

РОЗДІЛ 7. ТЕХНІКА І ЕЛЕКТРОФІЗИКА ВИСОКИХ НАПРУГ

АНАЛІЗ СИСТЕМ ГРОЗОПЕЛЕНГАЦІЇ ТА ПОПЕРЕДЖЕННЯ ПРО ГРОЗОВУ АКТИВНІСТЬ

Прилепа Р.Ф., магістрант, Шостак В.О., к.т.н., доц.

КПІ ім. Ігоря Сікорського, кафедра техніки і електрофізики високих напруг

Вступ. В ряді країн запроваджено і постійно розвиваються автоматизовані системи детектування блискавок LDS (Lightning Detection System). Серед них розрізняють системи локації (LLS – Lightning Location System), які також інколи називають мережі детектування блискавок (LDN – Lightning Detection Network) або пеленгації, а також попереджувальні системи TWS (Thunderstorm Warning System), які також можуть мати одиночні грозопеленгатори. До перших, відносяться, наприклад: NLDN/NALDN, SAFIR, BOLT [1-4], а до других – TLDS, THOR GUARD, LDS Boltek, ATSTORM, LPI LWS [5-9] та ін.

Застосування систем грозопеленгації та попередження дозволяє своєчасно вжити необхідних заходів під час наближення грозового фронту, збирати статистичні дані про грозову активність, аналізувати результати уражень блискавками об'єктів і планувати розробку більш захищеного обладнання і нормативних документів з блискавкозахисту. В залежності від типу об'єкту та необхідної інформації можна застосовувати різні системи грозопеленгації та попередження, тому для їх коректного вибору чи розробки необхідно орієнтуватися в їхніх характеристиках.

Мета роботи. Огляд існуючих в світі систем попередження про грозову активність і системи грозопеленгації (в Україні) та аналіз їхніх основних технічних рішень та характеристик.

Матеріали та результати досліджень. Системи типу LDS складаються із сукупності станцій на території країни/регіону, що реєструють електромагнітні поля від блискавок та передають дані на центральний сервер. Вони можуть надавати різноманітну детальну інформацію про розряди блискавок (час події, полярність, амплітуду струму, координати, кількість ударів у розряді та ін.), мають високу ефективність виявлення розрядів блискавок між хмарами та землею (близько 99% у кращих системах), похибка локації в них може складати 0.05-4 км [1-4]. Відповідно і вартість таким систем досить значна.

Для забезпечення інформації про грози лише в обмежених зонах (одиниці-десятки кілометрів) в світі також розробляються та запроваджуються локальні системи попередження про грозову активність (TWS). Зокрема, це важливо для особливо відповідальних об'єктів, де ураження блискавкою може спричинити серйозні пошкодження майна, екологічні катастрофи, завдати масові летальні наслідки. Згадані об'єкти, в першу чергу, є в електроенергетиці, авіаційній та космічній галузі, видобувній промисловості, хімічній галузі, спорті і т.д.

Системи попередження про грозову активність. Принцип роботи попереджувальних систем базується перш за все на аналізі змін електричного та магнітного полів. Під час наближення грозового фронту напруженість квазістатичного електричного поля зростає, що слугує сигналом для запуску TWS та первинних попереджень. При виявленні змін магнітного поля, що є характерним для розрядів блискавки, коли вектор переміщення розрядів направлений в сторону об'єкту, який захищається, система повідомляє про наближення грози. Для виявлення зміни магнітного поля, дані системи використовують власні грозодетектори або ж доповнюються чи використовують інформацію від систем LDN.

Розрізняють два основні види систем TWS, в залежності від типу датчиків напруженості квазістатичного електричного поля: з електромеханічними флюксометрами та з електронними системами. Продукція електромеханічних систем представлена компаніями Boltek Lightning Detection Systems [7] та VAISALA Thunderstorm and Lightning Detection Systems [8]. Системи TWS цих двох компаній, огляд яких наведено нижче, доповнюються грозодетекторами. Інколи в таких системах додано і оптичні датчики (VAISALA). Електронна ж система вимірювання напруженості електричного поля, наприклад, ATSTORM, використовується іспанською компанією Aplicaciones Tecnológicas [8].

Канадська корпорація Boltek займає лідируючі позиції серед виробників доступного обладнання та програмного забезпечення для отримання оперативної та аналітичної інформації про грозові явища. Системи спостереження за грозовими явищами ближнього і дальнього радіусу дії цього виробника складаються із флюксометра EFM-100 для моніторингу електричного поля атмосфери та детекторів блискавок LD-250, LD-350 і StormTracker [7]. Окрім цього доступний широкий спектр допоміжних модулів індикації інформації, звукових та світлових модулів попередження, перетворення та передачі даних.

Система ближнього радіусу дії складається із електростатичного флюксометра EFM-100 (або модернізованої версії EFM-100M) [7], який дозволяє не тільки оцінювати стан напруженості електричного поля атмосфери, що передує блискавці, але й детектувати грозові розряди.

Електростатичний флюксометр EFM-100 складається із вимірювального нерухомого електроду та екрануючої пластини, що обертається, яка має шість однакових лопатей прикріплених перпендикулярно до осі двигуна, частота обертання якого контролюється блоком стабілізації (рис. 1). Тут використовується безколекторний двигун, для мінімізації внесення завад у вимірювальний сигнал. Обертаючись, екрануюча пластина періодично перекриває чутливий вимірювальний електрод, внаслідок чого в ланцюзі між землею та вимірювальною пластинною виникає змінний струм, який опрацьовується схемою приладу.

Частота сигналу, який попередньо пройшов підсилення, визначається швидкістю обертання екрануючої пластини і кількістю лопатей. Амплітуда та форма напруги на виході підсилювача визначається його вхідним опором і близька

до синусоїдальної. Далі через синхронний випрямляч отриманий сигнал надходить на фільтр низьких частот, після чого аналоговий сигнал, за допомогою швидкодіючого АЦП з роздільною здатністю 12 біт, перетворюється в цифровий. Інформація може передаватися через волоконно-оптичні лінії зв'язку (ВОЛЗ) або через інтерфейси USB і RS-232. За допомогою стільникового GSM/GPRS модему організується передача сигналу тривоги на стільниковий телефон або електронну пошту. Також результат може бути доступним в аналоговій формі в діапазоні від -20 до +20 В. Напряга на аналоговому виході прямопропорційна напруженості електричного поля (наприклад, максимальній напруженості 20 кВ/м відповідає сигнал з амплітудою 20 В, а 10 кВ/м - 10 В і т.д.).

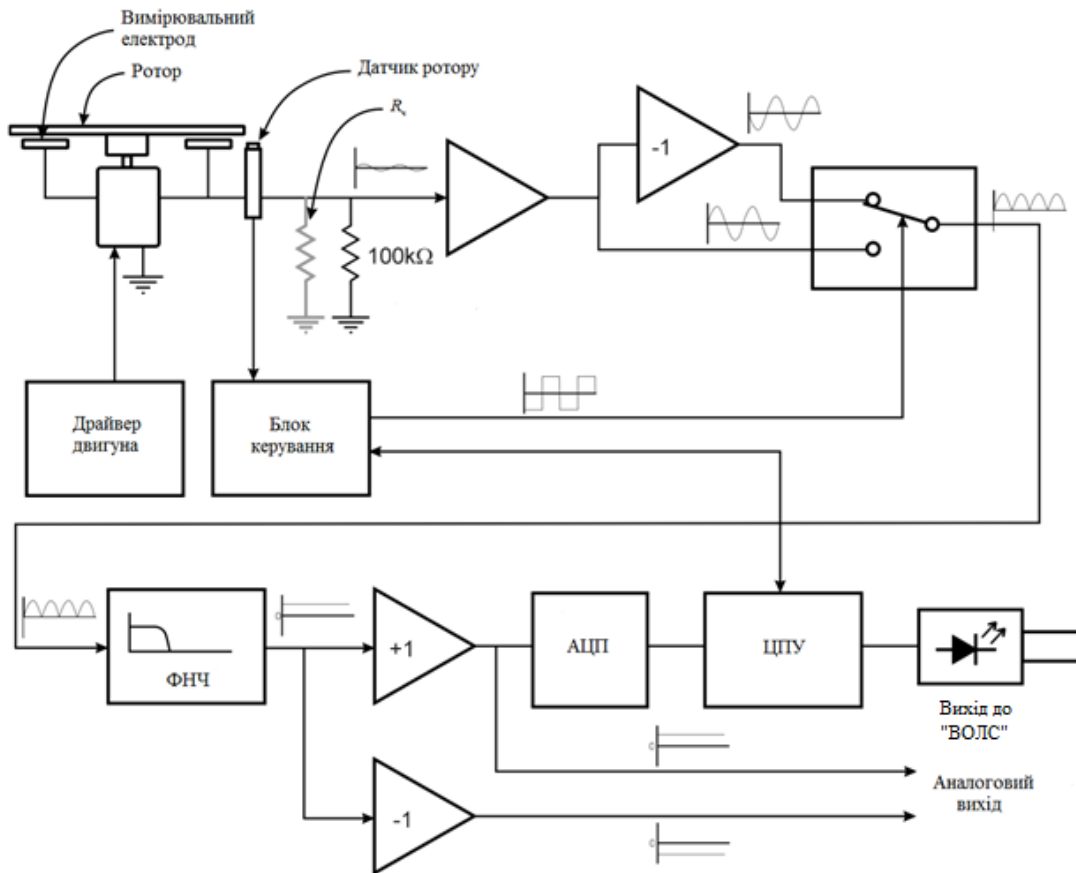


Рисунок 1 – Функціональна схема флюксометра EFM-100 [7]

Для зменшення хибних спрацювань системи, що можуть бути викликані сильними опадами, датчик розташовують перевернутим на 180° щодо горизонталі.

Необхідно враховувати загальні рекомендації щодо монтажу пристрою для забезпечення стабільного функціонування системи [7]. Датчик не можна монтувати поблизу великих споруд, оскільки їх значні габарити будуть екранувати датчик і, як наслідок, вносити похибку у вимірювання. Теоретично для точних вимірювань найкраще розташування датчику – на рівні землі, але на практиці таке інколи є неможливим через високу густину забудови, а також у цьому випадку

датчик може швидше забруднюватись. Тому найчастіше таку систему встановлюють на дахах будівель. Тоді потрібно провести калібрування датчику, ввівши в схему додатковий опір R_c для компенсації підвищеної напруженості електричного поля пов'язаної із збільшенням висоти і впливом споруди.

Для аналізу отриманих даних використовується програмне забезпечення (ПЗ) Voltek Electric Field Monitor [7], що дозволяє в режимі реального часу спостерігати зміни напруженості E -поля у вигляді графіків.

Основні параметри щодо реєстрації електричного поля флюксометра EFM-100, відповідно до [7], наведено в табл. 1.

Таблиця 1 – Технічні параметри флюксометрів

| Параметр | Радіус виявлення, км | Межі вимірювання напруженості E -поля, кВ/м | Похибка виміру напруженості E -поля, % | Час реакції, с |
|---------------------------------------|----------------------|---|--|----------------|
| BOLTEK EFM-100 [7] | 0 – 38 | ± 20 | 5 | 0.1 |
| VAISALA EFM550 [5] | - | ± 10 | 5 | 1 |
| Aplicaciones Tecnologicas ATSTORM [8] | 0-20 | ± 32 | - | 1 |

Системами дальнього радіусу дії (максимальна відстань виявлення до 1200 км), наприклад, є грозопеленгатори LD-250 (LD-250M), LD-350 або StormTracker. Одиничний грозопеленгатор може бути застосований самостійно або як доповнення до систем ближнього радіусу дії, що дозволяє визначити не тільки азимут, але і дальність до грози. Пристрої серії LD розрізняються дальністю виявлення розрядів блискавки: 480 км у LD-250 і 1200 км у LD-350 [6]. З інших цікавих особливостей можна відзначити можливість використання детектора LD-250 в мобільних рішеннях, а LD-350 для організації мережі детекторів блискавок [7]. Крім того, пеленгатор LD-350, здатен диференціювати різні види блискавок, класифікуючи за типом: IC (Intra-Cloud – всередині хмар), CG (Cloud to Ground – хмара-земля).

Реєстрування радіосигналу від блискавки відбувається за допомогою пеленгаційної антени. Далі ПЗ на ПК визначає тип розряду та відстань до нього. Для зв'язку з ПК служать послідовні інтерфейси RS-232 або USB.

Пеленгатор Stormtracker за основними параметрами є ідентичним до LD-250, але не є автономним пристроєм [7]. Він являє собою PCI-карту, що вставляється в

PCI-роз'єм ПК і для початку роботи вимагає тільки підключення зовнішньої антени і установок відповідного програмного забезпечення.

Отже, можна підсумувати, що компанія BOLTEK надає широку номенклатуру різних детекторів та грозопеленгаторів грозової активності.

VAISALA – фінська компанія, яка розробляє та виготовляє обладнання для промислових вимірювань; продукцію її представлено більш ніж в 140 країнах світу [5]. Система попередження про грозову небезпеку цієї компанії складається із наступних компонентів:

- вимірювач електричного поля гроз Vaisala EFM550;
- датчик грозових розрядів Vaisala TSS928 з системою автоматичного оповіщення про грозу Vaisala ALARM;
- система грозового оповіщення Vaisala TWX300.

Флюксометр EFM550 (див. параметри в табл. 1) дозволяє вимірювати локальну напруженість електричного поля в атмосфері [5]. Принцип роботи його та конструкція аналогічні до таких у флюксометра компанії BOLTEC EFM-100.

Датчик грозових розрядів Vaisala TSS928 [5] є комплексним приладом для спостереження за грозовими явищами. Він реєструє як електромагнітні параметри блискавки (напруженість електричного та магнітного поля), так і оптичне випромінювання від блискавки на близьких відстанях. Виробник не надає детальних технічних характеристик даного приладу. Радіус виявлення грозової активності складає від 0 до 56 км, точність виявлення розрядів блискавки на 19 км при одному розряді – 90%, при двох – 99%, при трьох – 99.9% [5].

Система попередження про блискавки Vaisala TWX300 [5] дозволяє використовувати інформацію від систем LDN (наприклад, NALDN), де за допомогою запатентованого алгоритму прогнозування розвитку грозового шторму вона може попереджувати про наближення грози, а також аналізувати інформацію від датчиків електричного поля для моніторингу гроз, які наближаються, і тих гроз, які можуть утворитися на місці.

Розглянуті вище системи базуються на вимірюваннях напруженості електричного поля за допомогою електромеханічних «польових млинів», які себе добре зарекомендували в системах попередження. Однак в їх конструкції є один суттєвий недолік, що пов'язаний із наявністю рухомих частин. Тому, наприклад, компанія Aplicaciones Tecnologicas розробила та запатентувала чисто електронний пристрій вимірювання напруженості E -поля, який отримав назву ATSTORM. Параметри пристрою наведено в табл. 1, згідно [8].

Розглянемо принцип роботи системи ATSTORM на основі аналізу патенту [10]. Дві пари електродів 1 та 4 (рис. 2) знаходяться на різній висоті (d), що дозволяє отримувати диференціювання вимірювальної величини (V_s). Таким чином, немає необхідності проводити калібрування системи на об'єкті у зв'язку із зміною висоти встановлення приладу.

Схема працює наступним чином: на вимірювальних пластинах 1 наводяться потенціали від напруженості постійного електричного поля, обумовленої перерозподілом зарядів у атмосфері при наближенні грозового фронту. Ці потенціали надходять до операційних підсилювачів (ОП) 2, в яких відбувається підсилення сигналів у зручну форму для вимірювання (V_s). Зворотній від'ємний зв'язок (ЗВВ) ОП виконано за допомогою конденсатора (не показано). Застосування конденсатора дозволяє зменшити втрати, а відповідно і похибку вимірювальної величини, порівняно з випадком застосування резистора. Така схема підсилення вхідного сигналу працює в режимі інтегрування вхідної величини. Для уникнення спотворення результату виміру в ході інтегрування вхідного сигналу, на електрод 4 (див. рис. 2) подається інвертований вхідний сигнал V_c із певною затримкою. Таке рішення дозволяє зняти потенціал із пластини 1 (по аналогії із періодичним екрануванням рухомим електродом вимірювального електроду в «польовому млині»), після чого, через певний проміжок часу, процес вимірювання повторюється.

В компоненті 3 виконується відразу декілька перетворень. Підсилений сигнал V_s , перетворюється в цифровий за допомогою АЦП, далі цей сигнал надсилається для аналізу до комп'ютерної системи 10, де інтерпретується в напруженість електричного поля. Одночасно V_s інвертується та із певною затримкою надсилається в ЦАП, вихідний сигнал із якого V_c вже надсилається на електрод 4.

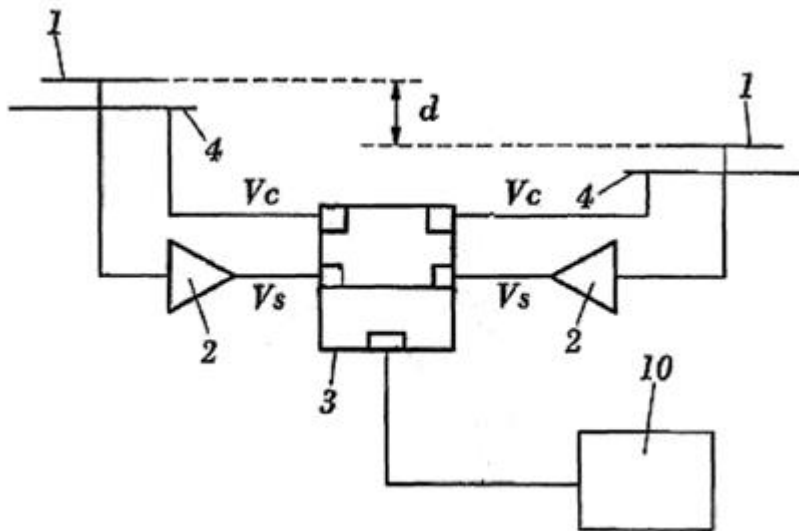


Рисунок 2 – Диференційна схема вимірювання напруженості електричного поля без використання обертових частин [10]

Застосування саме електронної системи реєстрування напруженості електричного поля дозволяє збільшити надійність системи, зменшити енергоспоживання та електронні завади, обумовлені двигуном.

В останні роки розвиваються локальні системи моніторингу блискавок для об'єктів великих розмірів, які включають відеокамери (швидкісні і звичайні) та комбінацію різних датчиків (електричного та магнітного поля, звуку і світіння від каналу розряду), зокрема для тригерування записів (аналіз їх – окремо в [11]).

Система грозопеленгації в Україні. В Україні із 2016 року діє сегмент системи глобальної грозопеленгації та попередження ENTLN (Earth Networks Total Lightning Network), яка включає 12 датчиків [4, 12]. Їх встановлено у Львові, Рахові, Сарнах, Новодністровську, Білій Церкві, Києві, Одесі, Глухові, Асканії-Новій, Полтаві, Гуляйполі, Куп'янську. Ця система базується на реєстрації вертикальної компоненти електричного поля з використанням технології визначення часу прибуття сигналу від імпульсу струму блискавки до різних станцій спостереження (ТОВА [1]).

Встановлені на території України датчики системи грозопеленгації дозволяють точно фіксувати розряди блискавок в середині хмар (IC) та ударів в землю (CG). Дані з них направляються на сервера ENTLN та через 10 секунд можуть бути доступні оператору. Можна отримувати дані по всій країні, для певного регіону і для відносно невеликих ділянок (близько 80 км²). Це надає змогу прогнозувати розвиток та напрямок переміщення грозових фронтів і завчасно попереджати про наближення грози. Також отримані дані дозволяють успішно прогнозувати виникнення та переміщення таких природних явищ, як сильні дощі, град і т.п. Причому попередження про небезпечні грози видаються раніше (десь на 50%), ніж із застосуванням звичайних метеорологічних радарів [12].

Перелік основних даних, що надаються у бінарному та ASCII форматах даною системою грозопеленгації [12]:

- універсальний координований час (UTC) за Гринвічем для імпульсу або спалаху (розряду);
- координати місця імпульсу (широта та довгота в десятинних градусах);
- IC/CG класифікація: за визначенням, імпульс класифікується як CG, коли він містить зворотний удар; будь-який імпульс, який не містить зворотного удару, класифікується як IC;
- пікове значення струму імпульсів у розрядах типу IC та CG, в амперах;
- полярність удару блискавки (позитивна або негативна);
- кратність: кількість імпульсів у спалаху блискавки;
- тривалість спалаху блискавки;
- висота: оцінка висоти блискавки IC в кілометрах; це значення може досягати 20 км і визначається точніше в зонах з більшою щільністю датчиків.

Окремі характеристики системи грозопеленгації в Україні [12]:

- для визначення місця удару блискавки використовуються дані, щонайменше із 5 датчиків (максимум – до 25);
- ефективність виявлення блискавок «хмара-земля» (CG) практично по всій території України становить 90...95 %;

- ефективність виявлення блискавок «у хмарах» (IC) в різних регіонах території України варіюється в межах 30... 60 % (кращі значення – в центральних частинах);

- просторова точність виявлення блискавок становить в межах 200 ... 500 м (в центральних частинах – 200... 300 м).

Висновок. Проведено аналіз можливостей і технічних характеристик систем грозопеленгації та попередження про грозову активність. В локальних системах з датчиками квазістатичного електричного поля радіус виявлення гроз складає до 20 ... 56 км, а з датчиками швидких змін електричного та магнітного поля – до 1200 км. В якості датчиків квазістаціонарного електричного поля можна рекомендувати використовувати і розвивати електронні системи без рухомих частин.

Перелік посилань

1. K. L. Cummins and M. J. Murphy, "An Overview of Lightning Locating Systems: History, Techniques, and Data Uses, With an In-Depth Look at the U.S. NLDN," in *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 51, no. 3, pp. 499-518, Aug. 2009. doi: 10.1109/TEMC.2009.2023450.

2. P. Richard, A. Soulage, F. Broutet, J. Y. Lojou and P. Bettencourt, "SAFIR: Operational System for Long Range Monitoring of thunderstorm Activity," *10th Annual International Symposium on Geoscience and Remote Sensing*, 1990, pp. 1889-1892. doi: 10.1109/IGARSS.1990.688892.

3. M. Stock *et al.*, "Improvements to the BOLT lightning location system," *2016 33rd International Conference on Lightning Protection (ICLP)*, Estoril, 2016, pp. 1-4. doi: 10.1109/ICLP.2016.7791365.

4. Офіційний сайт компанії Earth Networks [Електронний ресурс] – режим доступу до ресурсу: <https://www.earthnetworks.com/product/weather-sensors/lightning/>

5. Офіційний сайт компанії VAISALA [Електронний ресурс] – режим доступу до ресурсу: <http://www.vaisala.com/>

6. Офіційний сайт компанії THOR GUARD [Електронний ресурс] – режим доступу до ресурсу: <http://www.thorguard.com/>

7. Офіційний сайт компанії BOLTEC [Електронний ресурс] – режим доступу до ресурсу: <http://www.boltek.com/catalog/products>

8. Офіційний сайт компанії Aplicaciones Tecnológicas [Електронний ресурс] – режим доступу до ресурсу: <http://lightningprotection-at3w.com/>

9. Офіційний сайт компанії Lightning & Surge Technologies [Електронний ресурс] – режим доступу до ресурсу: <http://www.lightningman.com.au/>

10. US 7508187 B2 – Device and system for the measurement of an external electrostatic field, and system and method for the detection of storms.

11. Р. Прилепа, В. Шостак. Автоматизована система реєстрації блискавок, які уражують об'єкти великих розмірів // Міжн. н.-т. конф. молодих учених, аспірантів і студентів. "Сучасні проблеми електроенергетехніки та автоматики". – Київ: ФЕА НТУУ «КПІ», 2016.

12. Презентація системи грозопеленгації, яку встановлено в Україні у 2016 році [Електронний ресурс] – режим доступу до ресурсу: <http://uhmi.org.ua/conf/entln/>