

РОЗРОБКА КОНЦЕПЦІЇ СИСТЕМИ МОНІТОРИНГУ БЛИСКАВОК, ЯКІ УРАЖУЮТЬ СПОРУДИ

Шостак В. О., Прилепа Р. Ф., Козлов О. Ю., Бржезицький В. О.

1. Вступ

Дані щодо грозової активності є важливими для різних галузей і відповідних об'єктів. Зокрема, в них зацікавлені електроенергетика, авіаційна та ракетно-космічна галузь, промисловість, яка пов'язана із видобутком та переробкою паливних матеріалів та вибухових речовин, комплекси для обробки та передавання інформації, лісництво, тваринництво, страхові компанії та ін. Ці дані також використовуються для розробки нормативних документів з блискавкозахисту і для проектування різноманітного обладнання.

Вже кілька десятиріч збирання даних щодо характеристик гроз і їх розвиток у реальному часі, а також щодо параметрів блискавок здійснюється за допомогою автоматизованих дистанційних системи реєстрації і локації (LLS – Lightning Location System), як наземного, так супутникового базування [1–3]. Такі системи забезпечують інформацію щодо поточної грозової активності на значних територіях, а також дані для прогнозування та попередження. На даний час широкого розповсюдження набули системи детектування і пеленгації блискавок (LLS) в різних країнах і регіонах, а також дещо простіші системи попередження про грозову активність (TWS – Thunderstorm Warning System) в межах певної відстані від об'єктів. Як приклади наземних систем, можна навести LLS різних виробників – VAISALA (LDN, Lightning Detection Network – в Північній Америці, у Європі, ін.), SAFIR, BOLT [1, 2, 4, 5]. Попереджувальні системи TWS – TLDS, THOR GUARD, LDS Boltek, ATSTORM, LPI LWS [5–9].

Системи LLS мають загально високу ефективність виявлення розрядів блискавки (близько 99 %), а похибку локації можуть мати порядку 0.05–4 км. Системи TWS мають дещо нижчу ефективність (20–80 % [10]) та в більшості варіантів виконання за результатами вимірювання електричних і магнітних полів оцінюють лише орієнтовну відстань до блискавок (5...40 км) і надсилають відповідні сигнали попереджень різного рівня потенційної небезпеки до споживачів. Важливим є те, що ні LLS, ні звичайні TWS не дають реєстрації точного місця ураження блискавкою об'єктів.

В той же час, відповідно до чинних у світі і в Україні (ДСТУ Б В.2.5-38:2008, ДСТУ EN 62305:2012) нормативних документів з блискавкозахисту, необхідно проводити обстеження систем блискавкозахисту на об'єктах і самих об'єктів періодично (зокрема, на початку грозового сезону) та після кожного ураження. Проблема полягає в тому, що коли об'єкт має значні розміри, то виконання таких обстежень вимагає значних ресурсів. Крім того, при експлуатації багатьох об'єктів (наприклад, лінії електропередач (ЛЕП), вітрогенераторних установок) важливо отримувати не лише архівну, а також і оперативну інформацію про ураження бли-

скавками і можливі пошкодження, що допоможе ефективно планувати усунення аварійних ситуацій, спричинених грозовою активністю.

Тому тепер в окремих країнах активно розвивають варіанти TWS, які включають відеокамери для точної реєстрації місця ураження на об'єкті. Зокрема, в Китаї та Японії вже запровадили тестові системи моніторингу (СМ) блискавок на ЛЕП, які базуються на використанні відеокамер [11–14], що дозволяє оперативно оцінити можливі масштаби пошкоджень в режимі реального часу (передача даних по 3G-мережі). Ці системи є лише концептом, а не повноцінним комерційним продуктом, і потребують подальшого розвитку. В них реєструють світловий спалах в каналі розряду для вироблення тригеруючого сигналу на початок запису відео. Саме ці системи не комбінують в собі систему відеоспостереження за об'єктом та попередження про грозову активність (що мало би бути в повноцінній TWS) і не реєструють ЕМ-полів, пов'язаних з блискавками. Вони можуть інколи не реєструвати блискавки без тривалої компоненти струму або хибно спрацьовувати (злива, туман, невелика інтенсивність світіння каналу розряду блискавки вдень, інші оптичні явища, не пов'язані із блискавкою). Відсутність же реєстрації полів не дає можливості отримати відомості про такі збої.

Для дослідження блискавок в Китаї було створено високоточну систему (Китайську сітку мережі виявлення блискавок, CGLDN), в якій скомбіновано системи LLS та TWS і їх доповнено високошвидкісною камерою на основі CCD-матриці та іншими пристроями [15]. Система дозволяє у хорошому часовому розрізненні здійснювати реєстрацію короткотривалих складових блискавки і здійснювати надійне калібрування інших LLS та TWS. Але вартість сучасних високошвидкісних камер становить близько 12 000...100000 дол. США. Зрозуміло, що для систем моніторингу блискавок (СМ) на окремих об'єктах треба планувати більш економічні технічні рішення. Інколи дослідницьку калібрацію локаційної точності LLS проводять і з використанням звичайних відеокамер, наприклад, в Японії [11].

Отже, дана робота направлена на розробку пропозицій щодо концепції СМ блискавок на об'єктах, яка б мала прийнятні характеристики і властивості TWS, включала датчики ЕМ-поля і орієнтувалася на звичайні IP відеокамери.

2. Об'єкт дослідження та його технологічний аудит

Об'єктом дослідження в даній роботі є система моніторингу блискавок, які уражують конкретні споруди або відбуваються поблизу них. В ході цього дослідження планується на основі аналізу характеристик блискавок і доступних технічних засобів зробити пропозиції щодо системи моніторингу. Така СМ має дозволяти вчасно детектувати наближення грози (за 20–40 км) та розвиток гроzoneбезпечної ситуації на місці (за 0.3–1 годину до першого розряду). Також – своєчасно приводити в готовність компоненти СМ та забезпечувати фіксацію місця ураження на об'єкті чи поблизу нього та передавання і збереження відповідних даних. Приклад структури існуючої СМ з відеореєстрацією [13] наведено на рис. 1.

СМ може включати різноманітні датчики (оптичного сигналу, електричного та магнітного поля, звуку), пристрої (відеокамери, засоби зв'язку, синхронізації записів по часу – приймач GPS), комп'ютерні і програмні засоби, які ма-

ють забезпечити надійний моніторинг різних видів блискавок і явищ, що їх супроводжують. Система повинна реєструвати блискавки в тому числі із мінімальними параметрами (по інтенсивності і тривалості струму, ЕМ-поля, світінню, грому). По струму необхідно реєструвати блискавки з тривалими (долі-одиниці секунд) та імпульсними (десятки-сотні мікросекунд) компонентами струму, коли вони присутні в розряді разом або ж окремо.

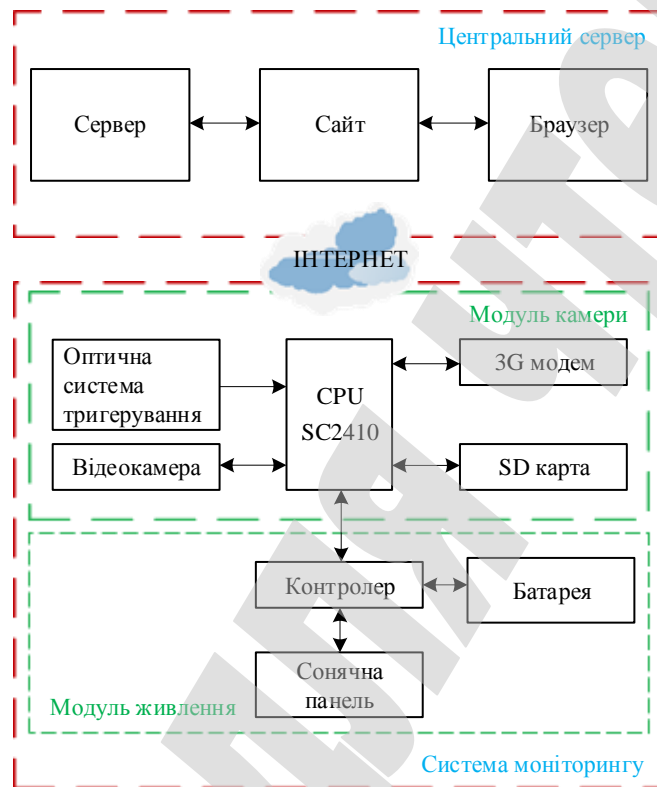


Рис. 1. Блок-схема системи моніторингу з відеореєстрацією блискавок [13]

Повинні фіксуватися розряди як з хмари до землі, так і в зворотному напрямку. Відеозаписи мусять мати якість достатню для розрізнення каналу блискавки і місця ураження як вдень, так і вночі, в т. ч. за поганих погодних умов. Система має працювати цілодобово протягом усього року. Якщо система працює в режимі чергування («сну»), то запуск її у режим готовності до збереження записів має відбуватися за різними критеріями, що характерні для появи грозової обстановки. У випадку планування порівняння і сумісного аналізу записів СМ із записами дистанційних систем реєстрації блискавок або поглибленого аналізу записів всіх датчиків це потребує застосування точних GPS-приймачів для міток часу і прив'язки по координатах. Відеореєстрація розряду і запис різних характеристик для такого короткочасного явища як блискавка потребують спеціальних рішень.

Якщо споруда представляє собою об'єкт з відносно невеликими розмірами (десятки чи сотні метрів в плані), то різне обладнання СМ може бути пов'язано між собою і з сервером за допомогою кабелів, оптоволоконної мережі та радіозв'язку (наприклад, Wi-Fi). Якщо ж об'єкт простягається на великі відстані чи площі (як ЛЕП, парки вітрогенераторних установок, трубопроводи), то тут зв'язок окремих станцій

реєстрації з центральною станцією забезпечують саме через радіоканали. Такі віддалені станції реєстрації типово мають автономні системи живлення.

Щодо недоліків можна зазначити, що в існуючих окремих СМ з відеофіксацією місця ураження [13] є обмеженими можливості камер. Зокрема, при звичайній типовій частоті кадрів (25...50 к/с) і автоматичних режимах по світлочувливості вони здатні відносно надійно реєструвати лише розряди, в яких присутня тривала компонента струму. Також тригерування для початку запису відеофрагменту з блискавкою в пам'ять і передавання на сервер забезпечується звичайно лише оптодатчиком (рис. 1). Інші датчики застосовують рідко або недостатньо обґрунтовують їхні характеристики. Вибір характеристик оптодатчика потребує додаткового аналізу і перевірки. У відносно простих СМ синхронізація записів по часу типово ведеться через комп'ютерні мережі і досить обмежена в точності (секунди). Такі системи зазвичай працюють безперервно весь час в очікуванні грозових розрядів в зоні об'єкту і в постійній готовності до запису.

3. Мета та задачі дослідження

Метою даної роботи є розробка концепції системи моніторингу блискавок, що уражують споруди і відбуваються поблизу них. Її досягнення дозволить закласти базу для обґрунтованого вибору структури СМ, режимів і алгоритмів роботи, характеристик її компонентів.

Для досягнення поставленої мети ставляться такі задачі:

1. Проаналізувати існуючі системи грозового попередження та системи моніторингу із визначенням основних їх технічних рішень та недоліків і на цій основі запропонувати концепцію розвинутої системи моніторингу блискавок, що вражають великі споруди і відбуваються поблизу них.

2. Визначити структуру запропонованої СМ, основні режими її роботи, параметри грозових явищ і блискавок, які мають детектуватися для тригерування СМ та реєструватися.

3. Запропонувати датчики для такої системи і оцінити необхідні характеристики окремих компонентів СМ.

4. Провести первинну перевірку працездатності оптодатчика щодо можливості реєстрації короткотривалого світлового випромінювання із каналу імпульсного розряду зі струмом, характерним для типової блискавки.

4. Дослідження існуючих рішень проблеми

Принцип роботи звичайних попереджувальних систем базується перш за все на аналізі змін електричного та магнітного полів. Підчас наближення грозового фронту напруженість квазістатичного електричного поля зростає, що слугує сигналом для запуску TWS та розсилання первинних попереджень. При виявленні змін магнітного поля, що є характерним для розрядів блискавки, коли вектор переміщення розрядів є направлений в сторону об'єкту, який захищається, система повідомляє про наближення грози. Для виявлення зміни магнітного поля, такі системи використовують власні грозодетектори або ж додатково використовують інформацію від систем LDN [3, 5–9].

Можна розрізнити 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, наприклад, компаніями Boltek Lightning Detection Systems [7] та VAISALA Thunderstorm and Lightning Detection Systems [5]. Системи TWS цих двох компаній, які ще аналізуються нижче, доповнено грозодетекторами, що реєструють ЕМ-поле. В деяких системах додано і оптичні датчики (VAISALA). Електронна ж система вимірювання напруженості електричного поля, наприклад, ATSTORM, використовується іспанською компанією Aplicaciones Tecnológicas [8].

Канадська корпорація Boltek виробляє обладнання та програмне 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, є доступним широкий спектр допоміжних модулів індикації інформації, звукових та світлових модулів попередження, перетворення та передачі даних. Основні параметри щодо реєстрації електричного поля флюксометра EFM-100, згідно [7], включено до 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 Tecnológicas ATSTORM [8]	0–20	± 32	–	1

VAISALA – фінська компанія, яка розробляє та виготовляє обладнання для промислових вимірювань [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 (основні параметри вказано у 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 всіх технічних характеристик даного приладу, зокрема, і щодо оптичного датчика (лише зазначається, що він реєст-

рує імпульсне засвітлення неба над місцем установки приладу). Радіус виявлення грозової активності складає від 0 до 56 км, ефективність виявлення розрядів блискавки на 19 км при одному розряді – 90 %, при двох – 99 %, при трьох – 99.9 % [5].

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 суттєвий недолік, що пов'язаний із наявністю рухомих частин. Тому, наприклад, компанія Aplicaciones Tecnológicas розробила та запатентувала [16] чисто електронний пристрій вимірювання напруженості E -поля, який отримав назву ATSTORM. Параметри пристрою наведено в табл. 1, згідно [8]. 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.

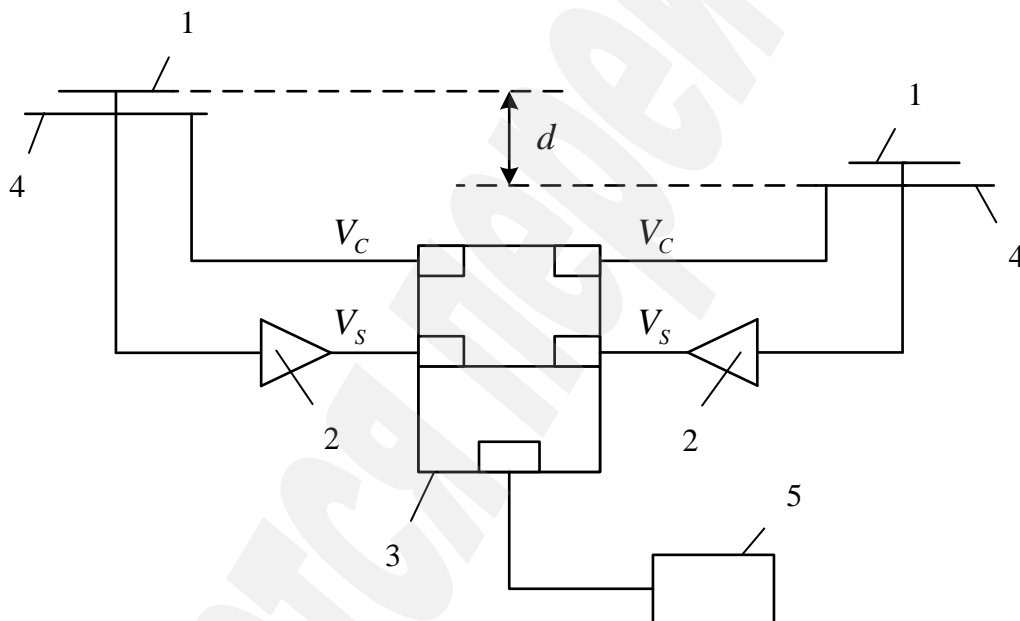


Рис. 2. Диференційна схема вимірювання напруженості електричного поля без використання обертових частин:

- 1 – вимірювальна пластина; 2 – операційний підсилювач; 3 – перетворювач;
4 – допоміжний електрод компенсації; 5 – комп'ютерна система [16]

Схема працює наступним чином (рис. 2): 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 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 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 аналого-цифрового перетворювача (АЦП), далі цей сигнал надсилається для аналізу до комп'ютерної системи 5, 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.

Застосування саме електронної системи реєстрування напруженості електричного поля дозволяє збільшити надійність системи, зменшити енергоспоживання та електронні завади, обумовлені двигуном, не проводити калібрування в залежності від зміни висоти установки датчика. Такого типу датчик електростатичного поля може пропонуватися до концепції СМ.

Як згадувалося, в останні роки розвиваються локальні системи моніторингу блискавок для об'єктів великих розмірів, які вже включають відеокамери (швидкісні і звичайні) та датчики, зокрема для тригерування записів [12–14].

Своєчасне і зручне виявлення місця пошкодження від удару блискавки можливе саме із застосуванням відеокамер. Розглянемо одну із таких систем, яку було розроблено в Китаї і тестовано на ЛЕП 500 кВ (рис. 1) [13]. Принцип роботи такої системи відносно простий. Під час спалаху розряду блискавки фотодатчик формує тригеруючий імпульс для запису певної кількості кадрів на SD-карту і одночасно даний фрагмент надсилається через 3G-модем на центральний сервер. Забезпечення живлення використовують від автономного модулю, коли неможливо жити систему від електричної мережі. Автономна система живлення складається із контролера, що регулює заряд акумулятора струмом від сонячної батареї. Для керування системою моніторингу використовують одноплатний мікрокомп'ютер, в якому проводиться первинна обробка інформації від відеокамери та подальше надсилання її на сервер. Зберігання даних від системи моніторингу на сервері дозволяє отримувати доступ до неї із будь-якого місця через мережу Інтернет.

Загалом, було встановлено 25 комплектів системи моніторингу на ЛЕП 500 кВ, що проходить через гірську місцевість. За 2015 р. було записано 134 спалахи типу хмара-хмара та 41 типу хмара-земля. Відповідні приклади фотографій-кадрів наведено у [13]. Отримані записи дозволяють визначити місця уражень, оцінити пошкодження на ЛЕП та збирати статистичні данні про розряди блискавки в регіоні траси лінії.

Інші системи із застосуванням відеокамер [12, 14] працюють за аналогічним принципом. Можна відзначити два основних недоліки таких систем – це можливе не фіксування на відеокамеру моменту ураження блискавкою та не спрацювання оптичної системи тригерування. Перший недолік пов'язаний із тим, що система відеоспостереження може пропустити розряд блискавки і не записати його в пам'ять. Це пояснюється тим, що тривалість світіння каналу розряду блискавки

лише з імпульсною компонентою струму може бути дуже короткою. Значно коротшою за тривалість одного кадру (20...40 мс) і навіть часу перенесення інформації з одного кадру в пам'ять (сотні мікросекунд). Другий недолік пов'язаний із тим, що тригеруюча система може і не спрацювати з різних причин. Оптичний датчик може бути забруднений або заважає сильний дощ/сніг. Або вдень, під час грози, існує яскравий світловий фон. Тому при малому струмі блискавки і, відповідно, менш яскравому світінні каналу, фотодатчик може не «помітити» розряд блискавки. Тому треба удосконалювати такі СМ з відеокамерами, зокрема, додавати інші датчики (електричного та магнітного поля, звуку), уточнювати їх характеристики і розвивати алгоритми роботи систем.

5. Методи досліджень

Для вибору необхідних вимог для датчиків та пристроїв реєстрації в СМ в роботі застосовано аналіз даних електромагнітних характеристик блискавок на основі експериментальних спостережень. Також використано методи моделювання датчиків із застосуванням схемотехнічних програмних пакетів, аналітичні розрахунки та проведено експериментальні випробування окремих датчиків для систем реєстрації.

6. Результати досліджень

На основі аналізу параметрів блискавки, існуючих систем попередження та спостереження за блискавкою запропоновано два варіанти концепції системи моніторингу блискавок (СМ). Особливість полягає в тому, що вони включають використання камер відеоспостереження та інші датчики (не лише фотодатчик). Таке рішення дозволить забезпечувати своєчасне виявлення місця та можливість оцінки пошкоджень, спричинених розрядом блискавки для об'єктів, що мають досить великі розміри. Для того, аби записувати і аналізувати події у відрізок часу перед, у момент та зразу після ураження блискавкою об'єкту, застосовують тригеруючий імпульс для СМ. Його формують датчики, що реєструють такі параметри блискавки як електричне та магнітне поле, оптичне випромінювання, грім.

Через наявність «мертвого» часу відеокамери, тобто інтервалу часу, коли відбувається зчитування інформації із матриці та запис кадру в пам'ять, інколи може не відбутися відео реєстрація. Цей час може складати від десятків до декількох сотень мікросекунд. У випадку лише імпульсної складової струму у блискавці (відсутній безперервний струм у розряді), час якої може збігатися із зчитуванням/записом кадру, якраз може і не відбутися її реєстрація розряду. Тому інші сигнали від блискавки із згаданих датчиків також записуються у пам'ять разом із отриманим відеорядом. Аналіз записів від датчиків системи тригерування допоможе не тільки тригерувати систему моніторингу, а й оцінити чи було ураження об'єкту та які орієнтовно були параметри блискавки. Варто зазначити, що така інформація послугує також і для статистичного аналізу параметрів грозової активності в зоні розташування об'єкту.

Керування системою моніторингу та первинний аналіз параметрів блискавки відбувається за допомогою одноплатного комп'ютера (ОК), який зберігає

дані на SD-карту та пересилає пакети даних через модуль зв'язку на сервер, де відбувається накопичення та детальне опрацювання отриманої інформації.

6.1. Комплексна система

Запропонований концепт комплексної системи моніторингу блискавок (СМ) представлено на рис. 3. Основними її компонентами є система датчиків (СД), відеокамери, одноплатний комп'ютер (ОК) та модуль зв'язку. СМ з такою структурою дозволить попереджати про наближення грозового фронту до об'єкту, здійснювати записи даних в момент ураження блискавкою і збирати статистичні дані про грози і блискавки в зоні розташування об'єкту.

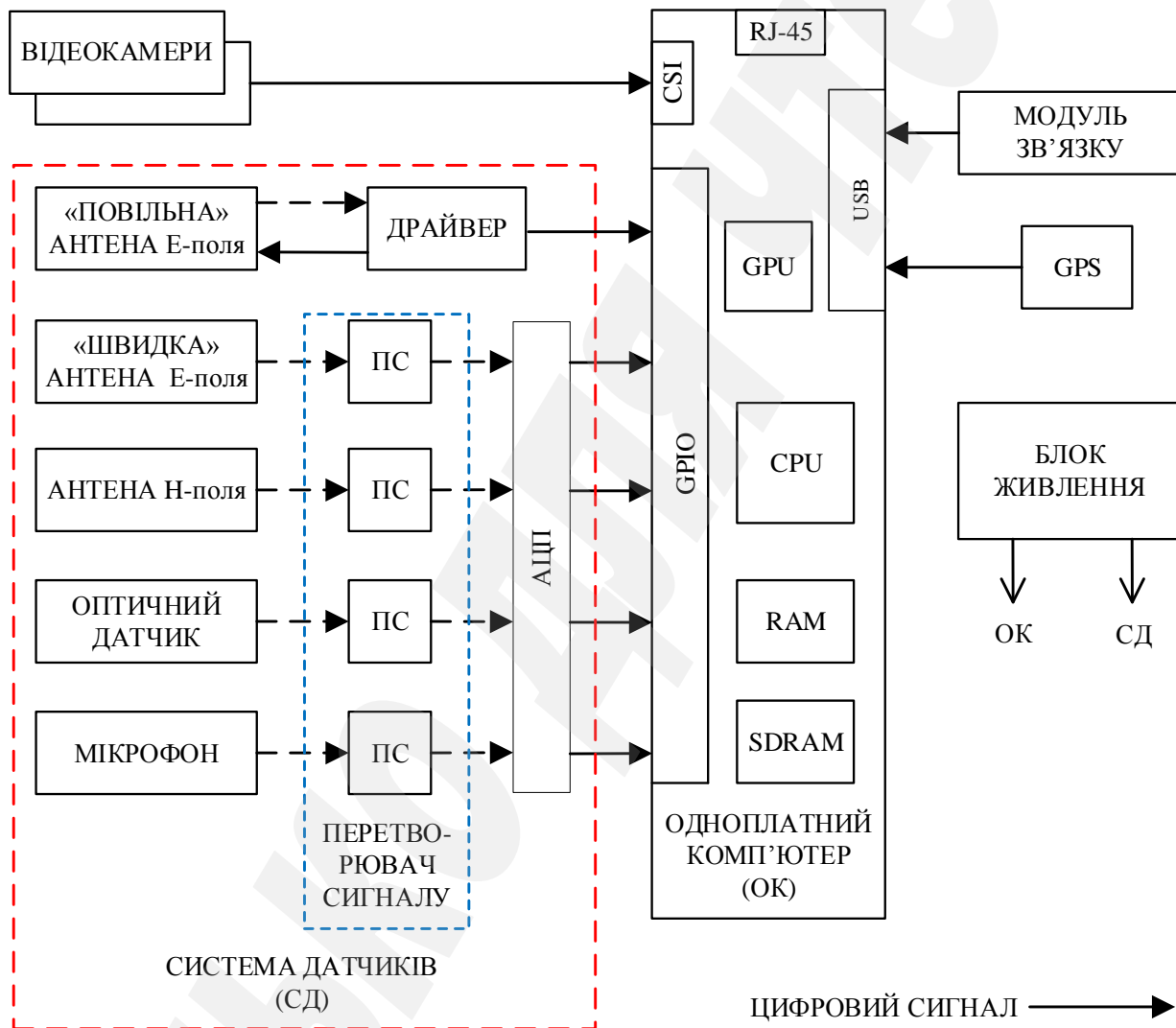


Рис. 3. Блок-схема комплексної системи моніторингу блискавок

Комплексна система моніторингу блискавок працює наступним чином. Антена «повільного» E -поля керується драйвером, який виконаний на основі патенту [16], далі отриманий цифровий сигнал аналізується одноплатним комп'ютером. При підвищенні напруженості E -поля до 1–10 кВ/м, навіть ще за

відсутності розрядів блискавки, система моніторингу через модуль зв'язку надсилає інформацію про можливість або наближення грози.

В той же час антени магнітного та «швидкого» електричного поля аналізують дальність грозових розрядів. У випадку їх поступового наближення до об'єкту (зростання амплітуд сигналів ЕМ-поля), СМ виходить із режиму чергування, тобто починається циклічний запис відео в пам'ять SDRAM і одночасно із цим надсилається сигнал попередження про небезпеку появи грози.

При грозовому розряді в ближній зоні дії СМ (зона, в якій ведеться відеоспостереження) мають спрацювати оптичний датчик та мікрофон, сигнал із яких записується та виступає в ролі тригеруючого імпульсу для початку зберігання фрагменту відео в пам'ять. Оскільки запис відео вже ведеться, то після подачі тригеруючого сигналу із нього вилучається та зберігається фрагмент відео з інтервалом часу близько 1.5 с до тригеруючого сигналу та 2 с після нього. Ці параметри вибрано на основі статистичних даних щодо тривалості передрозрядних процесів і розряду блискавки [3, 17–19].

Для резервування функцій тригерування використовується аналіз форми та амплітуди ЕМ-поля, оскільки оптичний та звуковий датчики можуть не відчутися спалах блискавки або зустрічний стример/лідер, що сформувався на об'єкті, за яким ведеться моніторинг. Детальніше рівні характеристик електричного та магнітного поля, світлового та звукового випромінювання, на які мають реагувати датчики та система, наведено далі у розділі 6.3, де обговорюються окремі компоненти СМ.

Для поглибленого аналізу інформації від СМ всі параметри, які фіксує СД та які виступають в ролі тригеруючого сигналу, записуються разом із фрагментом відео. Синхронізація часових параметрів записів та накладання міток часу на записи, отримані за допомогою СМ, відбувається із застосуванням приймачів GPS (Global Position System).

Передача інформації від СМ здійснюється за допомогою модуля зв'язку, в якості якого можуть виступати, наприклад, 3G-модем, радіомодулі для передачі даних, проводові лінії (вита пара) чи волоконно-оптичні лінії зв'язку (ВОЛЗ). Використання 3G-модему або інших радіомодулів доцільне лише тоді, коли неможливе проводові чи оптико-волоконне підключення до локальної мережі.

Живлення СМ відбувається за допомогою підключення до електромережі через блок трансформації та стабілізації напруги по шинам 5 В для живлення ОК та модулю зв'язку і ± 20 В для живлення СД. Як варіант, живлення може забезпечуватися також із використанням автономного блоку живлення (який включає сонячну панель, акумуляторну батарею та контролер заряду).

Аналоговий сигнал від антен, пройшовши підсилення та фільтрацію в перетворювачі сигналу (ПС), надходить на 4-канальний 16-бітний АЦП, оскільки в ОК найчастіше немає вбудованого перетворювача. «Повільна» антена Е-поля не потребує перетворення вимірювальної величини в цифровий формат, оскільки в її згаданому драйвері вже вбудовано АЦП.

Отримана інформація від СМ надсилається на сервер для подальшого аналізу оператором та автоматичного повідомлення про наближення грозового фронту чи ураження об'єкту. Оскільки окремі відеофрагменти, які були отримані від тригерування ЕМ-полем, можуть не містити розряду блискавки, то для

їх аналізу доцільно застосувати бібліотеку комп'ютерного зору Open CV [20]. Таке можливе внаслідок зміни фону ЕМ-поля грозового фронту над об'єктом, за яким ведеться моніторинг, коли напруженість поля може перевищувати мінімальні параметри, на які налаштовано систему. Використання даної бібліотеки допоможе виокремити із фрагментів відео, отриманих від СМ, саме кадри, в яких зафіксовано момент ураження блискавки.

Зрозуміло, що компоненти СМ повинні бути реалізовані у виконанні, яке забезпечує надійну довготривалу експлуатацію у відповідних кліматичних умовах. Також їх електрична частина має захищатися від перенапруг.

6.2. Спрощена система

Для певних об'єктів, зокрема які простягаються на великі відстані і потребують великої кількості станцій реєстрації, є сенс розглянути варіант спрощеної системи моніторингу (ССМ). Для спрощення конструкції СМ та її здешевлення можна виключити блок антени магнітного поля, «швидкої» антени E -поля та звуковий датчик. Таке рішення дозволить аналізувати меншу кількість параметрів явищ, що супроводжують розряд блискавки. Наприклад, не буде можливості оцінювати амплітуду струму блискавки за записом магнітного поля. В той же час ССМ зможе виконувати свою основну функцію – попереджувати про наближення грозового фронту та вести відеоспостереження за блискавками. Концепцію ССМ представлено на рис. 4 та описано нижче.

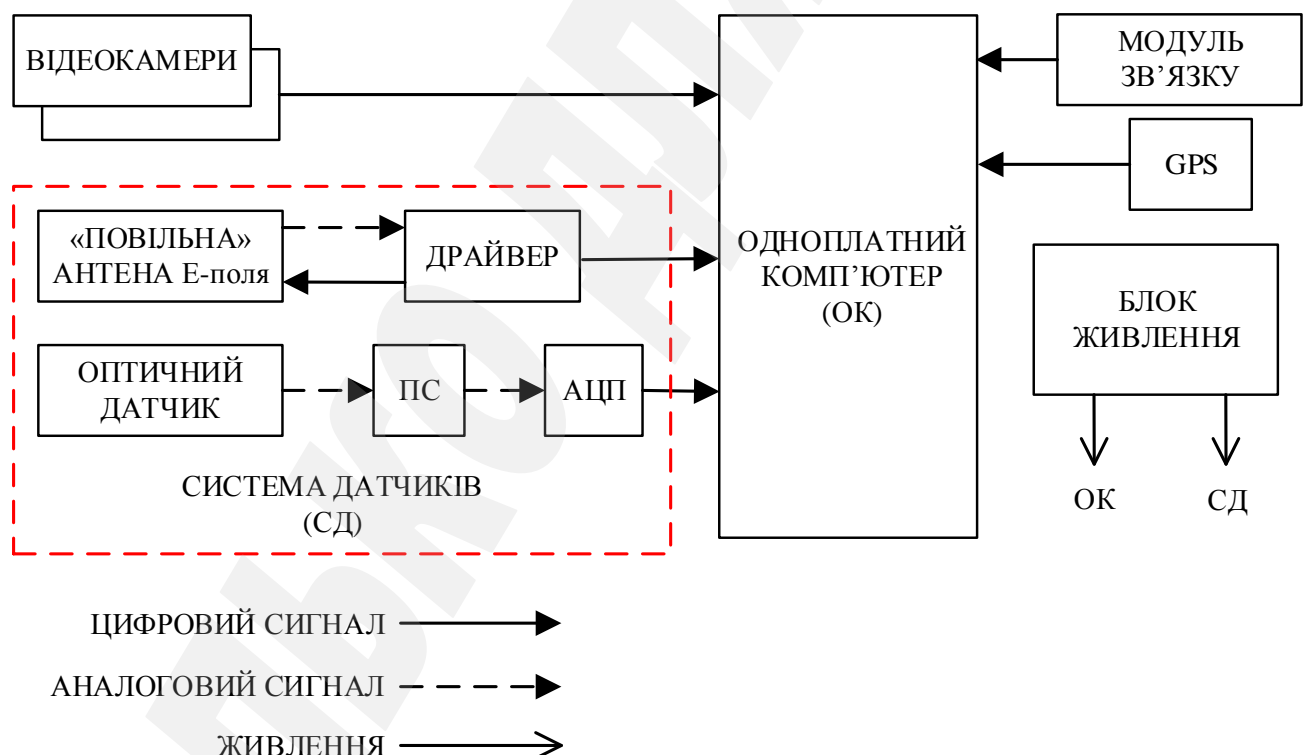


Рис. 4. Блок-схема спрощеної системи моніторингу блискавок

Під час наближення грозового фронту, «повільна» антена E -поля реєструє його зміни, і при збільшенні напруженості електричного поля понад критичний

рівень запускає систему моніторингу та надсилає через модуль зв'язку попереджувальний сигнал про приближення грозового фронту до об'єкту. Запуск ССМ ініціює процес циклічної відеозйомки, а відеосигнал в режимі реального часу надсилається на сервер.

Сервер здійснює обробку відеосигналу за допомогою спеціалізованого ПЗ, оснований на бібліотеці комп'ютерного зору Open CV. Алгоритм роботи ПЗ полягає у визначенні середньої яскравості кадру (в момент розряду блискавки яскравість підвищується) та порівнянні його із попереднім кадром. Якщо зафіксовано зміну яскравості, то відбувається збереження кадру.

В даній ССМ оптичний датчик не тригерує момент збереження відео, а лише тригерує накладання спеціальної мітки часу на відео при його спрацюванні та дозволяє записати зміну в часі інтенсивності спалаху від блискавки. Таке рішення обумовлено тим, що оптичний датчик інколи може не спрацювати. Це може трапитися, наприклад, при яскравому фоні (світла хмарність вдень) або ж при поганій видимості (туман чи сильний дощ або сніг). Відповідно, може не відбутися тригування системи і відеофіксація, якщо сподіватися лише на оптодатчик. В той же час програмний аналіз всього відеоряду, отриманого на протязі часу дії грозового фронту, допоможе уникнути цього. Через наявність «мертвого» часу відеосистеми та можливого розряду блискавки лише з короткотривалою імпульсною компонентою, які можуть збігатися у часі, відеофіксація може не відбутися. Оптичний датчик в даній ситуації допоможе в ході постаналізу визначити чи відбувся розряд, скільки було імпульсів струму в ньому та ін. Тому комбінування цих двох типів датчиків в СД та відеокамер дозволить суттєво зменшити ймовірність пропуску ССМ ураження блискавкою об'єкту.

Щодо інших компонентів ССМ (ОК, модуль зв'язку, приймач GPS та формувач мітки часу, система живлення), то вони мають в основному такі ж характеристики, як і у випадку комплексної СМ.

6.3. Характеристика компонентів системи

Далі розглянуто окремі компоненти СМ, орієнтовні параметри, на які вони мають бути розраховані, пропозиції щодо можливих варіантів реалізації в системі та ін.

6.3.1. Відеокамери. Найбільшу інформативність щодо фіксації факту і місця ураження споруд блискавкою має відеозображення. Тому СМ базуються саме на використанні відеокамер. Вже згадувалося, що в сучасних ІР-камерах, які розглядаються для використання в СМ, наявний так званий «мертвий» час, пов'язаний із записуванням кадру в пам'ять, а тому матриця в цей інтервал часу не фіксує потік світла, який на неї потрапляє. Отже, у випадку короткотривалої блискавки, лише з імпульсною компонентою зворотного удару, її відеореєстрація інколи може не відбутись (за спеціальних налаштувань камер, ймовірність такої ситуації незначна – менше 1 %). Звичайно, усунути цей недолік можна шляхом застосування високошвидкісної камери, але її використання в СМ не є доцільним через її високу вартість та великий об'єм відеофайлу, який необхідно пересилати. Тому для СМ доцільніше використовувати звичайні відеокамери зі спеціальними налаштуваннями режиму роботи. Частота кадрів у них може бути «звичайною» – 25 чи 50 к/с. Попередні тести, проведені за участю авторів, підт-

вердили можливість надійної відеореєстрації каналів розрядів для імпульсних струмів з тривалістю у кілька десятків мікросекунд.

Для СМ підійде будь-яка IP-відеокамера, в якій наявні розширені налаштування. В пропонуваній концепції СМ та ССМ можна, наприклад, використовувати відеокамеру Raspberry Pi Camera Module v2, деякі параметри якої представлено в табл. 2, згідно даних у [21].

Таблиця 2

Параметри Camera Module v2

Матриця	Sony IMX219
Роздільна здатність фото	8 Мп 3280x2464 пікселя
Відео	1080p30, 720p60
Функції керування та ін.	Контроль експозиції Баланс білого Смуговий фільтр Автоматичне виявлення яскравості 50/60 Гц Калібрування рівня чорного

6.3.2. Антена «повільного» електричного поля. Антена «повільного» електричного поля дозволяє вимірювати зміну постійного електричного поля поблизу землі. Реєстрація цієї зміни дозволяє прогнозувати наближення грозового фронту або зародження грозових хмар в зоні об'єкту. Діапазон реєстрації зміни напруженості має бути порядку ± 30 кВ, час реакції ~ 1 с.

Для розробленої концепції СМ прийнято рішення не використовувати «електричні млини» для реєстрування напруженості квазістатичного електричного поля через наявність в них рухомих частин (а тому і обмеженого ресурсу роботи) та необхідність проводити калібрування на певній висоті їх встановлення. Натомість, прийнято варіант із застосуванням чисто електронної системи вимірювання, наприклад, розробленої згідно [16].

Серед готових рішень для аналізу зміни напруженості квазістатичного електричного поля, можна орієнтуватися на датчики ATSTORM [8] від компанії Aplicaciones Tecnológicas, в якому використано електронну систему вимірювання за [16]. Вартість даного датчика досить значна. Тому може бути доцільним проектування аналогу такого датчику для СМ із наступними характеристиками:

- смуга пропускання 0.1–10 Гц;
- межі вимірювання напруженості електричного поля ± 30 кВ;
- незалежність напруженості E -поля від висоти встановлення датчику.

6.3.3. Антена «швидкого» електричного поля. Антени «швидкого» електричного поля дозволяють оцінювати динамічні зміни E -поля, які відбуваються під час розрядів різного типу (в хмарах та між хмарами і землею). Знову ж таки, можна розглядати готові пристрої з такими антенами [5]. З другого боку, такі пристрої можна спроектувати і на стадії розробки певної СМ. Базові співвідношення для цього наведено нижче, згідно [17].

Фізична конфігурація «швидкої» антени представляє собою ізольований від землі стрижень (хлистова антена) або ж пластину, які приєднано до електричної схеми. Якщо розмір антени набагато менший, ніж мінімальна довжина хвилі E -поля, антена буде виступати в якості ємнісного джерела змінної в часі напруги, величина якої пропорційна фоновому електричному полю $e(t)$.

В еквівалентній схемі антени [17] на рис. 5 позначено:

$e(t)$ – еквівалентне джерело напруженості фонового електричного поля;

h_e – ефективна висота антени;

C_a – еквівалентна ємність антени;

C_c, R_c – еквівалентна ємність та опір кабелю, яким антену приєднано до схеми;

C – вимірювальна ємність;

R – опір, який регулює постійну часу згасання.

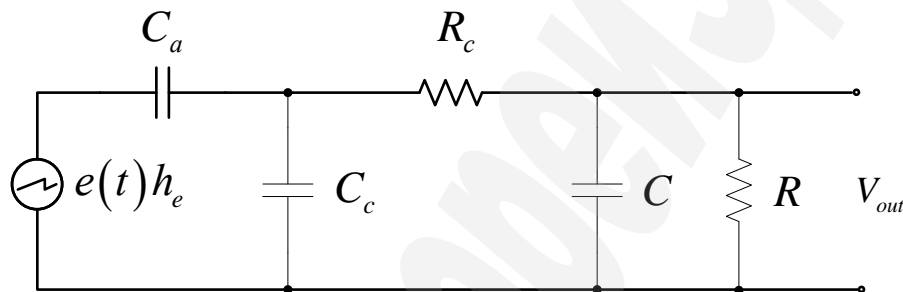


Рис. 5. Еквівалентна схема антени для вимірювання «швидкого» E -поля [17]

Наведемо основні співвідношення для вибору параметрів у випадку стрижневої антени. Ефективна висота антени (h_e) визначається, як відношення напруги розімкненої еквівалентної схеми антени (V_p) до напруженості електричного поля в напрямку поляризації антени (E) [17]:

$$h_e = \frac{V_p}{E}. \quad (1)$$

Для первинних розрахунків можна прийняти $h_e = 1$ м, а в подальшому це значення експериментально уточнюється та використовується як стала величина. Вихідний сигнал $v(t)$ в такій схемі [17]:

$$v(t) = E_0 h_e \frac{C_a}{C_a + C_c + C} e^{-(t/\tau_d)}, \quad (2)$$

$$\tau_d = R(C_a + C_c + C), \quad (3)$$

де E_0 – амплітуда поля, яке прийнято тут ступінчатою функцією.

Константа часу τ_d визначає межу низьких частот смуги пропускання вимірювальної системи. Гранична частота смуги пропускання (нижче 3 дБ) визначається як $1/(2\pi\tau_d)$. Щоб отримати точне вимірювання змінного електричного

поля, постійна часу антенної системи повинна бути набагато більшою, ніж загальна тривалість змінного поля в часі. Як показано в [17], щоб проводити з інженерною точністю вимірювання поля, тривалість якого становить близько 100 мкс, постійна часу згасання вимірювальної системи повинна бути близько 1 мс.

Верхня межа частоти смуги пропускання вимірювальної системи визначається фізичними розмірами антени, компонентами електроніки, які використовуються в схемі, та системою запису вихідного сигналу. Якщо l є довжина стрижня, необхідно, щоб $l \ll \frac{\lambda_m}{4}$, де λ_m – мінімальна довжина хвилі вимірювань електричного поля. Щоб проводити вимірювання E -поля від ударів блискавок, верхня межа пропускнув здатності антени має перевищувати приблизно 5...20 МГц [17].

Аналогічно можна розглянути і співвідношення для плоскої антени «швидкого» E -поля. Зокрема, проведено моделювання за допомогою SPICE-подібної комп'ютерної програми Micro-Cap для антени з радіусом пластини $r_{nl} = 120$ мм. При мінімальній частоті реєстрування «швидкого» E -поля 1 кГц, умова $2 \cdot r_{nl} \ll \frac{\lambda_m}{4}$ виконується. Відстань, на якій пластина розташована від заземленого корпусу складає $h = 50$ мм. Для з'єднання антени із схемою підсилення використано коаксіальний кабель довжиною 1 м (50 Ом, 80 пФ), інтегруюча ємність – 15 пФ, розрядний резистор – 99 МОм, постійна часу – $1.485 \cdot 10^{-3}$ с [17].

Для еквівалентного джерела $e(t)$, було використано осцилограми та дані напруженості E -поля, які отримано експериментально з реальними блискавками на близьких відстанях (22 м [22]) та на більших відстанях (1 км та 10 км [19, 23]). Дані з роботи [22] дозволили визначити мінімальні параметри електромагнітного поля від мінімальних за амплітудою струму блискавок, отриманих на відстані 20 та 22 м від ураженої споруди (вежа, 100 м, записи 44 зворотних ударів). Отримані для мінімального струму значення, які наведено в табл. 3, можуть слугувати пороговими параметрами для спрацювання СМ та ССМ. Форму імпульсів E -поля для задавання вхідного сигналу на антені при різних відстанях до блискавки (22 м, 1 та 10 км) апроксимовано за типовими осцилограмами полів [17, 22, 23].

Таблиця 3

Мінімальні значення амплітуди струму блискавки та відповідного електромагнітного поля*

Параметр	I , кА	H , А/м	ΔE_L , кВ/м	ΔE_{RS} , кВ/м	RE , кВ/м	T , мкс
Значення	1.8	40.6	0.6	1.5	-0.9	4.6

Примітка: дані взяті з [22]; H – напруженість магнітного поля, ΔE_L – напруженість поля, створюваного лідером, ΔE_{RS} – напруженість E -поля на стадії зворотного удару, T – час, за який амплітуда досягає половини максимального значення, RE – результуюча напруженість електричного поля отримана за виразом: $RE = \Delta E_L - \Delta E_{RS}$.

Результати моделювання представлено на рис. 6, де показано осцилограми вхідних та вихідних сигналів схеми реєстрації E -поля.

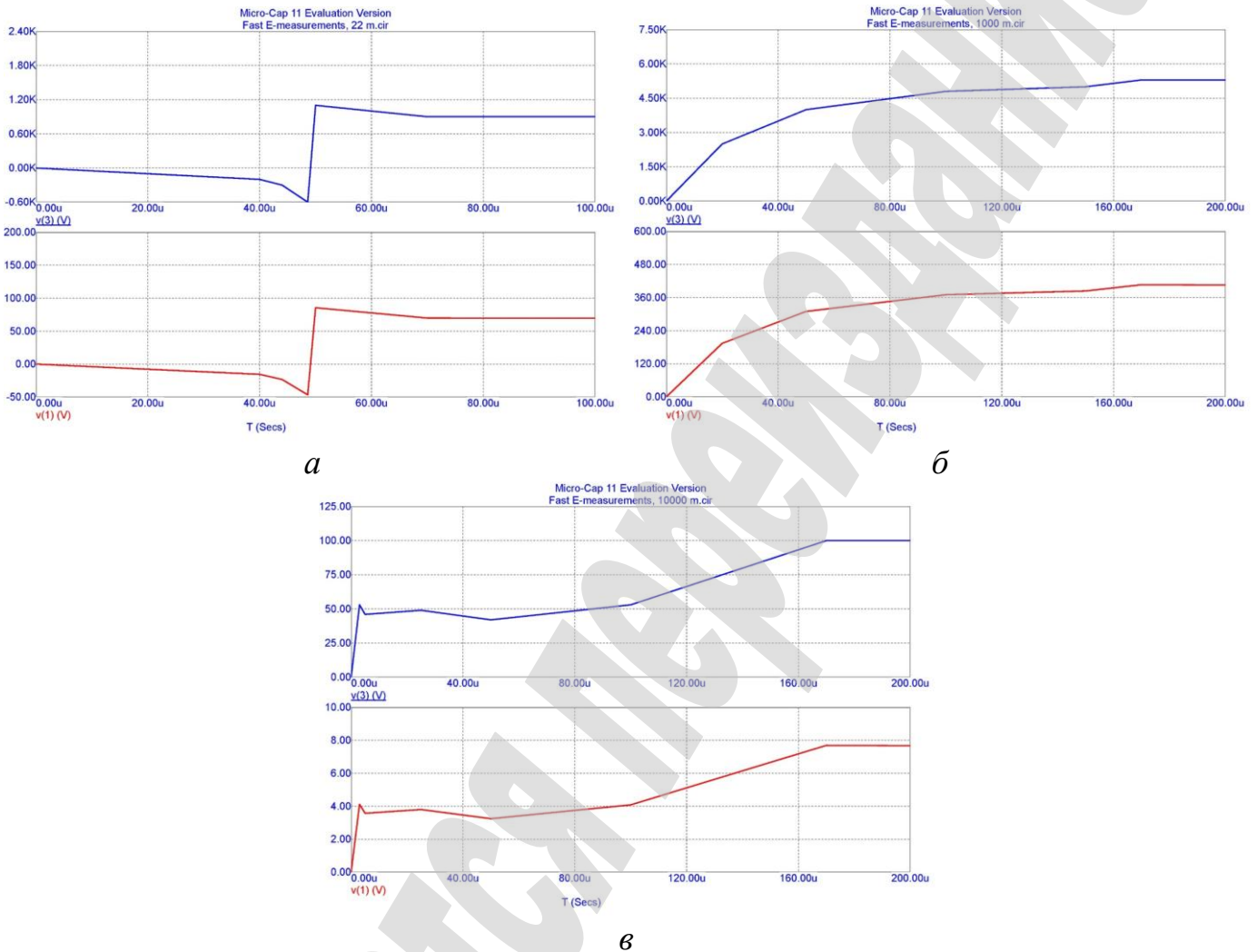


Рис. 6. Зміна напруги вхідного сигналу (верхня крива, кВ) та вихідного сигналу (нижня крива, В) з часом (мкс) для плоскої антени на відстані від блискавки: a – 22 м; $б$ – 1000 м; $в$ – 10000 м

Отримані сигнали на виході схеми, які відповідають піковим параметрам поля і представлено в табл. 4, можуть слугувати для вироблення тригеруючого сигналу для запису відеофрагменту в пам'ять СМ.

Таблиця 4

Пікові параметри напруги на виході антени, отримані для відстаней до блискавки у 22, 1000 та 10000 м

Відстань, м	22	1000	10000
Напруга на виході антени v , В	46.6	405.2	7.7

У табл. 4 для випадку відстані 22 м напруга на виході антени становить 46.6 В, тобто менша, ніж для випадку 1000 м – 405.2 В. Це тому, що дані, які взято для моделювання на відстані 22 м, стосуються блискавки із мінімальним струмом ($I=1.8$ кА). А для відстаней 1000 та 10000 м взято середні значення напруженості електричного поля, створюваного блискавками, згідно [23].

Підсумок вимог до характеристик антени «швидкого» E -поля:

- смуга пропускання – від 1 кГц до 5...20 МГц;
- мінімальна напруга на виході із антени, яка може слугувати тригеруючим сигналом для запису відео, складає ~ 45 В;
- забезпечення обмеження амплітуди сигналу в ПС для АЦП.

6.3.4. Антена магнітного поля. Для вимірювання магнітного поля, створюваного блискавкою, може бути використана рамка із дроту. Індукована напруга пропорційна швидкості зміни магнітного потоку, що проходить через область рамки. Враховуючи, що площа петлі (A) є досить малою, можна вважати сталою нормальну складову щільності магнітного потоку по площі рамки [18]:

$$B_n = B \cos \alpha, \quad (4)$$

де α – кут між вектором щільності магнітного потоку та нормаллю до площини петлі. Величина індукованої напруги в рамці:

$$V = A \frac{dB_n}{dt}. \quad (5)$$

Коли $\cos \alpha = 1$ ($\alpha = 0^\circ$), індукована напруга максимальна, а при $\cos \alpha = 0$ ($\alpha = 90^\circ$) індукована напруга дорівнює нулю. Звідси випливає, що величина напруги для вертикальної рамкової антени, наведеної на її кінцях, у фіксованому положенні, є функцією від напрямку до джерела, а дві такі антени з ортогональними площинами можуть бути використані для визначення напрямку на джерело магнітного поля [18]. Отже, для отримання горизонтальної (азимутальної) компоненти магнітного поля, яка є домінуючою компонентою для вертикальних каналів блискавки, необхідні дві вертикальні рамкові антени. Оскільки, сигнал на виході рамки антени є пропорційний похідній індукції магнітного поля, сигнал треба інтегрувати, щоб отримати величину індукції поля. Це можна виконати, використовуючи схему RC або RL. Також вимірюваний сигнал похідної поля може бути інтегрований чисельно. Як приклад, нижче обговорено випадок з інтегратором RC, а еквівалентну схему такої системи представлено на рис. 7, де позначено відповідні параметри антени, інтегратора та реєстратора.

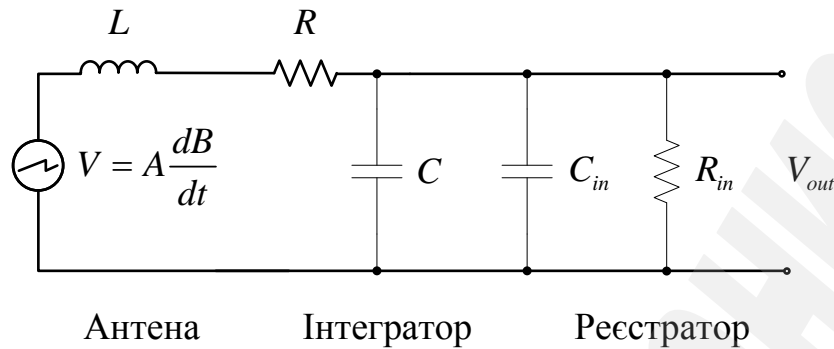


Рис. 7. Еквівалентна схема магнітної антени [18]

Є три умови для неспотвореної реєстрації магнітного поля за допомогою такої вимірювальної системи [18]:

1) $R \gg 1/\omega C$ ($\omega \gg 1/(RC)$; C_{in} – знехтувана), яка визначає нижню частоту смуги пропускання і еквівалентна умові $\Delta t \ll \tau$ ($\tau = RC$); тут ω – еквівалентна кругова частота сигналу магнітного поля;

2) $R \gg j\omega L$ ($\omega \ll R/L$), яка визначає верхню частоту смуги пропускання;

3) $R_{in} \gg R$, яка забезпечує, щоб C розряджалась насамперед через R , а не R_{in} .

При цих трьох умовах вихідна напруга не залежить від частоти і визначається [18]:

$$V_{out} = \frac{A \cdot B}{R \cdot C}. \quad (6)$$

Щоб екранувати антену магнітного поля від дії E -поля, застосовують заземлений розімкнений екран, в який розміщують рамкову антену. Широкого поширення набуло застосування коаксіального кабелю в якості антени для реєстрування магнітного поля блискавки, в якій зовнішній екран розривають, щоб уникнути створення замкненого витка, та заземлюють [18]. Таке рішення дозволяє використовувати внутрішній провідник кабелю як рамкову антену.

Застосування рамкової магнітної антени в СМ інколи є незручним у зв'язку із великими габаритними розмірами (діагональ одновиткової рамкової антени може сягати 1–2 м). Використання феритових стрижнів дозволяє зменшити розміри в декілька разів, але антена з феритовим стержнем потребує більшої кількості витків і має меншу резонансну частоту, ніж рамкова антена. Резонансна частота феритової антени для широкосмугового прийому, в якому лежить основний спектр магнітного випромінення блискавки, не повинна перевищувати 30...100 кГц [18, 24].

В ССМ можна використовувати, наприклад, готовий датчик типу MOD-1016 [25] в якості детектора грозових розрядів і сигналізатора про наближення грозового фронту. До його переваг можна віднести компактність, низьке енергоспоживання, дальність реєстрації до 40 км, цифровий інтерфейс для підключення (SPI, I2C). До недоліків – неможливість реєстрування форми сигналів магнітного поля блискавки, та відсутність детальної інформації про параметри блискавки, для яких проводилось калібрування датчику.

Підсумок вимог щодо характеристик антени магнітного поля:

- смуга пропускання – від 3 кГц до 30 (краще 100) кГц;
- забезпечення компактності антени (феритовий стрижень).

6.3.5. Оптичний датчик. Застосування оптичного датчику на основі фотодіоду дозволяє тригерувати СМ за розрядом поблизу об'єкту. Інформація з антен поля залежить від місця їх встановлення, наявності поблизу інших великих об'єктів, які можуть змінювати параметри поля, і від характеристик струму блискавки. Потужна блискавка на далекій відстані може створювати таке ж за амплітудою поле, яке буде створене меншим струмом на близькій відстані. Дальність, на якій оптичний датчик може тригерувати СМ, відповідно до даних [11, 26], може складати сотні та десятки сотень метрів, що цілком є достатньо для тригерування системи моніторингу блискавок, які вражають об'єкти.

З готових гроздетекторів, які містять оптичний приймач, можна згадати датчик грозових розрядів VAISALA TSS928 [5]. Він реєструє серед інших характеристик також і оптичне випромінювання від блискавки на близьких відстанях, так зване засвітлювання неба. Виробник не надає детальних технічних характеристик щодо оптодатчику. Так само і в системі з відеореєстрацією, яку використано для ЛЕП-500 кВ [13], вказується на наявність оптодатчику, але не подається детальної інформації щодо його характеристик.

Автори досліджували оптодатчик власної розробки, побудований на швидкому фотодіоді з чутливістю у видимому та інфрачервоному діапазоні (0.3–1.1 мкм). Попередні випробування показали, що розроблена схема забезпечує реєстрацію імпульсів з розрізненням на фронті не гірше 1 мкс. Випробування модулю оптодатчику проводилися на високовольтних генераторах напруги (ГІН) та струму (ГІС). Наприклад, тести з ГІС (рис. 8) давали можливість забезпечувати імпульсні дуги зі струмом у 20...30 кА, як у типових реальних блискавках на стадії зворотного удару [19]. Часові характеристики застосованих коливальних імпульсів (5, 27, 40 мкс – час 1-го, 2-го, 3-го піків, відповідно) відносяться до діапазону мінімальних величин тривалості імпульсів, які спостерігають для ударів типових блискавок. Зокрема, у кумулятивних розподілах тривалостей імпульсів струмів для перших ударів блискавок 95-% величині відповідає ~30 мкс, а для наступних ударів – 6.5 мкс [19].

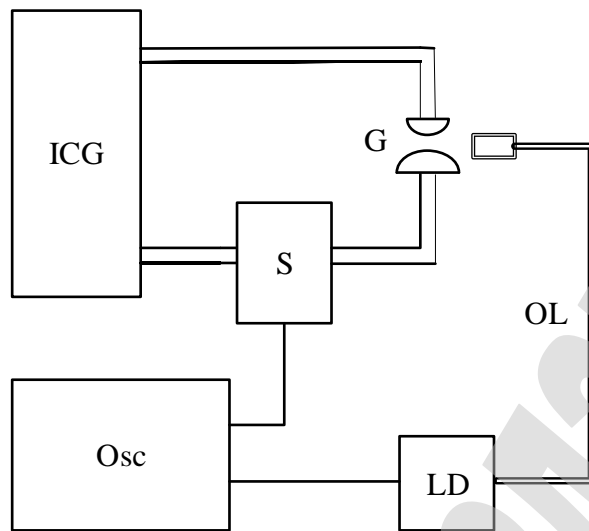


Рис. 8. Структурна схема випробувань оптодатчика на стенді з генератором імпульсних струмів (ICG):

G – електроди розрядного проміжку; S – шунт; OL – оптоволоконна лінія; LD – модуль оптодатчику; Osc – осцилограф

Експериментальні осцилограми коливального затухаючого імпульсу струму розряду у короткому проміжку (5 мм) та сигналу оптодатчику представлено у відносних одиницях на рис. 9.

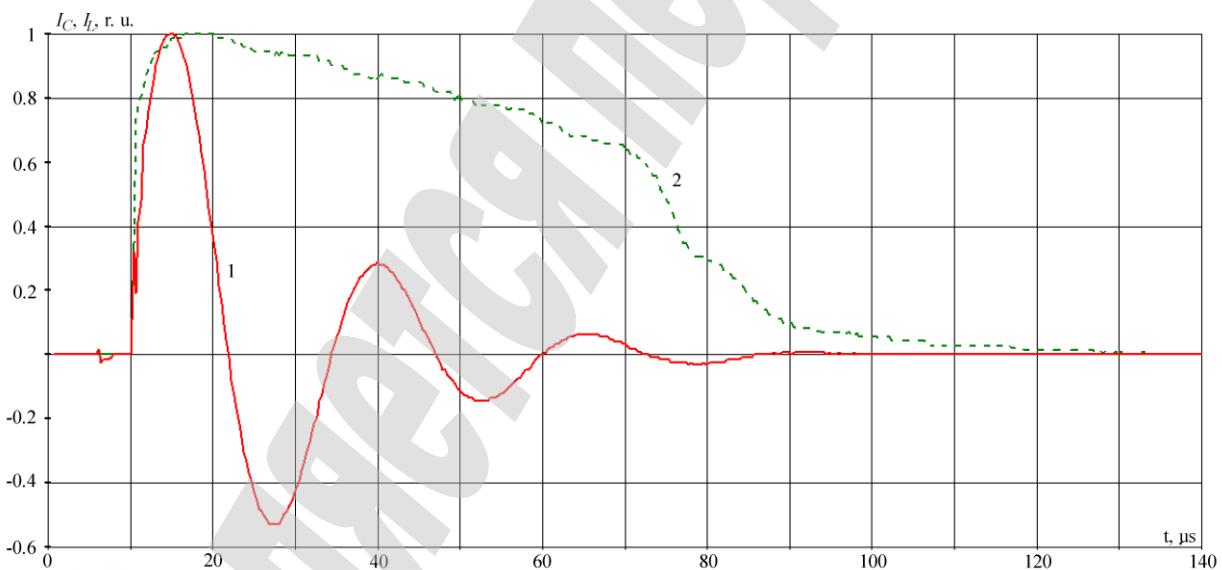


Рис. 9. Осцилограми імпульсу струму у розряді (I_C , крива 1) та сигналу оптодатчику (I_D , крива 2) у відносних одиницях: струм – запис з шунта, 21 кА; час t – в мікросекундах

Амплітуда струму реєструвалася з використанням малоіндуктивного шунта і в цьому досліді становила 21 кА. Коливання струму практично повністю згасають за 80 мкс, а інтенсивність оптичного сигналу починає різко спадати десь з 60 мкс (до половини амплітуди – за 65 мкс), але далі згасає значно пізніше (120 мкс), ніж струм. Пікове значення оптичного сигналу досягається з певною затримкою (~3.6 мкс) відносно піка струму. Результати тестів загалом уз-

годжуються із спостереженнями інших дослідників щодо затримки світіння (1.8 мкс) і його інерційності у випадку природних блискавок [27]. Питання щодо потужностей оптичного випромінювання з каналу розряду досліджувалися в [27, 28] і, наприклад, для розрядів з амплітудою струму 10 та 19.7 кА на відстані біля 200 м становили 503 та 2075 Вт/м², відповідно [27].

Отже, щодо вимог до характеристик оптодатчика можна підсумувати:

- рівномірна чутливість у видимому та ближньому інфрачервоному діапазоні;
- розрізнення – одиниці мікросекунд, відстань реєстрації блискавки – порядку 500 м;
- параметри сформованого тригерного сигналу на виході схеми – 5...10 В, 0.1...0.5 с.

6.3.6. Звуковий датчик. Всі основні типи розрядів (в хмарах, між хмарами, хмара-земля), здатні продукувати грім. Дослідження показують, що основний спектр акустичного випромінювання далекої блискавки лежить в діапазоні 0–150 Гц, з піком поблизу 100 Гц [29]. Значна потужність є і в інфразвуковому діапазоні (0...20 Гц) [29]. На ближніх відстанях спектри грому досліджувалися з тригерованими блискавками [29], де акустичний основний спектр отримано у діапазоні орієнтовно 200...1800 Гц. Таким чином, для реєстрування грому можуть підійти конденсаторні мікрофони, в яких нижня межа діапазону частоти становить близько 0.5 Гц. Верхня межа їхнього частотного діапазону може складати десятки кілогерц, тому звуковий датчик повинен мати фільтр, який обмежить реєстрування звуку до частоти 1...2 кГц.

7. SWOT-аналіз результатів досліджень

Strengths. Позитивним результатом даного дослідження є пропозиція концепції системи моніторингу блискавок, які уражують об'єкти, що має розширені можливості в порівнянні з існуючими системами грозопопередження та моніторингу. Це забезпечується за рахунок обґрунтованого вибору видів і характеристик датчиків, які реєструють різні характеристики явищ, що супроводжують розряди блискавок, і застосування кількох камер відеореєстрації. Реалізація таких СМ дозволить з високою ефективністю реєструвати блискавки різних видів на об'єкті та поблизу нього і точно визначати місце ураження. Це забезпечить технічні і економічні вигоди під час експлуатації великих об'єктів і обслуговуванні їх систем блискавкозахисту. А також надасть додаткові можливості для аналізу уражень блискавками і ефективного планування усунення пошкоджень, статистичні дані по грозовій активності в зоні об'єкту та інформацію для покращення характеристик засобів захисту. Також позитивним результатом є пропозиція двох варіантів СМ (комплексної та спрощеної), що дає певну гнучкість у виборі СМ залежно від характеристик і особливостей об'єкту захисту, умов експлуатації, вимог щодо надійності, економічних можливостей та ін.

Розробка сучасних високотехнологічних СМ грозової активності, поряд з науково-прикладними задачами, дозволить вирішувати ряд важливих завдань для різних галузей. Зокрема, сприятиме розвитку нових підходів до проектування інженерно-технічних споруд і сучасних систем блискавкозахисту, безпечній експлуатації різних об'єктів, зменшенню економічних збитків, пов'язаних із грозовими явищами, а також безпечній життєдіяльності людей.

Weaknesses. До слабких сторін запропонованої концепції СМ можна віднести певну складність комплексної СМ і наявність багатьох компонент. Додаткових досліджень, проробки і витрат потребують питання вибору режимів реєстрації звичайними відеокамерами короткотривалих складових в розрядах блискавок, тестування датчиків також і в природних умовах та розробки програмного забезпечення СМ в цілому.

Opportunities. В подальшому доцільно дослідити можливість оптимізації структури СМ для кожного різновиду об'єктів, надійної роботи в різну пору доби і погодних умов. А також детальніше розробити алгоритми роботи відповідних варіантів СМ та програмного забезпечення з метою наближення до сто відсоткової відеореєстрації блискавок на об'єкті.

Threats. До загроз відносяться необхідність додаткових витрат на розробку і тестування СМ, придбання, монтаж, обслуговування і поточне проведення аналізу даних, що звичайно призведе до певного збільшення вартості продукції відповідних підприємств, де такі СМ буде впроваджено.

8. Висновки

1. Проведено аналіз існуючих систем грозового попередження та систем моніторингу. Визначено, що в ряді локальних систем основним недоліком є відсутність засобів відеореєстрації, що не дозволяє визначати місце ураження об'єктів. Там де вони існують, є потреба розвинути більш надійні підходи до тригерування записів системою та подальшого аналізу. На основі аналізу запропоновано два варіанти концепції системи моніторингу блискавок, що вражають великі споруди і відбуваються поблизу них – комплексну СМ та спрощену СМ (ССМ). В обох застосовано відеокамери та додаткові датчики.

2. Визначено структуру запропонованих СМ, описано основні режими їх роботи, за даними досліджень блискавок встановлено параметри грозових явищ і блискавок, які мають детектуватися для тригерування СМ та реєструватися (за допомогою датчиків електричного та магнітного полів, оптичного сигналу, грому).

3. Сформульовано вимоги щодо необхідних характеристик окремих компонентів СМ та запропоновано можливі варіанти датчиків (готові продукти та ті, що можуть бути розроблені спеціально для СМ), наведено методики і результати розрахунків та моделювання окремих датчиків електричного та магнітного поля. Рекомендовано:

- відеокамери – типу IP, 25...50 к/с, з розрізненням від 1920x1080 пікселей;
 - швидкі (1 мкс) оптодатчики з чутливістю в діапазоні 0.4...1 мкм;
 - антени «повільного» електричного поля – електронного типу, без рухомих частин, зі смугою пропускання – 0.1...10 Гц;
 - антени «швидкого» електричного поля – стрижень чи пластина, 1 кГц...5 (краще 20) МГц;
 - для реєстрації магнітного поля – компактні феритові антени, 3...30 (краще 100) кГц;
 - для фіксування грому – мікрофони конденсаторного типу, на частоті від 0 до 1...2 кГц.
- У СМ та ССМ доцільно використовувати ПЗ на основі бібліотеки комп'ютерного зору Open CV для виокремлення кадрів із записом розряду блискавки.

4. Виконано первинні випробування оптичного датчику із застосуванням високовольтного генератора імпульсних струмів. Результати підтвердили працездатність оптодатчику і можливість реєстрації короткотривалого світлового випромінювання (десятки мікросекунд) із каналу імпульсного розряду зі струмом (20...30 кА), характерним для ударів типової блискавки.

Література

1. Cummins, K. L. An Overview of Lightning Locating Systems: History, Techniques, and Data Uses, With an In-Depth Look at the U.S. NLDN [Text] / K. L. Cummins, M. J. Murphy // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. – 2009. – Vol. 51, No. 3. – P. 499–518. doi:[10.1109/temc.2009.2023450](https://doi.org/10.1109/temc.2009.2023450)
2. Richard, P. Safir: Operational System For Long Range Monitoring Of thunderstorm Activity [Text] / P. Richard, A. Soulage, F. Broutet, J. Y. Iojou, P. Bettencourt // 10th Annual International Symposium on Geoscience and Remote Sensing. – 1990. – P. 1889–1892. doi:[10.1109/igarss.1990.688892](https://doi.org/10.1109/igarss.1990.688892)
3. Rakov, V. A. Lightning: physics and effects [Text] / V. A. Rakov, M. A. Uman. – Cambridge University Press, 2003. – 687 p.
4. Stock, M. Improvements to the BOLT lightning location system [Text] / M. Stock, T. Wu, Y. Akiyama, T. Ushio, Z. Kawasaki, Y. Nakamura, M. Stock, Z. Kawasaki // 2016 33rd International Conference on Lightning Protection (ICLP). – Estoril, 2016. – P. 1–4. doi:[10.1109/iclp.2016.7791365](https://doi.org/10.1109/iclp.2016.7791365)
5. VAISALA [Electronic resource]: Official Site. – Available at: [\www/URL: http://www.vaisala.com/](http://www.vaisala.com/). – 10.11.2017.
6. THOR GUARD [Electronic resource]: Official Site. – Available at: [\www/URL: http://www.thorguard.com/](http://www.thorguard.com/). – 10.11.2017.
7. Products [Electronic resource]: Official Site // BOLTEK. – Available at: [\www/URL: http://www.boltek.com/catalog/products/](http://www.boltek.com/catalog/products/). – 10.11.2017.
8. Aplicaciones Tecnológicas [Electronic resource]: Official Site. – Available at: [\www/URL: http://lightningprotection-at3w.com/](http://lightningprotection-at3w.com/). – 10.11.2017.
9. Lightning & Surge Technologies [Electronic resource]: Official Site. – Available at: [\www/URL: http://www.lightningman.com.au/](http://www.lightningman.com.au/). – 10.11.2017.
10. Bloemink, H. Static electricity measurements for lightning warnings: an exploration [Text] / H. Bloemink. – INFRA-R&D KNMI, 2013. – 28 p.
11. Matsui, M. Evaluation of Lightning Location accuracy of JLDN with a lightning video camera system [Text] / M. Matsui, N. Takano // 2010 Asia-Pacific International Symposium on Electromagnetic Compatibility. – Beijing, China, 2010. – P. 1142–1145. doi:[10.1109/apemc.2010.5475826](https://doi.org/10.1109/apemc.2010.5475826)
12. Huang, B. Remote online observation system of power system lightning stroke [Text] / B. Huang, Z. Fu, J. Chen, C. Gu // 2014 International Conference on Lightning Protection (ICLP). – Shanghai, 2014. – P. 922–926. doi:[10.1109/iclp.2014.6973255](https://doi.org/10.1109/iclp.2014.6973255)
13. Shanqiang, G. Application of lightning optical path monitoring system on 500 kV transmission lines in mountain area [Text] / G. Shanqiang, Y. Biwu, Z. Chun, W. Tao, L. Qing // 2016 33rd International Conference on Lightning Protection (ICLP). – Estoril, 2016. – P. 1–5. doi:[10.1109/iclp.2016.7791413](https://doi.org/10.1109/iclp.2016.7791413)
14. Yan, N. Lightning stroke optical triggering circuit design for overhead line [Text] / N. Yan, Z. Shi, N. Xu, B. Wang, Z. Fu // 2014 International Conference on Lightning Protection (ICLP). – Shanghai, 2014. – P. 205–209. doi:[10.1109/iclp.2014.6973122](https://doi.org/10.1109/iclp.2014.6973122)

15. Xiang, N. A Precisely Synchronized Platform for Observing the Lightning Discharge Processes [Text] / N. Xiang, S. Gu // 2011 Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference. – Wuhan, 2011. – P. 1–3. doi:[10.1109/appeec.2011.5748369](https://doi.org/10.1109/appeec.2011.5748369)
16. Device and system for the measurement of an external electrostatic field, and system and method for the detection of storms [Electronic resource]: Patent US 7508187 B2 / Pomar Garcia C., Puchades Marco J.; assignee: Aplicaciones Tecnologicas, S.A. – Appl. No. US 11/666,193; Filed October 25, 2005; Publ. March 24, 2009. – Available at: \www/URL: <https://www.google.com/patents/US7508187>
17. Cooray, V. The Lightning Flash [Text] / ed. by V. Cooray. – Ed. 2. – The Institution of Engineering and Technology, 2014. – 926 p. doi:[10.1049/pbpo069e](https://doi.org/10.1049/pbpo069e)
18. Rakov, V. A. Fundamentals of Lightning [Text] / V. A. Rakov. – Cambridge University Press, 2016. – 248 p. doi:[10.1017/cbo9781139680370](https://doi.org/10.1017/cbo9781139680370)
19. Rakov, V. A. Lightning parameters for engineering applications – An update on CIGRE WG C4.407 activities [Text] / V. A. Rakov // 2011 International Symposium on Lightning Protection. – IEEE, 2011. doi:[10.1109/sipda.2011.6088434](https://doi.org/10.1109/sipda.2011.6088434)
20. Open Source Computer Vision Library [Electronic resource]. – Available at: \www/URL: <http://opencv.org>. – 10.11.2017.
21. Raspberry Pi Camera Module No.913-2664 [Electronic resource]. – Available at: \www/URL: <https://cdn.sparkfun.com/datasheets/Dev/RaspberryPi/RPiCamMod2.pdf>. – 10.11.2017.
22. Mosaddeghi, S. A. Electromagnetic Environment Associated with Lightning Strikes to Tall Strike Objects [Text]: PhD thesis / S. A. Mosaddeghi. – Lausanne, Switzerland, 2011. – 152 p.
23. Lin, Y. T. Characterization of lightning return stroke electric and magnetic fields from simultaneous two-station measurements [Text] / Y. T. Lin, M. A. Uman, J. A. Tiller, R. D. Brantley, W. H. Beasley, E. P. Krider, C. D. Weidman // Journal of Geophysical Research. – 1979. – Vol. 84, No. C10. – P. 6307–6314. doi:[10.1029/jc084ic10p06307](https://doi.org/10.1029/jc084ic10p06307)
24. Kravchenko, V. I. Grozozashchita radioelektronnyh sredstv [Text]: Handbook / V. I. Kravchenko. – Moscow: Radio i sviaz', 1991. – 264 p.
25. MOD-1016 HWv8 [Electronic resource] // Embedded Adventures. – September 8, 2015. – Available at: \www/URL: https://www.embeddedadventures.com/datasheets/MOD-1016_hw_v8_doc_v4.pdf. – 10.11.2017.
26. Wiacek, M. Advanced Optical Image Processing Analysis of Tall Structure Lightning Events by Digital High Frame Rate Optical Images System and Spectroscopy [Text] / M. Wiacek, Y. Uchida, J. S. Chang, W. Janischewskyj, A. M. Hussein, V. Shostak, T. Sakuta // Proceedings XIV International Conference on Gas Discharges and their Applications. – Liverpool, UK, 2002. – Vol. 2. – P. 296–300.
27. Quick, M. G. Optical power and energy radiated by natural lightning [Text] / M. G. Quick, E. P. Krider // Journal of Geophysical Research: Atmospheres. – 2013. – Vol. 118, No. 4. – P. 1868–1879. doi:[10.1002/jgrd.50182](https://doi.org/10.1002/jgrd.50182)
28. Quick, M. G. Optical emission and peak electromagnetic power radiated by return strokes in rocket-triggered lightning [Text] / M. G. Quick, E. P. Krider // 2014 International Conference on Lightning Protection (ICLP). – Shanghai, 2014. – P. 2011–2015. doi:[10.1109/iclp.2014.6973459](https://doi.org/10.1109/iclp.2014.6973459)
29. Holmes, C. R. On the power spectrum and mechanism of thunder [Text] / C. R. Holmes, M. Brook, P. Krehbiel, R. McCrory // Journal of Geophysical Research. – 1971. – Vol. 76, No. 9. – P. 2106–2115. doi:[10.1029/jc076i009p02106](https://doi.org/10.1029/jc076i009p02106)