maksymalna wartość, przekracza pewien określony poziom, wraz z dokładnym czasem z GPS i współrzędnymi geograficznymi stacji rejestrującej, wysyłany jest do jednego z serwerów. Następnie system na podstawie otrzymanych danych z różnych stacji wyznacza współrzędne miejsca wyładowania. W obecnej fazie rozwoju system potrafi lokalizować jedynie wyładowania doziemne i częściowo wewnątrz chmur jednak nie są one rozpoznawane, jako tego typu. Wynika to głównie z zastosowanej techniki detekcji niskich i bardzo niskich częstotliwości. Prowadzone prace rozwojowe zmierzają jednak do rozszerzenia możliwości systemu o detekcję i rozpoznawanie wyładowań pomiędzy chmurami oraz rodzaju polaryzacji (zastosowanie dodatkowych anten dla składowej elektrycznej pola) [9].

Zdolności wychwytywania sygnałów przez anteny poszczególnych stacji systemu Blitzortung są niestety różne. Wynika to w pewnym stopniu z różnorodności zastosowanych anten i znajdujących się w ich pobliżu źródeł zaburzeń elektromagnetycznych. Anteny montowane są często na elewacjach domów, strychach a nawet umieszczone wewnątrz budynków, co znacząco przyczynia się do spadku wydajności detekcji i zaszumienia odbieranych sygnałów. Na szczęście system jest odporny na tego typu niedogodności, ponieważ daje użytkownikom duży zakres regulacji wzmocnień sygnałów, opcje automatycznej regulacji a także kilka filtrów eliminujących sygnały nie pochodzące od wyładowań atmosferycznych a będące zakłóceniami. Filtrowanie i automatyzacja systemu jest ciągle ulepszana gdyż do serwerów wysyłana jest bardzo duża ilość zarejestrowanych danych, które przeważnie nie są pochodzenia piorunowego. Statystycznie tylko około jedna trzecia tych sygnałów jest rozpoznawana, jako pochodzące od wyładowań atmosferycznych. Stosowane filtry mają na celu wyeliminowanie sygnałów nie pochodzących od wyładowań piorunowych typu „szpilki” (ang. spike), sygnałów sinusoidalnych oraz serii sygnałów (ang. burst) liczących po kilkadziesiąt impulsów na sekundę. Stacje mogą pracować w opcji całkowicie automatycznej, która ustala optymalne wzmocnienie dla poszczególnych kanałów i włącza lub wyłącza filtry lub też w trybie półautomatycznym z zadaniem maksymalnym wzmocnieniem dla każdego z kanałów i włączonymi lub nie filtrami. Wzmacniacz sygnałów dołączony bezpośrednio do każdej z anten jest czterostopniowy oferujący maksymalne wzmocnienie na poziomie 41000. W praktyce wartości wzmocnień zmieniają się automatycznie i oscylują w granicach od 800 do 5000, co zależy głównie od parametrów zastosowanych anten i od odległości frontów burzowych od danej stacji.

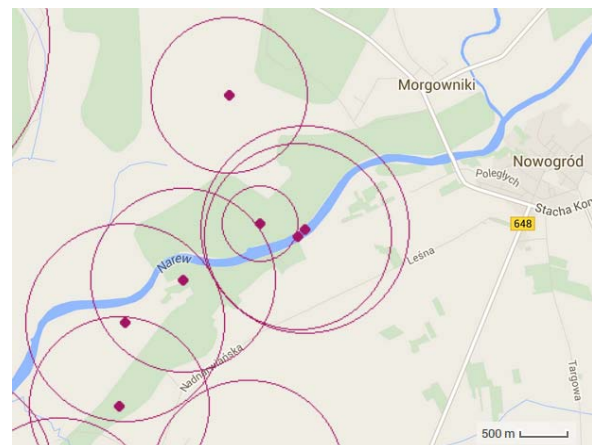
Przykładowe wyniki rejestracji systemu Blitzortung

W odróżnieniu od systemów komercyjnych Blitzortung udostępnia publicznie dokładne mapy z umieszczonymi miejscami wyładowań atmosferycznych, mapy gęstości wyładowań na danym obszarze, różnego rodzaju animacje. Dostępne są nawet mapy, które pokazują wyładowania w czasie rzeczywistym z opóźnieniem kilku sekund, czego nie ma żaden inny system. Dla aktywnych uczestników projektu są dodatkowo dostępne dane archiwalne wyładowań, jak również charakterystyki czasowe i częstotliwościowe zarejestrowanych sygnałów pochodzących od wyładowań piorunowych a także bardzo

dokładne mapy i różnego rodzaju statystyki i zestawienia. Na rysunkach 3 i 4 pokazano lokalizacje wyładowań zarejestrowanych przez system detektorów Blitzortung w nocy z 15 na 16 października 2014 roku w okolicach Łomży. Rysunek 3 przedstawia obszar o rozmiarach ok. 40x30 km natomiast rysunek 4 powiększony z rysunku 3 prostokąt o rozmiarach ok. 5x4 km, gdzie widać dodatkowo okręgi, których promień odpowiada dokładności lokalizacji poszczególnych wyładowań wynoszącej od 400 m do ok. 1 km dla tego obszaru.



Rys.3. Wyładowania zarejestrowane przez system Blitzortung [9]



Rys.4. Wyładowania zarejestrowane przez system Blitzortung [9]

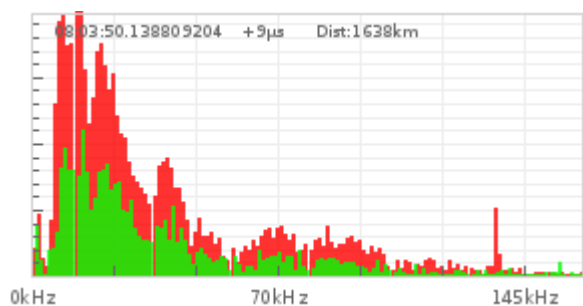
Dodatkowo, dla zalogowanych użytkowników, po kliknięciu na punkt reprezentujący dane wyładowanie otwiera się nowe okno z informacjami na temat konkretnego wyładowania. Można odczytać wtedy wyznaczoną lokalizację geograficzną i dokładność lokalizacji wyładowania, liczbę stacji, które je zarejestrowały oraz kąt lokalizacji i odległość od każdej stacji rejestrującej.

Na rysunku 5 przedstawiono przebiegi sygnałów pochodzących z dwóch ekranowanych anten pętlowych o średnicach 90 cm, zarejestrowane przez stację Rzeszów-Milocin w dniu 31.10.2014. Oś pionowa jest wyskalowana w voltach i reprezentuje wartości napięć, jakie powstały w antenach. Wartości tych napięć zależą od wielu czynników takich jak odległość od wyładowania, wartość prądu pioruna, orientacji i typu anten. Dla wyładowań bardzo odległych są to ułamki wolta, natomiast dla bardzo bliskich wartości tych napięć sięgają kilku woltów. Na podstawie tych pojedynczych sygnałów nie można więc w sposób bezpośredni wyciągnąć wniosków na temat wyładowania i dopiero w zestawieniu z danymi z innych stacji jest to możliwe. Na wykresie podane są także parametry dla zarejestrowanych sygnałów takie jak

dokładny czas UTC, odległość od stacji, wielkości wzmacnień dla dwóch stopni (oddzielone kropką) dla obu kanałów oraz inne dane. Na rysunku 6 pokazane jest widmo sygnałów z rysunku 5.



Rys.5. Przebieg czasowy pochodzący od wyładowania w pobliżu Krety zarejestrowany przez stację Rzeszow-Milocin, Polska



Rys.6. Charakterystyka częstotliwościowa sygnału z rysunku 6

Na rysunkach 7-9 przedstawiono zarejestrowane sygnały przez wybrane stacje w różnych rejonach Europy, dla wyładowania w dniu 22.10.2014 na terenie Chorwacji. Na przebiegach widać duże podobieństwo kształtów zarejestrowanych sygnałów pomimo znacznego oddalenia od siebie stacji rejestrujących, przy czym wyładowanie zarejestrowały łącznie aż 154 stacje na terenie Europy.



Rys.7. Przebieg czasowy zarejestrowany przez stację Rzeszow-Milocin, Polska



Rys.8. Przebieg czasowy zarejestrowany przez stację Sieghartskirchen, Austria



Rys.9. Przebieg czasowy zarejestrowany przez stację Latina, Włochy

Wnioski

Systemy detekcji i lokalizacji wyładowań spełniają ważną funkcję pozwalając określić miejsca wystąpienia wyładowań atmosferycznych z dokładnością dochodząca do kilkuset metrów. Pozwala to na dokładne określenie kierunków rozchodzenia się frontów burzowych a także pomaga w tworzeniu systemów ostrzegawczych oraz wspomaganiu i rozszerzaniu ich możliwości. Dane statystyczne z lat minionych pozwalają dodatkowo określać gęstość wyładowań na danym obszarze, co znacząco pomaga podczas określania stopnia ryzyka zagrożenia piorunowego na danym obszarze i w doborze urządzeń ochronnych dla zabezpieczanych systemów [2, 3]. Dane z systemów komercyjnych takich jak PERUN, LINET są czasami także sprzedawane np. firmom ubezpieczeniowym a dostęp do wyników mają tylko uprawnieni użytkownicy. Największą zaletą systemu Blitzortung jest jego otwartość i duża liczba stacji w Europie i na świecie, dlatego też pojedyncze wyładowanie jest zarejestrowane średnio przez kilkadziesiąt stacji jednocześnie. Dodatkowo dane rejestrowane i gromadzone przez systemy, takie jak przebiegi czasowe i charakterystyki częstotliwościowe oraz inne parametry wyładowań, pozwalają na weryfikację danych pomiarowych uzyskiwanych w instytutach badawczych wykonujących pomiary prądów i pól elektromagnetycznych pochodzenia piorunowego [5, 6], jak również wyników z wykonywanych symulacji komputerowych propagacji piorunowego pola elektromagnetycznego nad ziemią [3, 7].

LITERATURA

- [1] Norma PN-EN 50536. Ochrona przed piorunami – burzowy system ostrzegawczy (2011)
- [2] Bodzak P., Detekcja i lokalizacja wyładowań atmosferycznych, Warszawa (2006), www.imgw.pl
- [3] Masłowski G., Analiza i modelowanie wyładowań atmosferycznych na potrzeby ochrony przed przepięciami, *Rozprawy, Monografie 208, AGH, Kraków*, (2010)
- [4] Łoboda M.: Detekcja wyładowań atmosferycznych na obszarze Polski, *Przegląd Elektrotechniczny*, (2009), nr.9, 256-260
- [5] Haddad M.A., Rakov V.A., Cummer S.A., New measurements of lightning electric field in Florida: Waveform characteristics, interaction with the ionosphere, and peak current estimates, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 117, (2012), 1-26
- [6] Karnas G., Masłowski G., Preliminary measurements and analysis of lightning electric field recorded at the observation station in the South-east part of Poland, *Przegląd Elektrotechniczny*, (2014), n.4, 97-99
- [7] Gamracki M., Modelowanie matematyczne propagacji piorunowego zaburzenia elektromagnetycznego nad strątną ziemią, *Przegląd Elektrotechniczny*, (2014), nr.7, 171-174
- [8] <https://www.nowcast.de> (2014)
- [9] <http://www.blitzortung.org> (2014)

Autor: dr inż. Mariusz Gamracki, Politechnika Rzeszowska, Katedra Elektrotechniki i Podstaw Informatyki, ul. W. Pola 2, 35-959 Rzeszów, e-mail: mgamrac@prz.edu.pl