

**ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИКА,
ЛЕКТРОТЕХНІКА ТА ЕЛЕКТРОМЕХАНІКА**

УДК621.315.17

DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2024.10\(41\).1.68-79](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2024.10(41).1.68-79)**О.А. Козловський**, доц., канд. техн. наук*Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна
e-mail: kozlovskiyioa@gmail.com***С.Й. Рендзіняк**, проф., д-р техн. наук*Львівський національний університет імені Івана Франка, м. Львів, Україна
e-mail: serhii.y.rendziniak@edu.lpnu.ua***Обґрунтування діагностичних параметрів
комплексної системи дистанційного діагностування
повітряних ліній на базі БпЛА**

У статті представлено результати обґрунтування діагностичних параметрів для багатопараметрової системи дистанційного моніторингу повітряних ліній, яка базується на використанні безпілотного літального апарату. Більшість дефектів конструктивних елементів повітряних ліній проявляються у вигляді видимих механічних пошкоджень, тоді як їх решта – прихована. Виявлення таких дефектів можливе за допомогою дистанційних методів неруйнівного контролю. Використовуючи теорію інформації визначено, що для діагностування стану повітряної лінії 110 кВ найбільшу інформативність має група з семи параметрів, до складу якої входять візуальні сигнатури дефектів, температури провідників і контактних з'єднань, а також розрядна активність ізоляторів і струмопровідних частин. Запропонований підхід доцільно використовувати при проведенні техніко-економічного обґрунтування вибору обладнання для систем технічного діагностування ліній.

повітряна лінія, експлуатаційний дефект, безпілотний літальний апарат, БпЛА, теорія інформації, діагностування, діагностичний параметр

Постановка проблеми. Електричні мережі ОЕС України мають складну та розгалужену структуру. Повітряні лінії (ПЛ), що входять до їх складу, характеризуються значною протяжністю та суттєвим зносом. Наприклад, у системі передачі ОЕС термін служби понад 40-к років мають 41 % ПЛ 750 кВ, 72,4 % ПЛ 330 кВ і 87,7 % ПЛ 220 кВ [1]. Крім того, внаслідок кліматичних змін вони піддаються впливу підвищених механічних навантажень через зростання потужності небезпечних метеорологічних явищ, таких як шквали, льодяні дощі, тощо. Це призводить до зростання кількості ушкоджень і прискорення зносу конструктивних елементів ПЛ. Тому пріоритетним стає належне обслуговування ПЛ, оскільки зростає ризик виникнення значних збитків через можливі технологічні порушення в їх роботі.

Найбільш поширеною системою технічного обслуговування ПЛ є планово-запобіжний ремонт (ПЗР). Характерними рисами якого є недовикористання наявного ресурсу елементів ПЛ, що призводить до завищення загальної трудомісткості ремонтних робіт, а також обов'язкове проведення робіт з нормованою періодичністю, що часто буває передчасним або запізним, оскільки базується на усереднених, а не фактичних даних про технічний стан конкретної ПЛ. Крім того, ПЗР потребує утримання значного штату експлуатаційного персоналу. У сучасних умовах ця система виявляється не ефективною, оскільки ПЛ, особливо зі значним строком служби, потребують дедалі все більших обсягів технічного обслуговування та ремонтів. Всі ці

фактори, зумовлюють зростання витрат електропостачальних компаній на їх ремонти та технічне обслуговування. При цьому наявні обсяги відновлення повітряних ліній не покривають їх фактичного зносу внаслідок дефіциту коштів, що призводить до подальшого старіння мережі [2].

Одним із можливих шляхів подовження терміну експлуатації ПЛ, забезпечення надійності електропостачання та зменшення витрат на їх технічне обслуговування є впровадження в електричні мережі систем технічного обслуговування і ремонту за фактичним станом. Цей підхід передбачає нерегулярне проведення профілактичних і ремонтних робіт на основі інформації одержаної від системи технічного діагностування (СТД) ПЛ у режимі онлайн. До основних переваг такого підходу належать: наявність достовірної інформації про поточний стан елементів ПЛ; усунення можливості необгрунтованих утручань експлуатаційного персоналу в роботу ПЛ; обгрунтоване визначення необхідних термінів і об'ємів ремонтних робіт; подовження міжремонтного періоду та строку служби ПЛ.

Визначним етапом розвитку СТД ПЛ стала інтеграція до їх складу малих БпЛА [2-7]. Це технічне рішення значно розширило можливості діагностування, дозволивши проводити обстеження ліній електропередавання з більшою деталізацією, ефективністю та безпекою. Оснащення БпЛА цифровими камерами високої роздільної здатності дало змогу отримувати детальні зображення та дані про стан ПЛ на значних ділянках за короткий час, що призвело до суттєвої економії часу, людських і матеріальних ресурсів електропостачальних компаній. Використання БпЛА уможливило обстеження ПЛ під напругою у важкодоступних місцевостях, усунувши необхідність виконання небезпечних верхових робіт електротехнічним персоналом і перебування в безпосередній близькості до ПЛ.

Підхід з використанням БпЛА дозволив реалізувати головний принцип систем технічного обслуговування і ремонту за фактичним станом – забезпечення максимально можливого напрацювання обладнання при мінімальних експлуатаційних витратах. Проте, існуючі системи СТД ПЛ на базі БпЛА перебувають на початковій стадії розвитку та потребують удосконалення шляхом розширення їх функціональних можливостей та інтеграції з іншими методами та засобами діагностування. Зокрема, доцільно доповнювати існуючі системи на базі БпЛА засобами неруйнівного контролю та інтелектуальними системами аналізу даних для більш ретельної та всебічної діагностики стану ПЛ.

Отже, розробка систем технічного діагностування повітряних ліній на базі малих безпілотних літальних апаратів є актуальним науково-практичним завданням.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У праці [3] представлений огляд сучасних технологій діагностування ПЛ. Запропоновано концепцію проведення інтелектуальних інспекцій ПЛ за допомогою БпЛА з підтримкою технології LIDAR. Ефективність розробленої концепції було підтверджено на базі комерційної системи БпЛА. Відмічено, що використання мультисенсорних систем має переваги та дозволяє подолати обмеження окремих сенсорів і виявляти ширший спектр пошкоджень.

У дослідженні [4] представлено автономну систему діагностування забруднення ізоляторів ПЛ на базі квадрокоптера. Вона складається з двох частин – наземної станції керування (НСК) і спеціалізованого БпЛА. До складу НСК входять ноутбук і пульт керування. Ноутбук призначений для збору телеметричної інформації та обробки зображень із відеопотоку, що надходить з відеокамери дрону. Для проведення інспекції ПЛ складається польотне завдання за допомогою програмного забезпечення Mission Planner, де вказуються GPS-координати кожної електроопори ПЛ. Квадрокоптер здійснює інспекцію ПЛ в автоматичному режимі. Обробка отриманих зображень

ізоляторів здійснюється на ноутбучі за допомогою попередньо навченої згорткової нейронної мережі. Якщо ізолятор класифікується як чистий то БпЛА ніяких дій не виконує і переходить до діагностування наступного ізолятора. У протилежному випадку повідомляються GPS-координати цього ізолятора. Головною перевагою даної СТД низька вартість визначення рівня забруднення ізоляторів, а недоліками – обмежена автономність роботи та вузька спеціалізація.

Більш досконалою СТД поверхневого забруднення ізоляторів ПЛ є система, що складається з НСК та БпЛА обладнаного двома камерами та комп'ютером Raspberry Pi [5]. Пілот у ручному режимі керування відправляє БпЛА до першої контрольної точки польотного завдання, де вмикається автопілот і діагностування ізоляторів проводиться автономно, згідно з попередньо заданим планом. Зображення з камери №1 передаються до НСК для обробки. На основі зображень з камери №2 проводиться класифікація стану ізолятора в режимі реального часу за допомогою Raspberry Pi. Після виконання польотного завдання пілот переводить БпЛА в режим ручного керування та саджає його. Далі проводиться перевірка результатів класифікації стану ізоляторів на основі даних НСК. На відміну від відомих СТД поверхневого забруднення лінійної ізоляції, дана система може в режимі реального часу автоматично проводити оцінку стану ізоляторів. Тобто обробка зображень ізоляторів може проводитися як безпосередньо на самому БпЛА так і на НСК. Однак, реалізація обробки зображень на борту БпЛА має ряд технічних обмежень, що пов'язані з його вантажопідйомністю, ємністю акумулятора та обчислювальними можливостями мікрокомп'ютера.

У [6] розроблено багатоетапну інтелектуальну СТД ПЛ на основі БпЛА, яка дозволяє здійснювати автономне планування маршрутів перевірки, мобільну перевірку та інтелектуальну діагностику ушкоджень. На 1-му етапі основні дані (координати та розміри траверси) отримуються з хмарної бази даних електромережі, а бокове та вертикальне зміщення розраховуються під час роботи дрона. Траєкторія його польоту генерується незалежно, відповідно до типу інспекції. На 2-му етапі під час польоту БпЛА завантажує зроблені фотографії в хмару в режимі реального часу. Стабілізація польоту БпЛА виконується алгоритмом керування ковзним режимом на основі еталонної моделі. На 3-му етапі розробляється програма мобільних перевірок з метою підвищення їх ефективності. Головними перевагами запропонованої СТД є скорочений цикл перевірки та зменшені витрати на обстеження високовольтних ПЛ.

У праці [7] запропоновано структурну схему СТД на базі БпЛА на основі вибору мінімальної кількості параметрів системи діагностування ПЛ. Представлено приклади зразків комерційного обладнання на основі яких можливо реалізувати запропоновану СТД ПЛ.

Розглянуті СТД ПЛ є вузькоспеціалізованими, вони розроблені для контролю одного-, двох діагностичних параметрів ПЛ, які є критичними для мереж певного регіону. Наприклад, забруднення ізоляторів, наявності гнізд птахів на опорах, тощо. Тому, системи технічного діагностування повітряних ліній на базі безпілотних літальних апаратів потребують подальшого удосконалення.

Постановка завдання. Обґрунтування діагностичних параметрів для багатопараметрової системи дистанційного моніторингу повітряних ліній, що базуються на використанні безпілотних літальних апаратів.

Виклад основного матеріалу. Надійність електропостачання та безпека споживачів електроенергії в значній мірі залежать від стану ПЛ. Правила улаштування електроустановок [8] та Правила охорони електричних мереж [9] висувають ряд вимог до ПЛ, невиконання яких призводить до виникнення їх несправностей [10-12]. Типові

експлуатаційні дефекти ПЛ, які можливо зафіксувати за допомогою дистанційних методів неруйнівного контролю доцільно об'єднати в групи за місцем їх виникнення:

- траса ПЛ;
- стояки залізобетонних і металевих опор;
- траверси;
- проводи та грозозахисні троси;
- лінійна арматура;
- ізолятори.

Основними порушеннями траси ПЛ є:

- наявність у охоронній зоні складських майданчиків, пасовищ, звалищ, шпалер виноградників, зупинок громадського транспорту, тощо;
- недотримання нормативної ширини просік уздовж траси ПЛ;
- наявність на межах траси ПЛ окремих дерев, що загрожують падінням або розростанням на проводи;
- наявність під проводами ПЛ рослинності висотою більше 4 м;
- проведення на трасі будь-яких несанкціонованих робіт або дій, які порушують нормальну роботу ПЛ і сприяють можливості їх ушкодження;
- несправний стан або відсутність попереджувальних знаків, загороджувальних вогнів, відбійних тумб, габаритних воріт тощо.

Тривалий вплив нормативних навантажень і дія короточасних аварійних навантажень на залізобетонні опори в процесі експлуатації призводять до виникнення в них характерних дефектів [10-12]:

- тріщин, локального викришування бетону та оголення арматури в стояках;
- наднормативного відхилення опор від проектного положення;
- втрати деяких конструктивних елементів опор, в т. ч. і кріпильних;
- послаблення та ушкодження відтяжок опор і їх кріплень, талрепів;
- корозії металевих елементів опор;
- відсутності спеціальних позначок, номерів і вказівників;
- наявність на опорах сторонніх предметів;
- відсутності або ушкоджень захистів основи опор від льодоходів.

Корозія є одним із найбільш розповсюджених ушкоджень металевих елементів ПЛ – траверс, тросостояків, з'єднань з/б опор. Металеві кріплення гірлянд ізоляторів мають прискорений знос при галопуванні проводів та їх обривах.

Крім атмосферних чинників, до механічних ушкоджень опор ПЛ також призводять наїзди на них транспортних засобів та сільськогосподарських машин.

Основні експлуатаційні дефекти металевих опор охоплюють:

- атмосферну корозію, ушкодження захисних покриттів металу;
- послаблення болтових і клепаних з'єднань, перекіс гвинтів і заклепок;
- деформацію конструктивних елементів опор;
- дефекти зварних швів;
- наявність сторонніх предметів.

Важливо підкреслити, що найбільш схильними до корозії є горизонтальні елементи металевих опор, зокрема місця їх з'єднань, де атмосферна волога може накопичуватися та зберігатися тривалий час.

Типовими дефектами проводів та грозозахисних тросів, що виникають під час експлуатації ПЛ, є наступні [10-12]:

- опіки, оплавлення, обрив і перегорання окремих дротин верхнього повиву;
- спучування та перекручування дротин;
- перетирання на вході (виході) в затискач;

- витягування проводу зі з'єднувача;
- ушкодження кріплень проводу до штирових ізоляторів;
- природний знос внаслідок атмосферної корозії;
- накиди на провід;
- розрегулювання проводів.

У цілому, ушкодження проводів та грозозахисних тросів є причиною до 56% від всіх аварійних відключень ПЛ [2].

Дефекти лінійної ізоляції можуть мати електричну та механічну природу. До електричних дефектів відносяться такі [10, 11]:

- неорганічні та органічні забруднення ізоляторів;
- тріщини глазури ізоляторів, руйнування фарфору (скла), сліди плавлення на арматурі ізоляторів та на арматурі гірлянд;
- сколи та тріщини фарфору (скла) тарілок ізоляторів;
- наявність «нульових» ізоляторів;
- зігнуті штирі кріплення ізоляторів, виповзання штирів із шапки ізолятора, тріщини в чавунній шапці ізолятора;
- частковий вихід стовпчика з гнізда ізолятора, випадіння шплінтів;
- наднормативне відхилення гірлянд ізоляторів від проектного положення.

Найбільш поширеними експлуатаційними дефектами лінійної арматури є наступні [10, 11]:

- атмосферна корозія, каверни на корпусах;
- тріщини на корпусах штирів і гаків, затискачів, з'єднувачів;
- ослаблення болтових та шплінтових з'єднань, відсутність кріпильних елементів;
- перетирання або деформація окремих елементів арматури;
- зміщення або відсутність гасників вібрації;
- сліди перегріву з'єднувачів;
- наближення петель проводу до опор, значна їх деформація;
- пошкодження захисних рогів і кілець, координуючих проміжків;
- розгинання штирів і гаків, кріплень штирових ізоляторів.

Особливість дефектів лінійної арматури полягає в тому, що вони не проявляються за нормальних умов експлуатації, однак під час складних метеорологічних умов можуть призвести до серйозних аварій.

Отже, проведений аналіз експлуатаційних дефектів конструктивних елементів ПЛ показує, що вони проявляються, у першу чергу, у вигляді різноманітних тріщин, сколів, надломів, обривів, втрати кріпильних елементів, корозійної діяльності, а тому можуть бути ідентифіковані за допомогою оптико-візуального методу неруйнівного контролю. Для виявлення прихованих дефектів, таких як ослаблені контактні з'єднання проводів, «нульові» ізолятори слід застосовувати тепловий метод [13]. Найбільш складним є виявлення дефектів лінійної ізоляції на початковій та середній стадії розвитку. У цьому випадку застосовується метод оптичної УФ-дефектоскопії [14]. Головна перевага цього методу полягає в можливості точного визначення місця розташування коронного розряду на ізоляторі на значній відстані. Через високу вартість технічних засобів УФ-дефектоскопії був розроблений спектрально-акустичний метод виявлення дефектів ізоляції. Який полягає у фіксації акустичних коливань, що виникають внаслідок розширення повітря під час стримерних пробів, коливання об'єму повітря та протікання хімічних реакцій при горінні коронного розряду [15].

Для виявлення порушень траси ПЛ, розрегулювання проводів, відхилення стоек опор вище нормативних значень доцільно використовувати повітряне лазерне

сканування на базі БпЛА [3]. Технологія LIDAR (Light Detection and Ranging) відносно за короткий час дозволяє отримати детальну інформацію про тривимірну структуру елементів ПЛ та їх навколишній рельєф, включаючи рослинність. Обробка отриманої хмари точок за допомогою спеціального програмного забезпечення дає точну інформації про технічний стан ПЛ, а також дозволяє провести моделювання її стану траси в різних погодних умовах. Застосування повітряного лазерного сканування на базі БпЛА довело значну його цінність у багатьох інспекційних завданнях.

Таким чином, значна кількість різновидів ушкоджень ПЛ вимагає одночасного застосування кількох методів дистанційного контролю, що призводить до потреби моніторингу великої кількості діагностичних параметрів. Чим більше з них контролюється під час експлуатації, тим точнішим і достовірнішим буде отриманий діагноз, і тим більшою виявиться повнота його охоплення. Проте, контроль багатьох діагностичних параметрів призводить до значного підвищення складності та вартості СТД ПЛ. Таким чином, у кожному конкретному випадку постає завдання вибору мінімально достатньої кількості діагностичних параметрів для забезпечення ефективного функціонування цих систем [1, 2]. Отже, при розробці СТД ПЛ питання вибору параметрів діагностування є одним з ключових.

Найбільш простою формою запису явної моделі діагнозу ПЛ є таблиця функціональних несправностей [16, 17]. У ній кожній i -й відмові елемента відповідає несправний стан s_i із множини S ($s_i \in S$), і навпаки. Стан s_i визначається за допомогою j -го елементарного тесту (параметра) π_j із множини всіх допустимих елементарних тестів Π . Таким чином, таблиця представляє собою набір стовпців – станів s_i та рядків – елементарних тестів (параметрів) π_j елементів ПЛ на перетинах яких отримуються результати R_j^i елементарних тестів ПЛ. При цьому, множина Π повинна володіти властивістю виявлення несправностей із множини S (для $s_i \in S$ існує хоча б одне значення $\pi_j \in \Pi$, при цьому $R_j^i \neq R_j^k$) і властивістю розрізнення всіх несправностей із множини S (для $s_i, s_k \in S$, $i \neq k$ існує хоча б одне значення $\pi_j \in \Pi$, при цьому $R_j^i \neq R_j^k$), де R_j^i, R_j^k – результати елементарних тестів, відповідно, справного та несправного елементів повітряної лінії.

Вибір діагностичних параметрів починається з виключення явно нераціональних із попередньо вибраних. Далі формується мінімально необхідна та достатня група з параметрів, що забезпечують найбільшу інформативну цінність, яка дозволяє визначити стан елементів ПЛ за скінченного числа елементарних тестів. Для визначення мінімальної кількості діагностичних параметрів розроблено ряд критеріїв (наприклад, забезпечення необхідної безвідмовності, інформативний та ін.) на основі аналізу причинно-наслідкових зв'язків між параметрами та дефектами ПЛ. У випадку відсутності фактичних даних про надійність елементів ПЛ вибір діагностичних параметрів можливо виконати за їх середньою інформативністю, що характеризує величину зменшення ентропії ПЛ [16, 17]:

$$I_{\Pi_i} = H(S) - H(S|\pi_j), \quad (1)$$

де $H(S)$ – початкова невизначеність про стан ПЛ до проведення діагностування:

$$H(S) = -\sum_{i=1}^N P_i \cdot \log_2 P_i, \quad (2)$$

P_i – ймовірність того, що ПЛ знаходиться в i -му стані;

N – кількість можливих станів ПЛ.

Залишкова невизначеність ділянки повітряної лінії після того, як стали відомими всі реалізації вектора тестів π_j із множини Π :

$$H(S|\pi_j) = \sum_k P(\pi_j = k) H(S|\pi_j = k), \quad (3)$$

Де K – множина всіх можливих результатів k_j тестів π_j ;

$P(\pi_j = k)$ – ймовірність того, що результат елементарного тесту ПЛ дорівнює k_j ;

$H(S|\pi_j = k)$ – умовна ентропія, коли результат тесту дорівнює k_j .

Якщо розглядати лише ті ушкодження елементів ПЛ, що мають однакову ймовірність відмов, тобто $P_1 = P_2 = \dots = P_i = 1/N$, де N – кількість рівноймовірних станів, рівняння (2) дещо спроститься:

$$H(S) = \log_2 N. \quad (4)$$

Тоді (3) можливо записати наступним чином:

$$H(S|\pi_j) = \frac{n}{N} \log_2 n + \frac{m}{N} \log_2 m, \quad (5)$$

де n, m – число, відповідно, одиниць і нулів у результаті параметру π_j .

Підставивши (4) і (5) у (1) отримаємо інформативність, що характеризує залишкову ентропію після проведення N елементарних тестів

$$I_{\Pi_i} = \log_2 N - \left[\frac{n}{N} \log_2 n + \frac{m}{N} \log_2 m \right]. \quad (6)$$

Процес визначення діагностичних параметрів за допомогою інформативного критерію включає кілька етапів. На 1-му етапі розраховується залишкова ентропія ПЛ після проведення кожного елементарного тесту. На 2-му етапі аналізуються комбінації діагностичного параметра з мінімальною залишковою невизначеністю з 1-го етапу зі всіма іншими параметрами, тобто розглядаються пари параметрів. На наступних етапах аналогічно розглядаються комбінації з трьох, чотирьох параметрів і т. д. Процес вибору діагностичних параметрів вважається завершеним, якщо залишкова ентропія наближається до нуля: $H(S|\pi_j) \approx 0$, а інформативність, що її характеризує до початкової ентропії системи $I_{\Pi_i} \approx H(S)$.

На основі типових дефектів сформуємо перелік діагностичних параметрів для повітряної лінії напругою 110 кВ:

- π_1 – візуальні сигнатури дефектів лінійної арматури;
- π_2 – візуальні сигнатури дефектів проводу (грозозахисного тросу);
- π_3 – візуальні сигнатури дефектів опори (у т.ч. траверси та стояка опори);
- π_4 – візуальні сигнатури механічних дефектів ізоляторів;
- π_5 – візуальні сигнатури ушкодження траси ПЛ;
- π_6 – температура провідників і контактних з'єднань;
- π_7 – граничні зближення, провисання проводів (тросу);
- π_8 – граничні відхилення елементів опор від проектного положення;
- π_9 – граничні відстані між навколишніми об'єктами та ПЛ;
- π_{10} – розрядна активність ізоляторів і струмопровідних частин;

π_{11} – спектроакустичні сигнатури коронного розряду елементів ПЛ.

Виходячи з припущення, що елементи ПЛ мають однакову ймовірність відмов до розгляду приймаються лише ті дефекти вузлів, експлуатація яких в найближчій перспективі становить небезпеку для працездатності ПЛ:

s_1 – перевищення допустимої температури провідників і контактних з'єднань;

s_2 – обрив проводу (грозозахисного тросу);

s_3 – руйнування дротин верхнього повиву проводу (грозозахисного тросу);

s_4 – понаднормове розрегулювання проводів (грозозахисного тросу);

s_5 – видимі механічні дефекти ізоляторів;

s_6 – невидимі механічні дефекти ізоляторів (мікротріщини);

s_7 – нульові (пробиті) ізолятори;

s_8 – відсутність, корозія, механічні ушкодження лінійної арматури;

s_9 – відсутність, корозія елементів опор;

s_{10} – граничні деформації, зміщення елементів опор;

s_{11} – ушкодження траси ПЛ.

На основі вибраних дефектів та діагностичних параметрів було складено таблицю можливих станів ПЛ (табл. 1). У ній відсутні однакові стовбці, що свідчить, що сформований перелік дефектів забезпечує розрізнення всіх станів $s_1 - s_{11}$ ПЛ. Однак, цей набір містить надлишкову кількість параметрів, а тому потребує виконання оптимізації їх кількості.

За умови, що всі елементи ділянки ПЛ мають рівну ймовірність відмови, ймовірність того, що ПЛ знаходиться в стані s_i складе $P(s_i) = 1/N = 0,091$, а вихідна невизначеність ділянки ПЛ становитиме $H(\pi_j) = \log_2 N = 3,46$ біти.

За допомогою (5) було обчислено значення залишкової ентропії ПЛ $H(S|\Pi)$ після проведення кожної елементарної перевірки. Для компактності табл. 1, у ній представлено результати розрахунку лише для тих комбінацій діагностичних параметрів, які мають найменше значення ентропії. У випадках, коли набори діагностичних параметрів мають однакові значення ентропії, наприклад, $\pi_{10} - \pi_6 - \pi_2 - \pi_1$ і $\pi_{10} - \pi_6 - \pi_2 - \pi_8$ до подальшого розгляду приймається той набір, параметри якого найбільш просто отримати та практично реалізувати.

Таблиця 1– Можливі стани ділянки ПЛ

Параметр контролю	Стани (несправності)											$H(S \pi_j)$, біт
	s_1	s_2	s_3	s_4	s_5	s_6	s_7	s_8	s_9	s_{10}	s_{11}	
π_1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	3,020
π_2	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	2,775
π_3	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	3,020
π_4	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	3,020
π_5	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	3,020
π_6	0	1	0	1	1	1	0	1	1	1	1	2,614
π_7	1	0	1	0	1	1	1	1	1	1	1	2,775
π_8	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	3,020
π_9	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	3,020
π_{10}	1	1	0	1	0	0	0	1	1	1	1	2,514
π_{11}	1	1	0	1	0	0	1	1	1	1	1	2,614
$\pi_{10} - \pi_6$	10	11	00	11	01	01	00	11	11	11	11	1,774
$\pi_{10} - \pi_6 - \pi_2$	101	110	000	111	011	011	001	111	111	111	111	1,237
$\pi_{10} - \pi_6 - \pi_2 - \pi_1$	1011	1101	0001	1111	0111	0111	0011	1110	1111	1111	1111	0,909
$\pi_{10} - \pi_6 - \pi_2 - \pi_8$	1011	1101	0001	1111	0111	0111	0011	1111	1111	1110	1111	0,909
$\pi_{10} - \pi_6 - \pi_2 - \pi_1 - \pi_3 - \pi_5$	101111	110111	000111	111111	011111	011111	001111	111011	111101	111111	111110	0,364
$\pi_{10} - \pi_6 - \pi_2 - \pi_1 - \pi_3 - \pi_5 - \pi_4$	1011111	1101111	0001111	1111110	0111111	0111111	0011111	1110111	1111011	1111111	1111101	0,182

Джерело: розроблено авторами.

Аналіз табл. 1 показує, що найменшу залишкову ентропію має набір із семи параметрів: $\pi_1 - \pi_2 - \pi_3 - \pi_4 - \pi_5 - \pi_6 - \pi_{10}$. Діагностичні параметри $\pi_1 - \pi_5, \pi_{10}$ відносяться до оптико-візуальний методу неруйнівного контролю, а π_6 – до теплового. На практиці реалізація цих методів здійснюється за допомогою спеціалізованого обладнання. Параметри $\pi_1 - \pi_5$ визначаються за допомогою цифрової фотокамери з високою роздільною здатністю. Параметр π_6 вимірюється за допомогою тепловізора, який дозволяє виявляти аномалії температурних полів ПЛ. Для вимірювання параметра π_{10} застосовується УФ-камера, яка фіксує рівень розрядної активності біля ізоляторів та струмопровідних частин ПЛ. Діагностичне обладнання має значну вагу, тому для його доставки використовуються літаючі платформи промислового класу (квадрокоптери), наприклад, DJI Matrice 350 RTK [18]. Зазвичай такі БпЛА оснащуються гіростабілізованими підвісами для встановлення корисного навантаження. Використання таких підвісів критично важливе для забезпечення високої якості та точності вимірювань [19]. Застосування цієї технології дозволяє компенсувати вібрації та коливання БпЛА під час польоту, що забезпечує стабільність діагностичного обладнання та, як наслідок, підвищує достовірність отриманих даних при проведенні інспекцій повітряних ліній. Крім того, системи гіростабілізації можуть бути інтегрованими з GPS та інерціальними навігаційними системами БпЛА. Це дозволяє реалізувати такі функції, як автоматичне відстеження об'єктів чи точне позиціонування камери відносно наземних орієнтирів, що особливо важливо при інспекціях ліній електропередавання.

Запропонований підхід доцільно використовувати при проведенні техніко-економічного обґрунтування вибору діагностичного обладнання ПЛ, що дозволить оптимізувати процес формування комплексу технічних засобів СТД. Зокрема, він допомагає визначити найбільш інформативні та ефективні діагностичні параметри, які можливо отримати за допомогою обладнання, встановленого на БпЛА.

Розглянутий приклад мінімізації кількості діагностичних параметрів ПЛ не враховує ймовірності різних її станів. За наявності статистичної інформації про відмови ПЛ внаслідок появи експлуатаційних дефектів, доцільно спочатку оцінювати ймовірність появи конкретних груп дефектів ПЛ.

Отже, сучасні технології БпЛА в поєднанні зі штучним інтелектом відкривають нові перспективи для створення комплексних системи дистанційного діагностування повітряних ліній електропередавання. Широкий спектр сенсорів, якими вони можуть бути обладнані, дозволяє збирати значний обсяг даних про стан ПЛ. Застосування СТД ПЛ на базі БпЛА сприятиме своєчасному виявленню та усуненню потенційних несправностей, що, в свою чергу, дозволить суттєво підвищити надійність електропостачання споживачів. Крім того, застосування таких діагностичних систем може значно подовжити термін експлуатації ПЛ за рахунок превентивного обслуговування та своєчасного усунення дефектів на ранніх стадіях їх розвитку.

Висновки. 1. Встановлено, що істотний знос конструктивних елементів повітряних ліній ОЕС України, посилений впливом кліматичних змін зумовлює зростання кількості їх ушкоджень, що робить належне обслуговування ПЛ пріоритетним завданням для уникнення ризику виникнення значних збитків внаслідок неминучих технологічних порушень у їх роботі.

2. Встановлено, що існуючі системи технічного діагностування ПЛ на базі БпЛА здебільшого орієнтовані на вирішення спеціалізованих завдань для конкретних районів електромереж і не є універсальними, що обмежує їхню адаптацію до різних умов експлуатації та вказує на потребу в розробці більш комплексних систем, здатних охоплювати широкий спектр проблем електромереж.

3. Досліджено, що переважна кількість дефектів конструктивних елементів повітряних ліній проявляється у вигляді різноманітних тріщин, сколів, надломів, обривів, втрати кріпильних елементів, корозії, а решту складають приховані дефекти, такі як ослаблені контактні з'єднання проводів, нульові ізолятори, всі ці дефекти можуть бути виявлені за допомогою дистанційних методів неруйнівного контролю.

4. Визначено, що за прийнятих обмежень для діагностування стану повітряної лінії 110 кВ найбільшу інформативність має група з семи параметрів, до складу якої входять візуальні сигнатури дефектів, температури провідників і контактних з'єднань, а також розрядна активність ізоляторів і струмопровідних частин.

Список літератури

1. План розвитку системи передачі на 2022-2031 роки. Укренерго, 2021. 422 с.
2. Гриб О. Г., Карпалюк І. Т., Швець С. В., Захаренко Н. С. Підвищення надійності системи електропостачання за рахунок безпілотних літальних апаратів. *Наукові праці ВНТУ*. 2020. №1. С. 1-6.
3. Guan H., Sun X., Su Y., Hu T., Wang H. et al. UAV-lidar aids automatic intelligent powerline inspection. *Int. J. Electr. Power Energy Syst.* 2021, 130, 106987. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2021.106987>.
4. Muhammad A., Shahpurwala A., Mukhopadhyay S., El-Hag A. H. Autonomous Drone-Based Powerline Insulator Inspection via Deep Learning. In: Silva M., Luis Lima J., Reis L., Sanfeliu A., Tardioli, D. (eds) Robot 2019: Fourth Iberian Robotics Conference. ROBOT 2019. *Advances in Intelligent Systems and Computing*. Vol. 1092. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-35990-4_5.
5. Waleed D., Mukhopadhyay D. S., Tariq U., El-Hag A. H. Drone-Based Ceramic Insulators Condition Monitoring. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. 2021. Vol. 70. P. 1-12, DOI: 10.1109/TIM.2021.3078538.
6. Li Z., Zhang Y., Wu H., Suzuki S., Namiki A. et al. Design and Application of a UAV Autonomous Inspection System for High-Voltage Power Transmission Lines. *Remote Sens.* 2023. 15(3). 865 p. <https://doi.org/10.3390/rs15030865>.
7. Kozlovskiy O., Trushakov D., Rendzinyak S., Korud V. Development of a UAV-based System for Technical Diagnostics of Overhead Power Lines. 24th International Conference on *Computational Problems of Electrical Engineering 2023, CPEE 2023*. DOI: 10.1109/CPEE59623.2023.10285318.
8. Правила улаштування електроустановок. Х.: Форт, 2017. 760 с.
9. Правила охорони електричних мереж. Електронний ресурс. Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/209-97-%D0%BF#Text>.
10. Правила технічної експлуатації електроустановок споживачів. Х.: Форт, 2018. 370 с.
11. СОУ-Н ЕЕ 20.502:2007. Повітряні лінії електропередавання напругою 35 кВ і вище. К.: ГРІФРЕ, 2007. 141 с.
12. Бедерак Я. С., Тарадай В. І. Забезпечення надійної роботи електроустановок споживачів. Х.: Форт, 2020. 170 с.
13. Горобей Р., Чернов В., Удод Е. Діагностування електрообладнання 0,4-750 кВ засобами інфрачервоної техніки / під заг. ред. Е. Удода. К.: КВІЦ, 2007. 374 с.
14. Wang S., Lv F. Liu Y. Estimation of discharge magnitude of composite insulator surface corona discharge based on ultraviolet imaging method. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*. 2014. Vol. 21. No. 4. P. 1697-1704. DOI: 10.1109/TDEI.2014.004358.
15. Sokol Y. I., Zaporozhets A. O., eds. Control of Overhead Power Lines with Unmanned Aerial Vehicles (UAVs). Springer International Publishing, 2021. 157 p.
16. Кутін В. М., Ллюхін М. О., Кутіна М. В. Діагностика електрообладнання. Вінниця: ВНТУ, 2013. 161 с.
17. Надійність та діагностика електрообладнання / В. М. Казак, Б. І. Доценко, В. П. Кузьмін та ін. К.: НАУ, 2013. 280 с.
18. Matrice 350 RTK. Specs: веб-сайт. URL: <https://enterprise.dji.com/matrice-350-rtk/specs> (дата звернення 30.08.2024).
19. Майданик О. О., Мелешко Є. В., Мацуй А. М., Шимко С. В. Дослідження методів стабілізації відео та будови гіростабілізованих підвісів відеокамер для безпілотних літальних пристроїв. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки: зб. наук. пр. Кропивницький: ЦНТУ*, 2022. Вип. 6(37). Ч. 2. С. 26-36.

References

1. *Plan rozvytku systemy peredachi na 2022-2031 roky [Transmission System Development Plan for 2022-2031]*. Ukrenerho [in Ukrainian].
2. Hryb O. H., Karpaliuk I. T., Shvets S. V., Zakharenko N. S. (2020). Pidvyshchennia nadiinosti systemy elektropostachannia za rakhunok bezpilotnykh litalnykh aparativ [Improving the Reliability of the Power Supply System through Unmanned Aerial Vehicles]. *Naukovi pratsi VNTU*. № 1. P. 1-6 [in Ukrainian].
3. Guan H., Sun. X., Su Y., Hu T., Wang H. et al. UAV-lidar aids automatic intelligent powerline inspection. (2021). *Int. J. Electr. Power Energy Syst.* 130 p. 106987. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2021.106987> [in English].
4. Muhammad A., Shahpurwala A., Mukhopadhyay S. & El-Hag A. H. (2019). Autonomous Drone-Based Powerline Insulator Inspection via Deep Learning. In: Silva M., Luis Lima J., Reis L., Sanfeliu A., Tardioli, D. (eds) Robot 2019: Fourth Iberian Robotics Conference. ROBOT 2019. *Advances in Intelligent Systems and Computing*. Vol. 1092. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-35990-4_5 [in English].
5. Waleed D., Mukhopadhyay D. S., Tariq U. & El-Hag A. H. (2021). Drone-Based Ceramic Insulators Condition Monitoring. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. Vol. 70, pp. 1-12, DOI: 10.1109/TIM.2021.3078538 [in English].
6. Li Z., Zhang Y., Wu H., Suzuki S., Namiki A. et al. (2023). Design and Application of a UAV Autonomous Inspection System for High-Voltage Power Transmission Lines. *Remote Sens.* 15(3), 865. <https://doi.org/10.3390/rs15030865>. [in English].
7. Kozlovskiy, O., Trushakov, D., Rendzinyak, S., Korud, V. (2023). Development of a UAV-based System for Technical Diagnostics of Overhead Power Lines. 24th International Conference on Computational Problems of Electrical Engineering, CPEE 2023, DOI: 10.1109/CPEE59623.2023.10285318 [in English].
8. *Pravyla ulashtuvannia elektroustanovok*. (2017). [Rules for Electrical Installations]. Kharkiv: Fort. [in Ukrainian].
9. *Pravyla okhorony elektrychnykh merezh [Rules for the Protection of Electrical Networks]*. Elektronnyi resurs. Rezhym dostupu: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/209-97-%D0%BF#Text>. [in Ukrainian].
10. *Pravyla tekhnichnoi ekspluatatsii elektroustanovok spozhyvachiv*. (2018). [Rules for the Technical Operation of Electrical Installations of Consumers]. Kharkiv: Fort [in Ukrainian].
11. SOU-N EE 20.502:2007. Povitriani linii elektroperedavannia napruhoiu 35 kV i vyshe [SOU-N EE 20.502:2007. Overhead Power Transmission Lines with a Voltage of 35 kV and Above]. Kyiv: HRIFRE [in Ukrainian].
12. Bederak Ya. S., Taradai V. I. (2020). *Zabezpechennia nadiinoy roboty elektroustanovok spozhyvachiv [Ensuring Reliable Operation of Consumer Electrical Installations]*. Kharkiv: Fort [in Ukrainian].
13. Horobei R., Chernov V., Udod E. (2007). *Diahnostuvannia elektroobladnannia 0,4-750 kV zasobamy infrachervonoj tekhniky [Diagnostics of Electrical Equipment from 0.4 to 750 kV Using Infrared Technology]* / pid zah. red. E. Udoda. Kyiv: KVITs [in Ukrainian].
14. Wang S., Lv F., Y. Liu. (2014). Estimation of discharge magnitude of composite insulator surface corona discharge based on ultraviolet imaging method. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*. Vol. 21. No. 4. P. 1697-1704. DOI: 10.1109/TDEI.2014.004358 [in English]
15. Sokol, Yevgen I. & Artur O. Zaporozhets, eds. (2021). *Control of Overhead Power Lines with Unmanned Aerial Vehicles (UAVs)*. Springer International Publishing [in English]
16. Kutin, V. M., Iliukhin, M. O., Kutina M. V. (2013). *Diahnostyka elektroobladnannia [Diagnostics of Electrical Equipment]*. Vinnytsia: VNTU [in Ukrainian].
17. Kazak V. M., Dotsenko B. I., Kuzmin V. P., Shepeliev Yu. I. & Shevchuk D. O. (2013). *Nadiinist ta diahnostyka elektroobladnannia [Reliability and Diagnostics of Electrical Equipment]*. Kyiv: NAU [in Ukrainian].
18. Matrice 350 RTK. Specs: website. Retrieved from: URL: <https://enterprise.dji.com/matrice-350-rtk/specs> [in English].
19. Maidanyk O. O., Meleshko Ye. V., Matsui A. M., Shymko S.V. (2022). Doslidzhennia metodiv stabilizatsii video ta budovy hirostabilizovanykh pidvisiv videokamer dlia bezpilotnykh litalnykh prystroiv [Research of Video Stabilization Methods and of the Construction of Video Camera Gyro-stabilized Suspensions for Drones]. *Tsentralkoukrainskyi naukovi visnyk. Tekhnichni nauky – Central Ukrainian scientific bulletin: Technical sciences.* 6(37). Pr 2. P. 26-36.

Oleksandr Kozlovskiy, Assoc. Prof., PhD tech. sci.

Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine

Serhiy Rendzinyak, Prof., DSc.

Ivan Franko National University of Lviv, Lviv, Ukraine

Justification of Diagnostic Parameters for a Comprehensive UAV-based Remote Diagnostic System for Overhead Power Lines

The article presents the results of substantiating diagnostic parameters for a multiparametric remote monitoring system of overhead power lines based on the use of an unmanned aerial vehicle (UAV).

Significant wear of the structural elements of overhead power lines (OHL) in the IPS of Ukraine, exacerbated by the impact of climate change, leads to an increase in the number of damages. This makes proper maintenance of OHL a priority task. Existing technical diagnostic systems based UAVs are mainly aimed at solving narrow specialized tasks. Therefore, there is a need to develop more universal and comprehensive systems. The analysis of operational defects in the structural elements of OHL has shown that most of these defects manifest as visible mechanical damages, while others remain hidden. Detection of such defects is possible through remote non-destructive testing methods. Based on typical defects, a list of diagnostic parameters for a 110 kV overhead line was formulated. Considering that OHL elements have the same probability of failure, only those defects that may pose a threat to its operability in the near future were considered. Based on the selected defects and diagnostic parameters, a table of possible states of the OHL was compiled. The selection of the necessary and sufficient group of diagnostic parameters was carried out based on their average informativeness, which characterizes the degree of entropy reduction of the overhead line.

The main key aspects of the study are:

- existing technical diagnostic systems for overhead power lines based on UAVs are mainly focused on solving specialized tasks for specific power grid areas and are not universal. This limits their adaptation to different operating conditions and indicates the need for more comprehensive systems capable of addressing a wide range of power grid issues;

- the majority of defects in the structural elements of overhead power lines appear as various cracks, chips, fractures, breaks, loss of fastening elements, and corrosion, while the remaining defects are hidden, such as weakened wire connections and zero insulators. All these defects can be detected using remote non-destructive testing methods;

- given the accepted limitations, the most informative group for diagnosing the state of an overhead power line consists of seven parameters, including visual signatures of defects, temperatures of conductors and contact connections, as well as discharge activity of insulators and conductive parts.

overhead power line, operational defect, unmanned aerial vehicle, UAV, information theory, diagnosis, diagnostic parameter

Одержано (Received) 08.10.2024

Прорецензовано (Reviewed) 14.10.2024

Прийнято до друку (Approved) 28.10.2024