

*Centrum Ochrony
przed Przepięciami i Zakłóceniami Elektromagnetycznymi
w Białymstoku*



Lokalne systemy wczesnego ostrzegania przed wyładowaniami atmosferycznymi

Opracowanie:

dr inż. Tomasz Maksimowicz
dr inż. Mirosław Zielenkiewicz

RST Sp. z o.o.

15-620 BIAŁYSTOK
ul. Elewatorska 17/1

tel.: 792 350 100

www.rst.bialystok.pl
e-mail: rst@rst.bialystok.pl

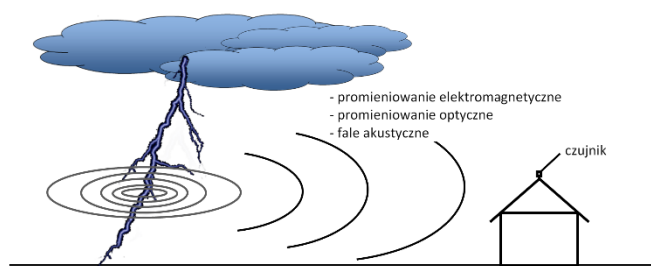


Białystok, sierpień 2011 r.

1. Wstęp

Wyładowania atmosferyczne każdego roku są przyczyną groźnych porażień ludzi oraz znaczących strat finansowych związanych z wyrządzonymi uszkodzeniami fizycznymi. Według danych statystycznych aż 30% porażień ludzi stanowią wypadki śmiertelne [1]. Straty materialne są pośrednim wynikiem oddziaływania prądu wyładowania atmosferycznego i powstają głównie z powodu pożarów oraz awarii układów elektrycznych i elektronicznych. W celu redukcji ryzyka związanego z zagrożeniem piorunowym stosuje się powszechnie znane środki ochrony w postaci tradycyjnych instalacji odgromowych oraz, wprowadzonych na przestrzeni ostatnich dwóch dekad, układów do ograniczania przepięć. Środki te w niektórych sytuacjach mogą okazać się jednak niewystarczające dla zapewnienia dostatecznego bezpieczeństwa ludzi oraz wrażliwej aparatury elektronicznej. Doskonałym uzupełnieniem konwencjonalnej ochrony są lokalne systemy wczesnego ostrzeżenia przed wyładowaniami atmosferycznymi (TWS *ang. Thunderstorm Warning System*), które stwarzają możliwość podjęcia kroków zaradczych zanim nastąpi wyładowanie atmosferyczne w chroniony obiekt lub w jego pobliżu. Umożliwiają one podjęcie tymczasowych działań zapobiegawczych, takich jak ewakuacja ludzi z zagrożonego terenu lub wyłączenie urządzeń na czas zagrożenia. Systemy lokalne zapewniają bieżące monitorowanie stanu zagrożenia piorunowego niezależnie od komunikatów meteorologicznych oraz od komercyjnych sieci detekcji i lokalizacji wyładowań atmosferycznych takich jak NLDN, EUCLID, PERUN [2], czy LINET [1]. Na rynku dostępnych jest wiele lokalnych systemów wczesnego ostrzeżenia oferujących różnicowane możliwości. Prowadzone są także prace Europejskiego Komitetu Normalizacyjnego Elektrotechniki (CENELEC) dotyczące wymagań oraz przykładów zastosowań takich systemów zakończone opublikowaniem w tym roku dokumentu normatywnego [3].

2. Klasyfikacja systemów

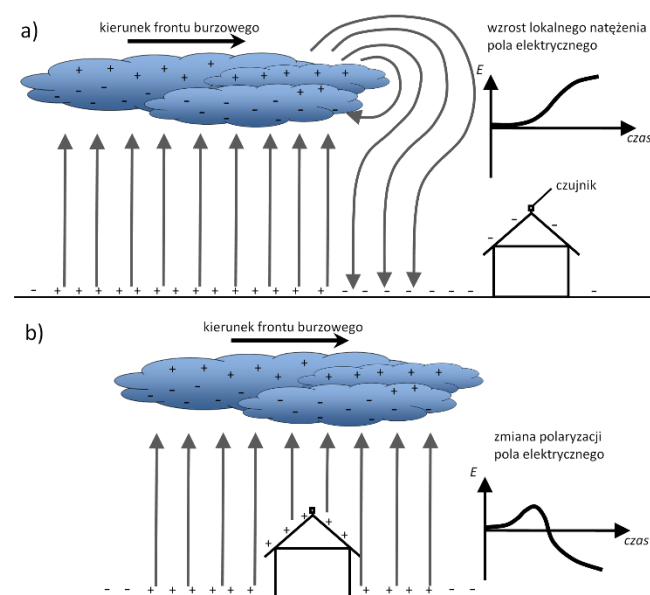


Rys. 1. Idea działania systemów detekcyjnych

Systemy ostrzeżenia przed wyładowaniami atmosferycznymi można podzielić przede wszystkim na detekcyjne - LDS (*ang. Lightning Detection System*) i predykcyjne - LPS (*ang. Lightning Prediction System*). Podstawowa zasada działania układów detekcyjnych polega na oszacowaniu lokalizacji doziemnych wyładowań piorunowych na podstawie impulsów pól elektromagnetycznych,

promieniowania optycznego lub fal akustycznych [4]. Dotychczasowa wiedza na temat zjawisk atmosferycznych [5] pozwala na wyodrębnienie sygnałów związanych z wyładowaniami doziemnymi od tych, które pochodzą od wyładowań między chmurami lub od innych źródeł zakłóceń.

Detekcja wyładowań doziemnych opiera się przede wszystkim na analizie promieniowania elektromagnetycznego w zakresie małych częstotliwości rzędu 30 – 300 kHz [3]. Stosowane są najczęściej anteny pętlowe do pomiaru impulsów pola magnetycznego oraz anteny prętowe dla pola elektrycznego. Rozbudowane sieci detekcji i lokalizacji wyładowań atmosferycznych, złożone z wielu czujników, obejmują swoim zasięgiem całe kraje a nawet kontynenty. Z wykorzystaniem metod lokalizacji takich jak TOA (*ang. Time Of Arrival*) czy DF (*ang. Direction Finding*) dokładność określenia współrzędnych punktu wyładowania dla takich sieci wynosi zazwyczaj od kilkuset metrów do jednego kilometra [4]. W przypadku lokalnych LDS, opartych na pracy pojedynczego czujnika, podawany przez producentów zasięg osiąga najczęściej do kilkudziesięciu kilometrów. Odległość wyładowania określana jest na podstawie porównania zmierzonych impulsów pola elektromagnetycznego ze znormalizowanymi danymi statystycznymi, uwzględniającymi typowe wartości prądów pioruna oraz kształty impulsów pól elektrycznych i magnetycznych. Dostępne rozwiązania umożliwiają jedynie oszacowanie odległości wyładowania dla określonych zakresów, np.: 0 – 8 km, 8 – 16 km lub 16 – 32 km. Tak mała precyzja związana jest ze zmienną naturą wyładowań atmosferycznych i ograniczeniami wynikającymi z zastosowania pojedynczego czujnika. Systemy lokalne nie są w stanie odróżnić pobliskiego wyładowania charakteryzującego się małym prądem pioruna od silnego wyładowania występującego w większej odległości. Dzięki zastosowaniu czujników wykonanych w postaci dwóch anten pętlowych ułożonych prostopadle względem siebie możliwe jest także określenie azymutu wyładowania. Wymagany jest do tego celu jednoczesny pomiar pola elektrycznego dla określenia polaryzacji wyładowania. Choć wykorzystanie anten kierunkowych zapewnia stosunkowo dobrą dokładność [6], to dostępne systemy umożliwiają określenie azymutu z rozdzielczością jedynie rzędu 45 stopni. W celu zwiększenia dokładności i rzetelności wskazań istniejące systemy ostrzegawcze wspomagają detekcję elektromagnetyczną wykorzystując także informacje niesione przez inne sygnały towarzyszące wyładowaniom atmosferycznym, takie jak: promieniowanie optyczne lub tzw. radiotrzaski (zakłócenia odbioru radiowego).

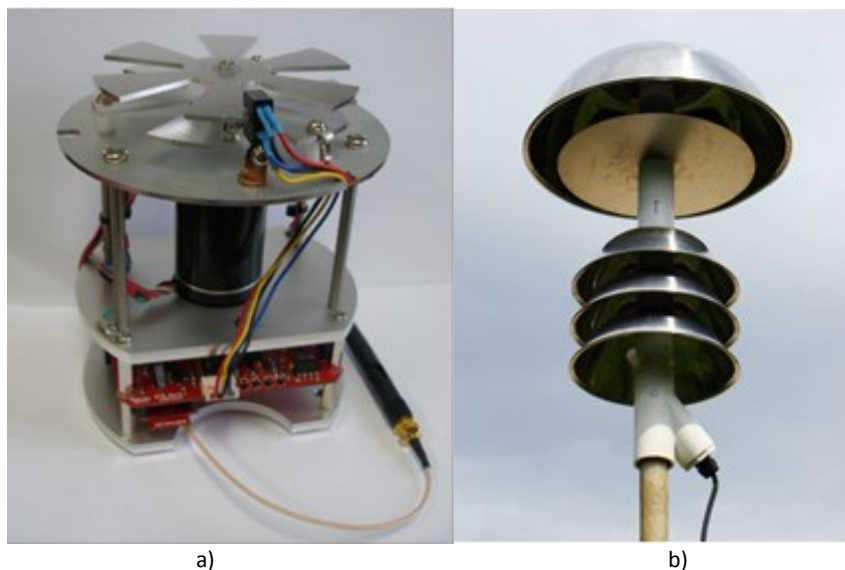


Rys. 2. Idea działania systemów predykcyjnych:
 a) zbliżanie się frontu burzowego;
 b) front burzowy bezpośrednio nad czujnikiem

Zasada działania drugiej grupy lokalnych systemów wczesnego ostrzegania - systemów predykcyjnych (LPS) opiera się na analizie lokalnego natężenia pola elektrycznego atmosfery. W warunkach tzw. „ładnej pogody” przy powierzchni ziemi występuje stałe pole elektryczne o średniej wartości około 100 V/m – wektor pola E zwrócony jest w kierunku ujemnie naładowanej ziemi. Formowaniu się frontów burzowych w otoczeniu analizowanego terytorium towarzyszy lokalny wzrost natężenia pola (Rys. 2a) na skutek gromadzenia się ładunków elektrycznych w chmurach burzowych (dodatnich w górnych partiach chmury i ujemnych u jej podstawy) [5]. Dodatkowo, poniżej podstawy chmury następuje zmiana kierunku wektora E na skutek indukowania się ładunków dodatnich przy powierzchni ziemi (Rys. 2b). Lokalne natężenie pola elektrycznego bezpośrednio przed wyładowaniem może osiągać wartości rzędu kilkunastu kV. Wzrost natężenia pola jest równoważny wzrostowi prawdopodobieństwa wystąpienia wyładowania doziemnego, a tym samym może być traktowany jako informacja o zwiększeniu zagrożenia. W przeciwieństwie do systemów detekcyjnych LDS systemy predykcyjne LPS umożliwiają przewidywanie wystąpienia pobliskich uderzeń pioruna. Przy ciągłej rejestracji wartości natężenia pola elektrycznego systemy LPS dają także informację o wystąpieniu takich wyładowań, na podstawie analizy nagłych zmian natężenia pola E . Nie jest jednak możliwe oszacowanie na tej podstawie odległości do wyładowania i jego azymutu.

Jako czujniki w LPS wykorzystywane są często tzw. młynki pola elektrycznego (EFM *ang. Electric Field Mill* [7]). Ich wadą jest zastosowanie ruchomych elementów mechanicznych (Rys. 3a), które mogą ulec uszkodzeniu. Dostępne są także systemy oparte na różnego rodzaju rozwiązaniach nie posiadających żadnych ruchomych części (Rys. 3b), dzięki czemu są one mniej podatne na awarie. Według informacji podawanych przez producentów systemy predykcyjne

są w stanie ostrzec przed wyładowaniem doziemnym zagrażającym obiektowi (bezpośrednim lub pobliskim) z wyprzedzeniem czasowym 8-20 minut.



Rys. 3. Czujniki pola elektrycznego:
a) EFM [6] b) czujnik bez elementów mechanicznych

3. Ocena zagrożenia

W większości systemów TWS stosuje się najczęściej trój- lub czterostopniową skalę oceny zagrożenia piorunowego poprzez zdefiniowanie określonych stanów ostrzegawczych oznaczanych przykładowo jako: *Brak zagrożenia*, *Uwaga*, *Ostrzeżenie*, *Alarm*. W systemach detekcyjnych poszczególne stany ostrzegawcze ustawiane są w zależności od odległości rejestrowanych wyładowań doziemnych. Dla systemów predykcyjnych główne kryterium stanowi wartość natężenia lokalnego pola elektrycznego. Przykładowe kryteria doboru stanów ostrzegawczych przedstawiono w tablicy 1.

Tablica 1. Przykładowe kryteria doboru stanów ostrzegawczych systemów TWS

Stan ostrzegawczy	System detekcyjny	System predykcyjny
	Odległość wyładowania	Natężenie pola elektrycznego
<i>Brak zagrożenia</i>	brak wyładowań	$E \leq 3 \text{ kV/m}$
<i>Uwaga</i>	16 – 32 km	$3 \text{ kV/m} < E \leq 4 \text{ kV/m}$
<i>Ostrzeżenie</i>	8 – 16 km	$4 \text{ kV/m} < E \leq 7 \text{ kV/m}$
<i>Alarm</i>	0 – 8 km	$7 \text{ kV/m} < E$

Urządzenia detekcyjne jako systemy ostrzegawcze sprawdzają się jedynie w sytuacji, gdy front burzowy zbliża się w kierunku obszaru poddawanego ochronie. Wyzwalane są wtedy kolejne stany ostrzegawcze wraz ze zmniejszaniem się odległości rejestrowanych wyładowań. Główną wadą systemu LDS jest brak możliwości wczesnego ostrzeżenia w przypadku, gdy chmura burzowa zaczyna formować się w rejonie położenia czujnika. W takim przypadku możliwa jest sytuacja, gdy najwyższy stan ostrzegawczy wyzwolony zostanie zbyt późno – w

chwili, kiedy pierwsze wyładowanie burzowe uderzy bezpośrednio w chroniony obiekt. W związku z tym wątpliwości może budzić nazywanie przez producentów takich urządzeń systemami ostrzegawczymi. Systemy predykcyjne są pozbawione tej wady, ponieważ na podstawie bieżącej analizy odnotowują wzrost natężenia pola elektrycznego już przed pierwszym wyładowaniem burzowym.

Niektóre systemy TWS łączą w sobie właściwości detekcji i predykcji poprzez jednoczesny pomiar impulsów pola elektrycznego lub magnetycznego oraz monitorowanie natężenia lokalnego pola elektrycznego. Stany ostrzegawcze mogą być w takim przypadku ustalane na podstawie kombinacji różnych wielkości mierzonych.

Nie istnieją obecnie żadne regulacje określające, przy jakich warunkach powinien być wyzwalany stan alarmowy. Opracowane ostatnio zalecenia normatywne CENELEC [3] również nie precyzują tej kwestii. Pomimo to można jednak doszukać się pewnych podobieństw pomiędzy różnymi systemami: zakres odległości detekcji wyładowań odpowiadający najwyższemu stanowi alarmowemu wynosi najczęściej około 8-10 km, a przyjmowane progi natężenia pola elektrycznego dla stanów ostrzegawczych w systemach predykcyjnych wynoszą zazwyczaj 3 kV/m i 7 kV/m. Niektóre systemy umożliwiają dostosowanie kryteriów dla wyzwalania poszczególnych stanów ostrzegawczych lub regulację czułości. W takich przypadkach powinno zalecać się wstępny okres obserwacji w celu dostosowania ustawień systemu, ponieważ wskazania mogą różnić się w zależności od położenia geograficznego i otaczającego środowiska.

4. Możliwości systemów

Systemy ostrzegawcze oferują różne opcje ułatwiające użytkownikowi zastosowanie środków prewencyjnych na czas zwiększonego zagrożenia piorunowego.

W skład podzespołów wielu systemów wchodzi stacje optycznej (lampy stroboskopowe) oraz akustycznej (syreny dźwiękowe) sygnalizacji alarmowej. Dzięki sterowaniu bezprzewodowemu i możliwości zasilania takich stacji za pomocą paneli solarnych (Rys. 4) mogą być one łatwo rozmieszczone nawet na rozległych obszarach. Przykładowe rozwiązanie zawiera zestaw lamp stroboskopowych włączanych w czasie trwania stanu *Ostrzeżenie* oraz syreny rozgłaszające zróżnicowane sygnały dźwiękowe przy wyzwoleniu stanu *Alarm* i po jego ustąpieniu (*Brak zagrożenia*).

Dodatkowo możliwe jest informowanie o zagrożeniu poprzez wysyłanie komunikatów za pośrednictwem internetu (email) lub telefonii komórkowej (sms).

Większość systemów posiada wyjścia przekaźnikowe umożliwiające sterowanie układami zewnętrznymi. Możliwe jest dzięki temu wykonanie określonych operacji w sposób automatyczny bez ingerencji człowieka.



Rys. 4. Zdalna stacja syren

Istotną opcją, jaką powinien posiadać każdy TWS jest diagnostyka pracy systemu. Możliwość przeprowadzenia testów poprawności wskazań i komunikacji pomiędzy poszczególnymi podzespołami zwiększa niezawodność i wiarygodność urządzenia.

Niemal wszystkie dostępne na rynku systemy ostrzegawcze mają możliwość sterowania i obserwacji wskazań za pomocą komputera, a także umożliwiają dostęp do systemu z poziomu sieci. Oprogramowanie umożliwia graficzną prezentację wskazań i archiwizację danych pomiarowych.



Rys. 5. Okno oprogramowania systemu detekcyjnego z wizualizacją odległości i kierunku wyładowań

5. Przykłady zastosowań systemów ostrzegawczych TWS

Jednym z głównych zadań jakie spełniają systemy wczesnego ostrzegania jest zapewnienie bezpieczeństwa ludzi w miejscach narażonych na wyładowania atmosferyczne. Systemy TWS umożliwiają ostrzeżenie ludzi o zwiększonym zagrożeniu piorunowym oraz pomagają w podjęciu decyzji o tymczasowym przerwaniu wykonywanych prac lub ewentualnej ewakuacji. Zastosowanie mogą mieć w obiektach przemysłowych, w których pracownicy znajdują się w miejscach szczególnie wyeksponowanych na oddziaływanie wyładowań atmosferycznych (np. prace na wysokościach, wieże wiertnicze) lub tam, gdzie skutki bezpośredniego wyładowania atmosferycznego mogą powodować szczególne zagrożenie (obiekty zagrożone wybuchem lub skażeniem, np. rafinerie, składy materiałów wybuchowych). Zastosowanie znajdują także na rozległych terenach i obiektach rekreacyjnych (np. tarasy widokowe, parki, pola golfowe, szlaki górskie, zbiorniki wodne). Dobrym przykładem, gdzie zasadne jest zastosowanie predykcyjnego systemu ostrzegania LPS, mogą być szlaki turystyczne w okolicach szczytu górskiego Giewont, gdzie niemal każdego roku odnotowywane są przypadki porażenia turystów. W systemy TWS wyposażone mogą być również obiekty imprez masowych, gdzie na niewielkim obszarze zgromadzona jest

znacząca liczba ludzi (np. koncerty, obiekty sportowe, festyny, zgromadzenia publiczne). Z oczywistych względów najskuteczniejszą ochroną przed porażeniem istot żywych jest ograniczenie dostępu ludzi do zagrożonego obszaru, jednak podjęcie decyzji o ewakuacji obiektu lub przerwaniu wykonywanych prac jest zadaniem trudnym, zwłaszcza, że może to się wiązać z dużymi stratami finansowymi. Należy przy tym pamiętać, że systemy TWS informują wyłącznie o zwiększeniu zagrożenia piorunowego i żaden z nich nie daje stuprocentowej informacji o tym, czy nastąpi bezpośrednie wyładowanie w obiekt poddawany ochronie.

Kolejnym zadaniem jakie spełniają systemy wczesnego ostrzegania jest ochrona układów elektrycznych lub elektronicznych. Skuteczną ochronę może zapewnić odizolowanie wrażliwej aparatury od głównych źródeł zakłóceń przewodzonych drogą galwaniczną, do których zaliczyć należy w szczególności linie energetyczne i telekomunikacyjne. Za pomocą wyjść przekaźnikowych będących na wyposażeniu systemów TWS możliwe jest przełączenie zasilania elektroenergetycznego chronionego obiektu w tryb awaryjny (np. z generatora prądotwórczego) lub całkowite odłączenie urządzeń od zewnętrznych linii doprowadzanych do obiektu na czas trwania stanu zagrożenia. Systemy TWS umożliwiają automatyczne sterowanie bez ingerencji człowieka, co jest istotne w przypadku obiektów bezobsługowych lub gdy działania muszą być podejmowane po godzinach pracy. Klasycznym przykładem zastosowań TWS jest ochrona układów automatyki systemów irygacyjnych pól golfowych, które są szczególnie narażone na uszkodzenie w skutek bezpośrednich lub pobliskich wyładowań atmosferycznych i są wyłączane na czas wystąpienia zagrożenia. Inny praktyczny przykład zastosowania odnosi się do ochrony turbin wiatrowych, których śmigła na mogą być celowo wyhamowywane lub całkowicie wyłączone i ustawione w bezpiecznym położeniu czas zagrożenia. Tymczasowe wyłączenia można zastosować także w przypadku wszelkiej aparatury podatnej na piorunowe zakłócenia elektromagnetyczne (np. radioteleskopy).

Istotną grupę zastosowań systemów TWS stanowi także zabezpieczenie infrastruktury. Stosowane są przykładowo na lotniskach jako źródło dodatkowych krytycznych informacji meteorologicznych przy podejmowaniu decyzji o ewentualnym wstrzymaniu ruchu powietrznego w związku ze złymi warunkami atmosferycznymi. Podobne zastosowanie systemy TWS mogą znaleźć do prewencyjnej ochrony kolei linowych, gdzie znane są przypadki uwięzienia turystów w kolejkach górskich na skutek awarii układów sterowania spowodowanych uderzeniem pioruna.

Powyżej wymieniono jedynie podstawowe zastosowania. Systemy TWS mogą być jednak wykorzystywane wszędzie tam, gdzie burze stwarzają zagrożenie dla istot żywych lub są przyczyną znaczących problemów technicznych. Taki przykład mogą stanowić naziemne nadawcze stacje satelitarne, w których informacja o zbliżającym się froncie burzowym może być wykorzystana do zwiększenia mocy nadawczej anten w celu zapewnienia ciągłości transmisji zakłócanej podczas silnych opadów deszczu towarzyszących burzom.

6. Podsumowanie

Systemy wczesnego ostrzegania przed wyładowaniami atmosferycznymi stanowią doskonale uzupełnienie tradycyjnych środków ochrony odgromowej i przed przepięciami. Umożliwiają bieżące monitorowanie stanu zagrożenia i podjęcie środków zapobiegawczych mających na celu zwiększenie bezpieczeństwa ludzi, dóbr materialnych oraz świadczenia usług publicznych. Zróżnicowanie dostępnych na rynku systemów oraz ich funkcjonalności umożliwia dobór systemu w zależności od potrzeb i oczekiwań użytkownika. Lokalne systemy detekcyjne, podobnie jak informacje z komercyjnych sieci detekcji i lokalizacji wyładowań atmosferycznych, alarmują jedynie o zbliżających się frontach burzowych, ale nie ostrzegają przed pierwszym wyładowaniem burzowym. Najlepsze rozwiązanie stanowią systemy łączące właściwości detekcji i predykcji. Będące w powszechnym użytku w Stanach Zjednoczonych Ameryki, systemy wczesnego ostrzegania przed zagrożeniem piorunowym znajdują coraz szersze zastosowanie także w Europie.

Literatura

- [1] M. Łoboda, „Porażenia piorunem ludzi w Polsce w latach 2001-2006”, *elektro.info* 5/2009.
- [2] K. L. Chrzan, „Systemy rejestracji i lokalizacji wyładowań piorunowych”, *elektro.info* 7-8/2006
- [3] EN 50536:2011 Protection against lightning – Thunderstorm warning systems
- [4] P. Bodzak, „Detekcja i lokalizacja wyładowań atmosferycznych”, *IMGW*, Warszawa, 2006.
- [5] V. A. Rakov, M. A. Uman, *Lightning: Physics and Effects*, Cambridge University Press, 2003.
- [6] G. S. Kil, S. Y. Choi, C. Y. Park, Y. K. Lee, C. H. Ahn, “Design and Fabrication of a Lightning Warning System”, *Int. Conf. on Electrical Eng. ICEE'2009*, Hong Kong, 18-20 March, 2009.
- [7] J. Hui, Z. Bihua, L. Yanxin, “The Latest Design and Development of the Field Mill Used as Atmospheric Electric Field Sensor”, *The 5th Asia-Pacific Conf. on Environmental Electromagnetics CEEM'2009*, Xi'an, China, 16-20 Sept., 2009.