



НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»

Міністерство освіти і науки України

ВИКОРИСТАННЯ БЕЗПЛОТНИКІВ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ БЕЗПЕКИ ТА ЕФЕКТИВНОСТІ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ СИСТЕМИ УКРАЇНИ

1. **РЕЗИНКІНА Марина Михайлівна** – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»;
2. **ШЕВЧЕНКО Сергій Юрійович** – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»;
3. **СЕНДЕРОВИЧ Геннадій Аркадійович** – доктор технічних наук, професор Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»;
4. **ГРАБКО Володимир Віталійович** – доктор технічних наук, професор, ректор Вінницького національного технічного університету;
5. **КАРПАЛЮК Ігор Тимофійович** – кандидат технічних наук, доцент Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»;
6. **ЗАПОРОЖЕЦЬ Артур Олександрович** – кандидат технічних наук, старший дослідник, старший науковий співробітник інституту технічної теплофізики НАН України;
7. **СКОПЕНКО Василь Вікторович** – кандидат технічних наук, в.о. генерального директора АТ "Харківобленерго";

Реферат

Харків – 2020

ВСТУП

Збереження безпеки та енергоефективності функціонування об'єднаної енергетичної системи (ОЕС) України при мінімальних енерговитратах є одним з найважливіших умов забезпечення енергонезалежності країни. Будь-які відмови і збої при роботі систем передачі електроенергії від виробника до споживача призводять до значних втрат електроенергії. Звідси слідує необхідність якнайшвидшого відновлення працездатності елементів ОЕС після аварій. При цьому особливе значення має моніторинг стану систем передачі електроенергії від виробника до споживача. Такий моніторинг спрямований на запобігання відключень ліній електропередачі (ЛЕП) і аварій на високовольтних підстанціях, гідро, тепло і атомних електростанціях (ГЕС, ТЕС і АЕС), а також на швидке відновлення їх працездатності. Найбільш перспективним сучасним методом діагностики стану об'єктів енергетики, який вимагає значно менших енерговитрат у порівнянні з існуючими, а також дозволяє мінімізувати терміни відновлення працездатності елементів ОЕС після аварій, є моніторинг із застосуванням безпілотних літальних апаратів (БПЛА) – безпілотників. При цьому контроль стану досліджуваних об'єктів шляхом їх оптичної реєстрації, реєстрації за допомогою тепловізорів, засобів вимірювання акустичних сигналів, а також реєстрації часткових розрядів, що мають місце в ізоляції, проводиться в автоматичному режимі без залучення дорогої в обслуговуванні льотної техніки (гвинтокрили).

Енергоефективність ОЕС України істотно залежить від оперативної передачі інформації про розподіл величин напружень вздовж ЛЕП і характер метеоумов. Використання БПЛА для контролю і фіксації цих параметрів по довжині ліній електропередачі дозволяє знизити втрати при передачі електроенергії за рахунок регулювання напруги окремих ділянок електричних мереж. Крім того, наявність таких даних, отриманих в режимі реального часу, дозволяє істотно підвищити точність короткострокового прогнозування режиму їх роботи і поліпшити диспетчерське управління енергосистемою в цілому при розрахунках режимів мереж. Таким чином, розробка комплексу методів підвищення безпеки функціонування та енергоефективності ОЕС України з застосуванням безпілотників представляє **актуальну науково-технічну задачу**.

Оперативний контроль стану ЛЕП, а також високовольтних підстанцій, ГЕС, ТЕС і АЕС є невід'ємною частиною системи забезпечення надійності енергопостачання та усунення причин аварійних відключень. Управління рухом БПЛА при моніторингу безпеки об'єктів енергетичної системи може бути зроблено за допомогою GPS та шляхом вимірювання напруженості електричного (ЕП) або магнітного (МП) поля. Аналіз даних параметрів з застосуванням розроблених математичних моделей використовується також для оптимізації режимів роботи і структури досліджуваних енергетичних об'єктів.

Найбільш поширеними ушкодженнями ліній електропередачі є обриви проводів, в тому числі внаслідок їх обмерзання, перехрещення, пробоїв ізоляторів та ін., що призводить до коротких замикань (КЗ) на ЛЕП. Для швидкого усунення виниклої аварії необхідно точне визначення місця пошкодження. Приблизне розташування і тип КЗ визначаються за допомогою розроблених апаратних засобів

і алгоритмів. Потім ця інформація вводиться в систему управління БПЛА, за допомогою якого визначається точне місце пошкодження з оптимізацією шляху проходження оперативної виїзної ремонтної бригади служби лінії. З огляду на те, що доступ до ЛЕП для визначення місця пошкодження в ряді випадків ускладнений і є трудомістким та тривалим процесом, алгоритм пошуку місця пошкодження з застосуванням БПЛА виявляється вельми ефективним.

На практиці дуже складно або взагалі неможливо виміряти параметри електромагнітних полів всередині та на гострих крайках різних технічних пристроїв, в тому числі БПЛА, особливо в аварійних режимах. Для вирішення даної проблеми розроблені та програмно реалізовані методи математичного моделювання тривимірних електромагнітних полів в неоднорідних середовищах. Такі моделі зокрема дозволяють отримати еталонні значення розподілів електромагнітних полів, які можна порівнювати з вимірюваними БПЛА.

При моніторингу ліній електропередачі виникає необхідність з'ясування місць розташування коронного розряду, який є джерелом вищих гармонік. Окрім аналізу електричних полів, виявлення наявності коронного розряду та його розташування проводиться за допомогою акустичного методу. Цей метод дозволяє виявляти коронний розряд за спектральними акустичними характеристиками. На ці характеристики впливають вищі гармоніки коронного розряду, які мають позитивний зворотній зв'язок з вищими гармоніками мережі. Цей метод використовується дистанційно, то ж він є придатним для застосування при діагностиці з застосуванням БПЛА.

Однією з важливих систем, які забезпечують безпечну роботу енергетичних об'єктів, є система блискавкозахисту. За допомогою розроблених методів статистичного моделювання електрофізичних процесів при просуванні лідерного каналу блискавки до землі і заснованому на них програмному забезпеченні розраховуються розподіли ймовірності попадання блискавок на територію енергетичних об'єктів (високовольтних підстанцій, ГЕС, ТЕС і АЕС) і даються рекомендації по доукомплектуванню та модернізації існуючої системи блискавкозахисту. Використання БПЛА дозволяє оперативне контролювати стан систем блискавкозахисту після кожної грози.

Метою даної роботи є створення комплексу методів і засобів з їх реалізації з використанням безпілотників, спрямованих на підвищення безпеки функціонування об'єднаної енергетичної системи України, а також на підвищення її енергоефективності.

НАУКОВО-ТЕХНІЧНІ РЕЗУЛЬТАТИ РОБОТИ

Для досягнення мети роботи по створенню засобів з використанням безпілотників щодо безпеки та енергоефективності функціонування ОЕС в штатних та аварійних режимах роботи авторами **вирішені актуальні науково-технічні проблеми:**

– розвинуті теоретичні основи моделювання електричних процесів, що відбуваються на лініях електропередачі в аварійних режимах обриву або пошкодження проводів, а також апаратні засоби, спрямовані на оперативне визначення місця і характеру пошкодження ЛЕП за допомогою БПЛА;

– розвинуті теоретичні основи математичного моделювання електричних полів ліній електропередачі з урахуванням наявності опор ЛЕП, БПЛА, інших об'єктів і програмні засоби з їх реалізації для забезпечення електромагнітної сумісності БПЛА та їх обладнання з електричним полем ЛЕП, а також додаткової навігації БПЛА по електричному полю ЛЕП;

– удосконалені методи розрахунку електричного поля з використанням так званих одновісне добре узгоджених шарів (ОДУШ) для визначення його напруженості на гострих крайках електротехнічного обладнання. Ці методи використані для визначення критерія початку коронування і залежності інтенсивності цього процесу від об'єму зон, у яких напруженість електричного поля перевищує критичний рівень пробою - 30 кВ/см;

– розвинуті теоретичні основи моделювання коронного розряду по акустичному випромінюванню, що його супроводжує, та отримано експериментальне підтвердження зв'язку коронного розряду з якісними показниками мережі, зокрема вищими гармоніками;

– розроблені теоретичні основи і програмне забезпечення з вибору засобів блискавкозахисту з підвищеною надійністю, а також контролю їх цілісності за допомогою БПЛА. Вибір таких параметрів здійснюється шляхом статистичного моделювання електрофізичних процесів, що відбуваються на електроенергетичних об'єктах при ударі блискавки з урахуванням висоти і габаритів об'єктів, що захищаються, та блискавководводів, посилення напруженості електричного поля на їх гострих крайках, можливості розвитку від них зустрічних лідерів, ймовірності появи блискавок з різними потенціалами, всі напрямки удару блискавок та їх вірогідні потенціали;

Основні наукові результати роботи полягають в наступному.

Удосконалено алгоритм комплексного автоматизованого моніторингу об'єктів енергетичної системи України з залученням БПЛА, спрямований на підтримку її безпечного та ефективного функціонування. При цьому контроль стану енергетичних об'єктів може проводитися в небезпечних і важкодоступних місцях, а час отримання первинної інформації істотно скорочується. На рис. 1, 2 показані результати зйомки ЛЕП 330 кВ з БПЛА.

Для визначення точного місця аварії на ЛЕП за допомогою БПЛА розроблені математичні моделі та отримані аналітичні вирази, на базі яких створено програмно-апаратний комплекс по ідентифікації і контролю поточних параметрів, а також режимів електричної мережі. На розробленому аналізаторі режимів електричної мережі АНТЕС АР-3Ф отримана повна осцилограма аварійного відключення ВЛ "Л-СІМ".

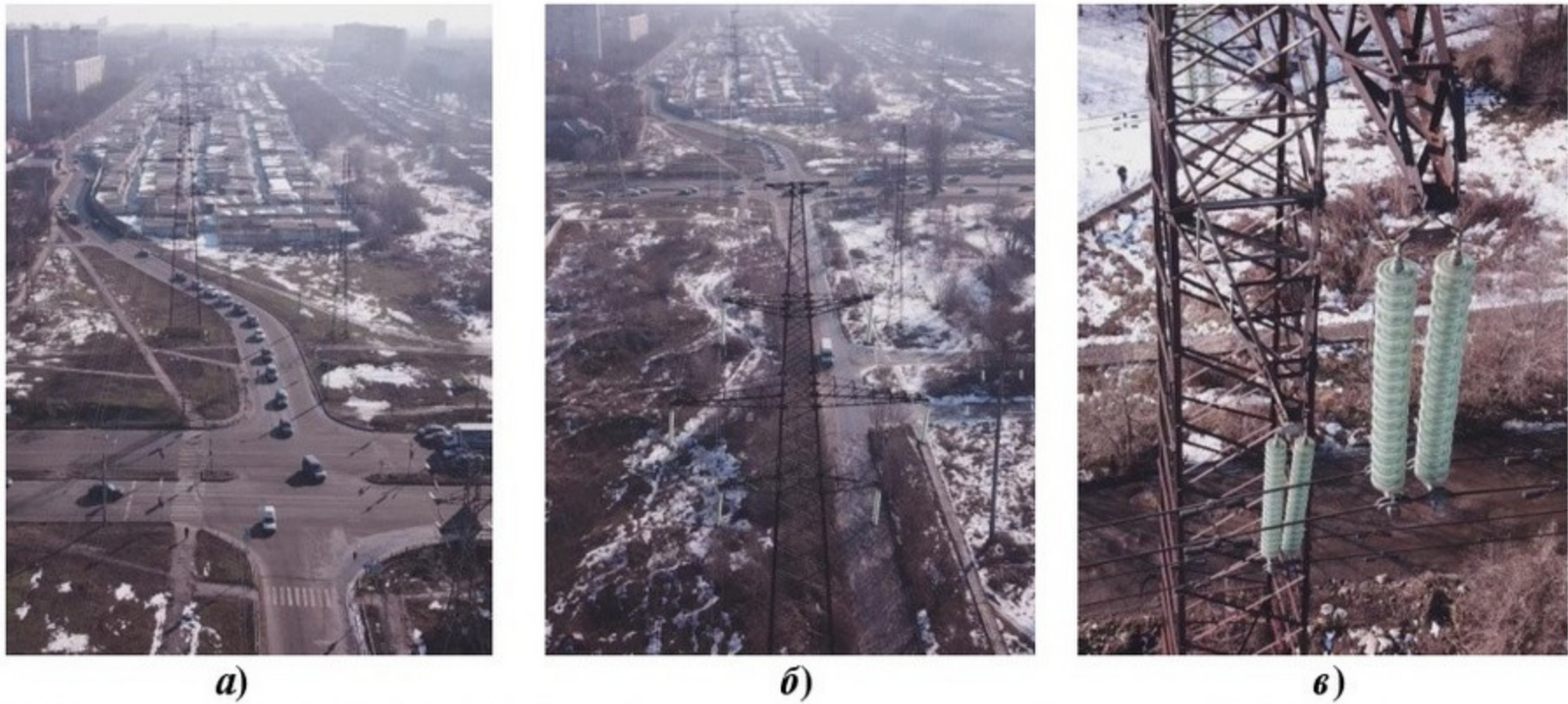


Рис. 1. Зйомка ЛЕП 330 кВ з БПЛА: *а)* загальний вигляд; *б)* опора ЛЕП; *в)* ізолятори ЛЕП.



Рис. 2. Зйомка електрообладнання підстанції 110 кВ в інфрачервоному спектрі: *а)* вимикачі високовольтні 110 кВ; *б)* роз'єднувач

Удосконалена і чисельне реалізована методика, призначена для розрахунку ЕП в околиці ЛЕП при наявності таких об'єктів, як БПЛА та опори ЛЕП. Це програмне забезпечення необхідно для забезпечення електромагнітної сумісності апаратури БПЛА з ЕП ЛЕП, а також додаткової навігації БПЛА - базового елементу розробленої системи моніторингу та для оцінки електричних параметрів досліджуваних енергетичних об'єктів. На рис. 3 наведені розраховані розподіли ліній рівного потенціалу (в Вольтах) в околі ЛЕП 200 кВ при наявності опори (*а)* та БПЛА (*б)*).

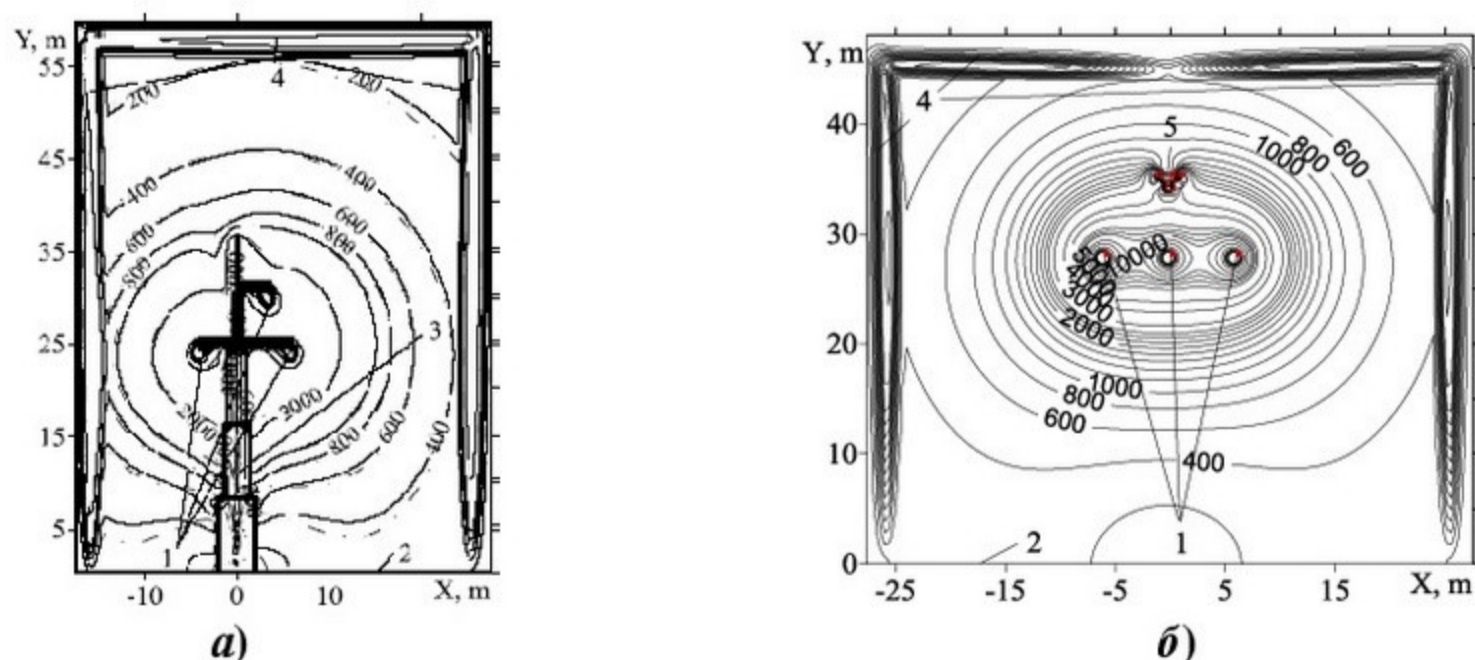


Рис. 3. Розраховані розподіли ліній рівного потенціалу (в Вольтах) в околі ЛЕП 200 кВ при наявності опори (*а)* та БПЛА (*б*). 1 – дроти ЛЕП, 2 – земля, 3 – опора ЛЕП, 4 – ОДУШ, 5 – БПЛА.

Шляхом фізичного та математичного моделювання досліджені електрофізичні процеси розвитку коронних розрядів в електроенергетичних об'єктах, параметри яких визначаються за допомогою БПЛА. Для визначення втрат на корону, в тому числі з використанням БПЛА, удосконалено метод оцінки величини струму корони за знайденим шляхом розрахунків електричного поля об'ємом зон, в яких рівні напруженості ЕП перевищують або дорівнюють напруженості початку процесів пробую (30 кВ/см). Отримано співвідношення між висотою і радіусами заокруглення гострих кромek електроенергетичних об'єктів, дотримання яких забезпечують відсутність коронування. На рис. 5 показані результати математичного моделювання розподілів потенціалу (у Вольтах) в околі провідних стрижнів з вершиною у виді конусу (а), та сфери різного радіусу (б, в).

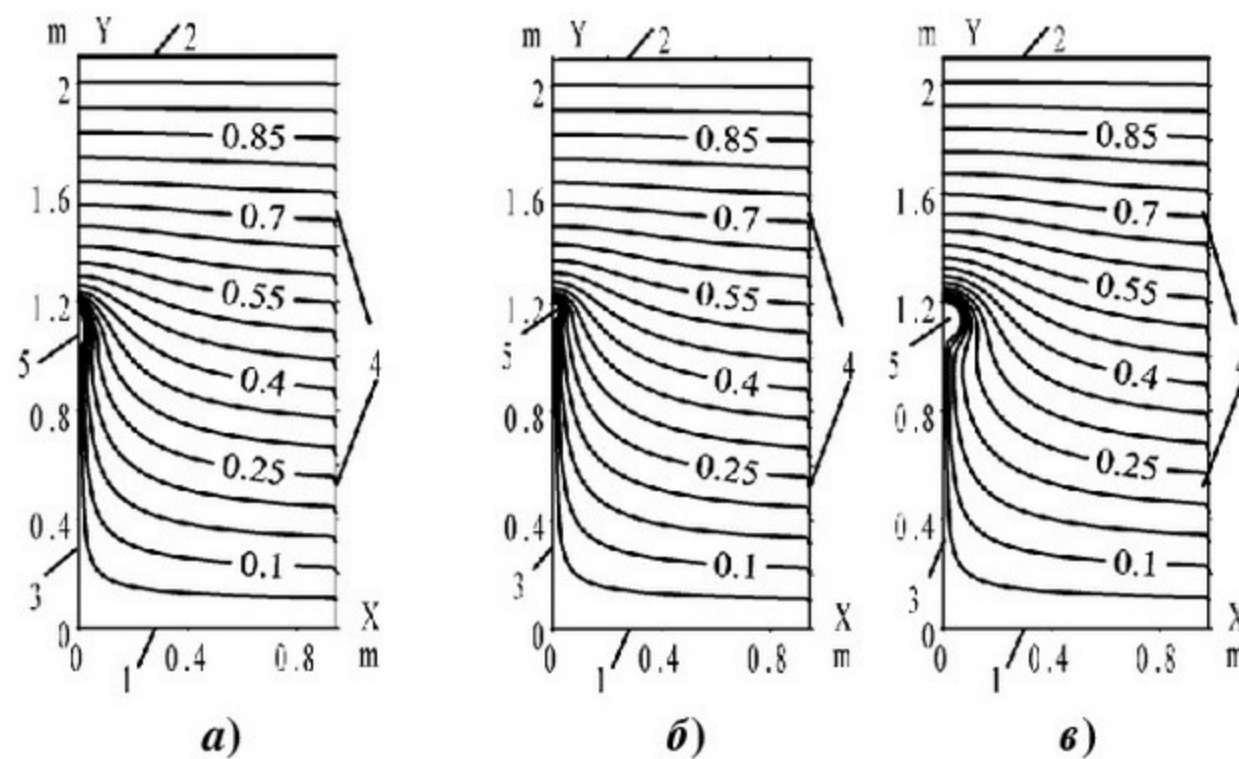


Рис.4. Розраховані розподіли потенціалу (у Вольтах) в околі провідних стрижнів з вершиною у виді конусу (а), та сфери різного радіусу (б, в).

На рис. 6 показані результати математичного та фізичного моделювання залежності струму корони (I_{cor}) від значення максимальної напруженості ЕП на вершинах заземлених стрижнів (E_{max}) для різних радіусів кривизни (R) їх вершин.

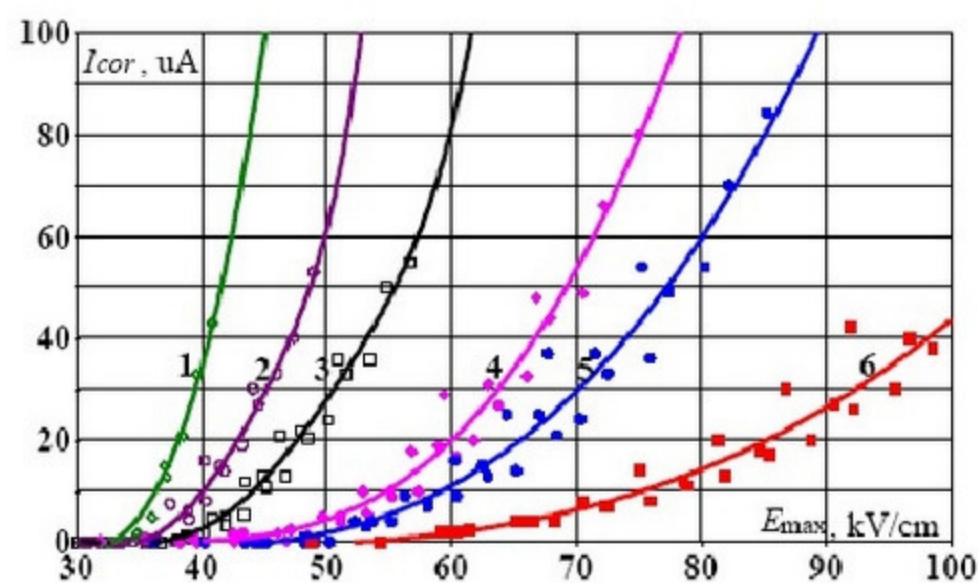


Рис. 5. Залежності струму корони від максимальної напруженості ЕП на вершинах заземлених стрижнів для різних R - 1 – $R=0,019$ м; 2 – $R=0,015$ м; 3 – $R= 0,0125$ м; 4 – $R= 0,009$ м; 5 – $R= 0,00775$ м; 6 – $R= 0,0055$ м.

Для з'ясування джерела втрат, спричинених коронним розрядом, було розроблено метод спектрально акустичної діагностики наявності коронного розряду. Експериментальні дані щодо наявності гармонійних складових в

коронному розряді, отримані при пошуку джерела акустичного випромінення, підтвердили теоретичні прогнози щодо акустичних шумів, створюваних коронним розрядом, які мають спектральні складові відповідно до гармонік струму промислової частоти. Таким чином було створено метод визначення наявності коронного розряду на електроенергетичному обладнанні за акустичними коливаннями. На рис. 7 показані результати розкладання акустичного сигналу від коронного розряду у спектр за методом швидкого перетворення Фур'є.

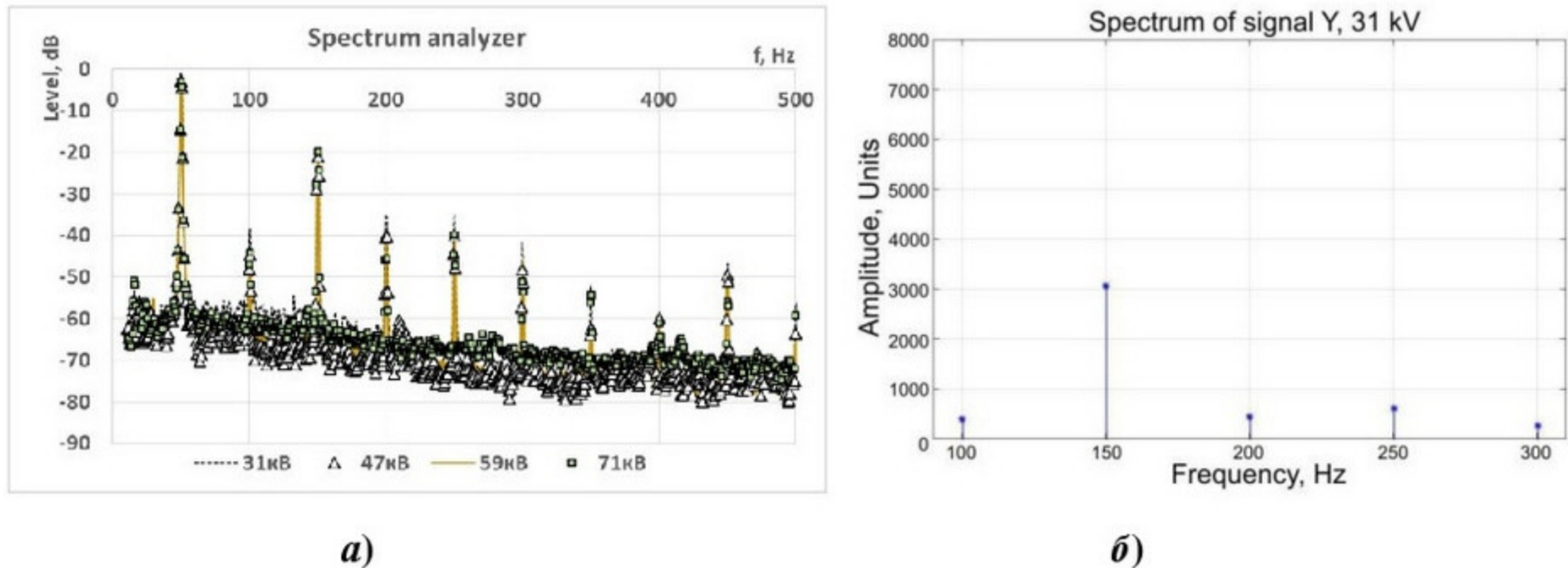


Рис. 6. Результати розкладання акустичного сигналу від коронного розряду у спектр за методом швидкого перетворення Фур'є. *a)* – спектр акустичного сигналу у діапазоні частот 0 - 500 Гц від коронного розряду на напругах 31, 47, 59, 71 кВ; *б)* – стеблова гістограма зображення частотного спектру, притаманного коронного розряду.

Також цей метод дозволяє локалізувати розташування коронного розряду за інтерференційним акустичним полем. На рис. 8 показані криві сили звуку (у відсотках до максимального значення) від корони на ізоляторі (*a*) і на проводі (*б*).

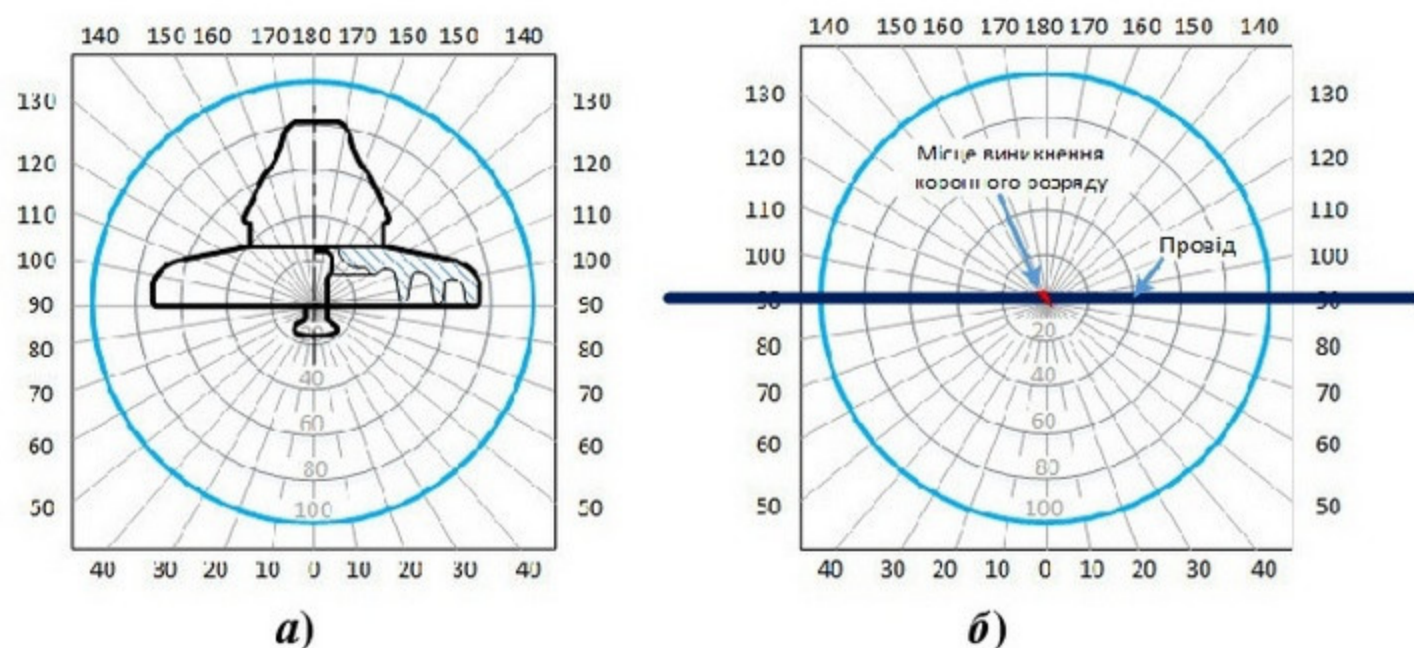


Рис. 7. Криві сили звуку від корони на ізоляторі (*a*) і на проводі (*б*).

В результаті фізичного та математичного моделювання вдосконалена статистична модель електрофізичних процесів на фінальній стадії наближення лідерного каналу блискавки до землі, яка дозволяє знайти розподіли прогнозованої кількості ударів блискавки у протяжні електроенергетичні об'єкти (такі, як високовольтні підстанції, ТЕС, ГЕС, АЕС) з урахуванням їх висоти і габаритів, можливості розвитку від них висхідної іскри, усіх місць появи лідерного каналу блискавки з грозової хмари та розподілу вірогідності їх потенціалів. На рис. 9 показані схема високовольтного стенду (*a*), фотографія високовольтного залу НТУ

«ХПІ» (б), типові осцилограми при розрядах на заземлений стрижневий електрод, який імітує блискавковідвід (в, з), фотографії високовольтних розрядів при проведенні фізичного моделювання (д, е, ж).

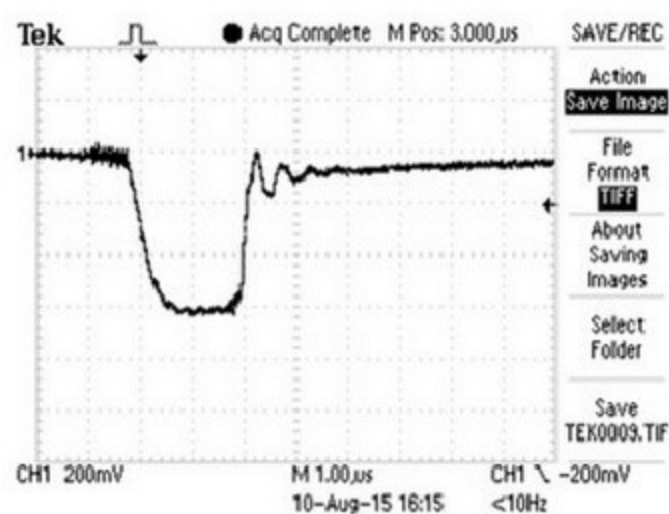
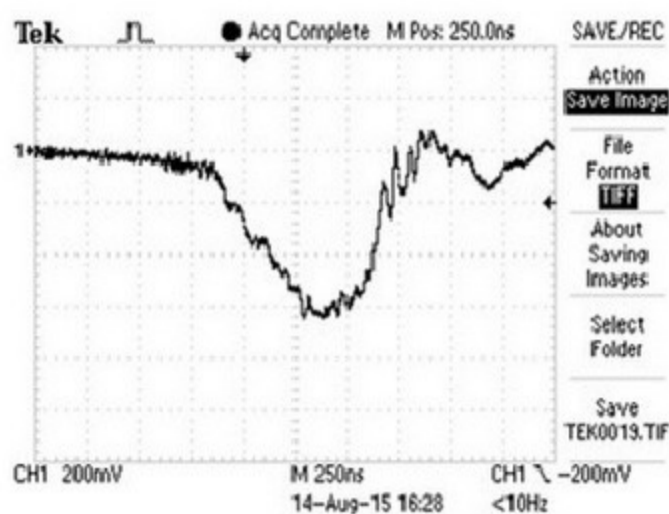
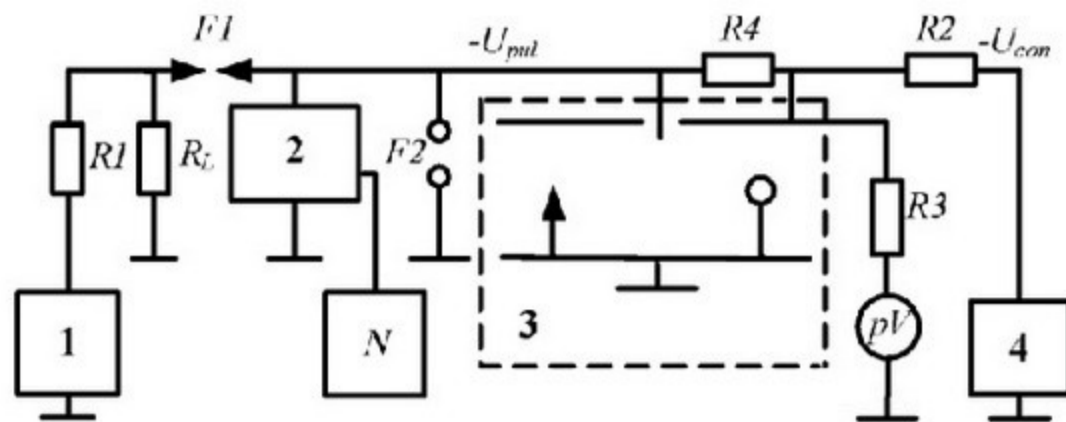


Рис. 9. Експериментальні дослідження в високовольтному залі НТУ «ХПІ» процесів, що імітують удари блискавки.

На рис. 10 показаний план високовольтної підстанції (а) та розраховані за допомогою розробленої статистичної моделі розподіли щільності ймовірності попадання блискавок з низьким (б) і високим (в) потенціалом по території підстанції.

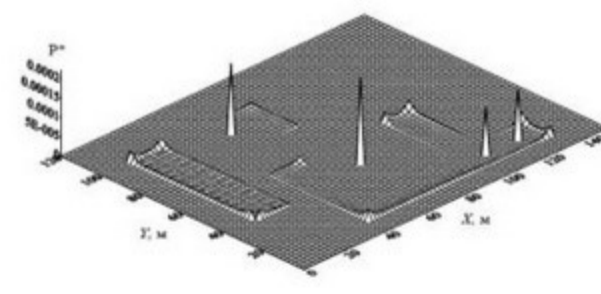
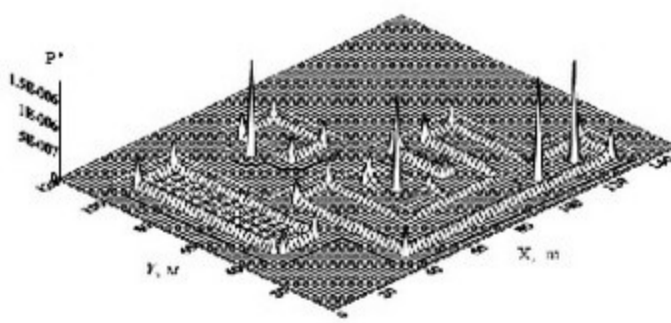
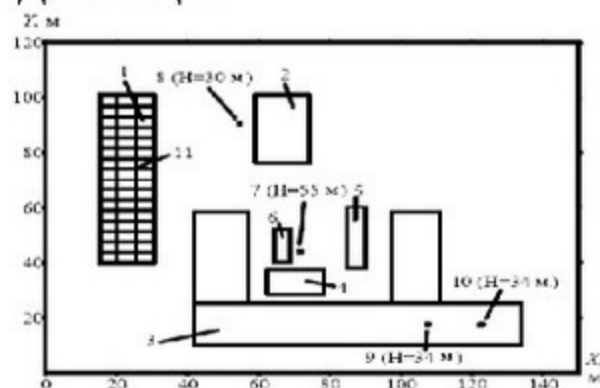


Рис. 10. План високовольтної підстанції (а), розраховані розподіли щільності ймовірності попадання блискавок з низьким (б) і високим (в) потенціалом.

ПРАКТИЧНЕ ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ РОБОТИ

1 Запропонований метод комплексного автоматизованого моніторингу об'єктів енергетичної системи України з залучення БПЛА дозволяє забезпечити її безпечне та ефективне функціонування.

2 Розроблено блок автоматизації розрахунків щодо визначення місця пошкодження ЛЕП на базі БПЛА. Блок забезпечив автоматичний вибір інтервалу аналізу параметрів аварійного режиму, дозволив визначити види КЗ, особливу фазу, дозволив виділити пошкоджену фазу та приблизне місце КЗ. Точне місце КЗ або пошкодження визначається за допомогою БПЛА.

3 Розроблена, чисельно реалізована та протестована методика, призначена для розрахунку ЕП навколо ЛЕП щодо безпечної навігації БПЛА - основного елемента запропонованої системи моніторингу.

4 Розроблено блок автоматизації розрахунків щодо визначення місця пошкодження ЛЕП на базі БПЛА. Блок забезпечив автоматичний вибір інтервалу аналізу параметрів аварійного режиму, дозволив визначити види КЗ, особливу фазу, дозволив виділити пошкоджену фазу та приблизне місце КЗ. Точне місце КЗ або пошкодження визначається за допомогою БПЛА.

5 На базі розробленої моделі розрахунку електричних полів у неоднорідних середовищах запропоновані ефективні наукові підходи і програмні засоби для чисельного розрахунку розподілу напруженості електричного поля навколо і всередині неоднорідних включень, якими з електричної точки зору є БПЛА, з урахуванням їх реальної геометричної конфігурації та електричних параметрів. Це дозволило провести аналіз впливів електричних полів на системи керування БПЛА та визначати зони, які можуть бути небезпечними для його функціонування. Розрахунки показали, що зовнішнє низькочастотне електричне поле викривляється у присутності БПЛА: рівні його напруженості можуть збільшуватися у 2-8 разів в залежності від умов впливу.

6 Розроблений метод розрахунку електричного поля для визначення напруженості електричного поля над верхівками струмопровідних стрижнів, які імітують гострі крайки елементів електроенергетичних об'єктів, блискавкоприймачі, канали високовольтних розрядів, тощо завдяки врахування нелінійного закону зміни напруженості електричного поля і зниження потенціалу в напрямках, перпендикулярних осі стрижня та над його верхівкою. Математичне моделювання утворення корони на вершинах заземлених електродів за допомогою даної моделі та проведені експериментальні дослідження показали, що інтенсивність корони, яка характеризується її вимірним струмом, залежить від об'єму зон, у яких напруженість електричного поля перевищує критичний рівень проббою у слабо неоднорідних полях - 30 кВ/см.

7 Розроблено метод визначення наявності коронного розряду на елементах електричного обладнання по акустичному шуму, який він створює. За допомогою спектрального аналізу акустичних шумів коронного розряду визначені акустичні спектри, притаманні тільки даному процесу. Це дозволяє виділяти такі спектральні пакети на фоні шумів обладнання або квадрокоптера. За допомогою спектрально-

акустичного методу розраховані розподіли акустичних полів від коронного розряду для визначення розташування корони в просторі.





8 Експериментально досліджені порушення якості електричної енергії в електромережах внаслідок наявності коронного розряду. Проведені дослідження виявили вищі гармоніки напруги у всіх розглянутих системах електропостачання. Отримані результати дозволяють визначити коронні розряди за акустичним спектром з використанням БПЛА.

9 Розроблена статистична модель для визначення ймовірності удару блискавки в електроенергетичні об'єкти з урахуванням їх висоти і габаритів, а також можливості розвитку від них зустрічної іскри. Дана модель заснована на аналізі наявних даних про параметри блискавок, а також про електрофізичні процеси при пробі довших повітряних проміжків. Порівняння отриманих результатів з відомими експериментальними даними показало їх збіг в межах менш ніж 20%. Використання даної моделі для дослідження процесів, які супроводжують просування лідерного каналу блискавки на останньому етапі перед "вибором" місця удару заземленого об'єкта, дозволило визначити прогнозоване число ударів у блискавководводи та об'єкти, що захищаються, та оцінити ступінь впливу числа використовуваних блискавководводів. Контроль стану систем блискавкозахисту здійснюється за допомогою БПЛА.

10 Результати роботи використані в енергокомпаніях України. Результати роботи доповідались за фінансовою підтримкою НАТО у якості лекцій на тренувальних курсах з питань безпечного та надійного використання безпілотників у 2018 р. (SPS NATO Advanced Training Course G.5427) та 2019 р. (SPS NATO Advanced Training Course G.5613).

11 Впровадження заходів з використання контролю стану систем електропостачання за допомогою БПЛА дозволило отримати економічний ефект в енергетичних компаніях.

Таким чином, в результаті виконання представленої роботи вирішено стратегічно важливе завдання створення і впровадження методів підвищення безпеки та ефективності функціонування об'єднаної енергетичної системи України із застосуванням безпілотних літальних апаратів, які підвищують надійність, стійкість і ефективність її роботи.


РЕЗИНКИНА Марина

ШЕВЧЕНКО Сергій

СЕНДЕРОВИЧ Геннадій

ГРАБКО Володимир


КАРПАЛЮК Ігор

ЗАПОРОЖЕЦЬ Артур

СКОПЕНКО Василь