

ОСОБЛИВОСТІ ПРАКТИЧНОГО ВИКОРИСТАННЯ АВТОНОМНИХ ДІАГНОСТИЧНИХ КОМПЛЕКСІВ ДЛЯ ТЕПЛООВОГО КОНТРОЛЮ ПОВІТРЯНИХ ЛІНІЙ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАЧІ

С.В.Бабак¹, канд.екон.наук, М.В.Мислович², докт.техн.наук

¹ - Державне підприємство «НТЦ новітніх технологій НАН України»,
пр. Машинобудівний, 28, Київ, 03067, Україна,

e-mail: sergii.babak@gmail.com

² - Інститут електродинаміки НАН України,
пр. Перемоги, 56, Київ-57, 03680, Україна.

e-mail: mvsl@ied.org.ua

За допомогою тепловізійної апаратури, яку було встановлено на безпілотному квадрокоптері, проведено експериментальні дослідження температурного стану проводів повітряної лінії електропередачі (ЛЕП). Розглянуто приклад застосування методу статистичних слайд-функцій для прогнозування інтервалу часу, в якому (при виконанні певних умов) для проводів досліджуваної ЛЕП можливо досягнення неприпустимих температурних значень. Бібл. 14, табл. 1, рис. 4.

Ключові слова: повітряна ЛЕП, автономна система діагностики, безпілотний літальний апарат, прогноз температурного стану проводів ЛЕП.

Вступ. На сьогодні в електроенергетичному комплексі України за різними оцінками, наприклад, [3], від 70 до 90% основного та допоміжного обладнання виробило свій ресурс. За таких умов подальша експлуатація енергоємного, а в деяких випадках і вкрай небезпечного (наприклад, АЕС) обладнання потребує створення спеціальних методів та засобів, що допускають таку експлуатацію при одночасному забезпеченні необхідного рівня надійності та безпеки. Останнім часом завдяки новим інформаційним технологіям та мережі Інтернет з'явилася достатня кількість подібних методів та засобів, серед яких найбільш ефективними є методи неруйнівного контролю, моніторингу та діагностики електротехнічного обладнання.

Оскільки переважна більшість [11] виробленої електричної енергії транспортується шляхом використання повітряних ЛЕП, розглянемо питання контролю саме їхнього стану.

Як відомо, експлуатація ЛЕП регламентується багатьма нормативними документами, зокрема [8]. У відповідності до цього документу, оцінці технічного стану ЛЕП підлягають: опори та їхні елементи, проводи та елементи їхнього кріплення, арматура та ізолятори, пристрої заземлення, роз'єднувачі, запобіжники, вентильні розрядники, іскрові проміжки та трубчасті розрядники. Основним заходом технічного обслуговування ЛЕП є їхні періодичні огляди, тобто обхід персоналом ділянок ЛЕП з візуальною загальною перевіркою стану траси ЛЕП та всіх її елементів [8].

Зараз існують та успішно експлуатуються різні системи моніторингу стану перелічених вище вузлів [4, 11, 13].

До методів і систем, розглянутих у цих роботах, слід також додати роботи [2, 12], де описано різні модифікації систем моніторингу і діагностики електроенергетичного обладнання, які було створено в Інституті електродинаміки НАН України. Ці системи (наразі існує 14 модифікацій таких систем під загальною назвою «РЕГІНА») відрізняються від відомих систем своєю багатофункціональністю, вони призначені для розв'язання широкого кола задач моніторингу та діагностування різноманітних електроенергетичних об'єктів і систем, у тому числі і повітряних ЛЕП.

При експлуатації ЛЕП дуже важливим є контроль температурного стану їхніх проводів [11]. Згідно з [5, 6] рівень нагріву проводів визначається струмовими навантаженнями ЛЕП. На це впливає багато чинників, перелік яких не обмежується тими, які враховують під час прогнозування графіків електроспоживання, оскільки завантаження ЛЕП залежить і від поточної конфігурації електричної мережі (у порівнянні з потужністю вузлових навантажень значення потоків потужності по ЛЕП характеризується меншою «стабільністю»).

Існуючі системи моніторингу, контролю та діагностики обладнання ЛЕП вимагають встановлення на досліджуваній ЛЕП спеціального вимірювального обладнання, що потребує додаткових ма-

теріальних витрат. Разом з цим, визначити рівень температурного нагріву вузлів ЛЕП можна досить ефективно і з меншими матеріальними витратами (у порівнянні з необхідним у цих випадках оснащенням ЛЕП спеціальною тепловимірювальною апаратурою), якщо скористатися для контролю температури ЛЕП безпілотним літальним апаратом (БПЛА), обладнаним відповідним устаткуванням.

Основною метою даної роботи є обґрунтування і вибір методу та технічних засобів, що його реалізують, для проведення періодичного температурного моніторингу стану проводів ЛЕП. Як основний технічний засіб, що здійснює цей моніторинг, було обрано БПЛА, на якому встановлювалася спеціальна тепловізійна апаратура [1]. Зазначимо, що практичне використання БПЛА узгоджувалося з відповідними Законами України та нормативними актами [7, 9].

Для отримання експериментальних даних (у нашому випадку – температура нагріву проводів ЛЕП) було використано багатофункціональний безпілотний комплекс (БАК), який побудовано на базі БПЛА. Слід зазначити, що БПЛА, який входить до складу цього комплексу, виконує в ньому важливу функцію – засіб транспортування. Ключовим є слово «комплекс».

Такий комплекс БАК, узагальнену структуру якого показано на рис. 1, складається з двох підсистем: бортової та наземної. У свою чергу, бортова підсистема включає в себе: автопілот – систему, яка забезпечує політ БПЛА за заданою траєкторією; власне БПЛА, що несе апаратуру корисного навантаження різного типу; мобільну комп'ютеризовану інформаційно-вимірювальну систему (КІВС) зі змінними сенсорами та додатковими пристроями, які забезпечують програмно-апаратну реалізацію обробки інформації. До складу наземної підсистеми входять: система зв'язку, що реалізує передачу керуючих команд зі станції управління на борт БПЛА, а також передачу корисної інформації з борту БПЛА на наземну станцію керування в режимі реального часу; станція управління, де розташоване робоче місце оператора, і програмно-апаратний комплекс, які забезпечують контроль роботи БАК оператором; КІВС зі змінними сенсорами; обладнання у вигляді змінних сенсорів. Крім того, до складу узагальненої схеми БАК входить система запуску.

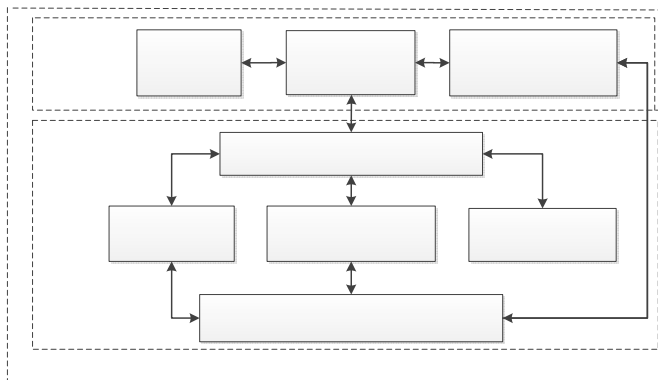


Рис. 1

Виконання різноманітних функцій, пов'язаних з контролем та діагностикою технічного стану електроенергетичного обладнання та довкілля навколо ТЕС та АЕС, де встановлено це обладнання, забезпечується використанням змінного корисного навантаження модульної побудови, яке встановлюється на внутрішній та/або на зовнішній підвісках БПЛА [1]. По суті безпілотний БПЛА – це авіаційна платформа для транспортування корисного навантаження, яке може включати: сенсори збору інформації, у т.ч. фото-, теле-, тепловізійні та мультиспектральні камери (EO/IR); лазерні сканери та

далекоміри (LRF/LD); РЛС із синтезованою апертурою (SAR); обладнання для ретрансляції зв'язку; багатофункціональну КІВС тощо.

Програмне забезпечення наземної станції управління дозволяє використовувати як карту будь-яку топографічну основу. Прив'язку до місцевості може бути здійснено за двома або кількома точками. Також можливе використання як топологічної основи електронних карт. Програма забезпечує введення, автоматичний контроль і редагування маршруту обльоту. Для кожної точки маршруту може бути задана висота. Існує можливість завдання точки посадки, а також алгоритм поведінки безпілотного літального апарату у нештатних ситуаціях.

Зупинимося на вирішенні задекларованої задачі моніторингу температурного стану проводів повітряних ЛЕП. Дослідимо можливість (при виконанні певних умов) застосування методу статистичних сплайн-функцій для короткотермінового прогнозування критичних рівнів нагріву проводів ЛЕП. При здійсненні цього прогнозу як вихідні дані використовувалися експериментальні результати вимірювання температури проводів ЛЕП, отримані за допомогою тепловізійної апаратури, встановленої на БПЛА. Слід зазначити, що подібний підхід до прогнозування технічного стану досліджуваного вузла може бути застосований на основі моніторингу будь-яких фізичних процесів (вібраційні, електромагнітні, акустоемісійні та ін.), що вимірюються безпосередньо на досліджуваних вузлах.

Прогнозування температурних показників проводів ЛЕП з використанням статистичних

сплайн-функцій базується, перш за все, на експериментально вимірних статистичних даних про температуру проводів ЛЕП, що реєструється у певні проміжки часу спостереження. Крім того, при побудові довгострокового прогнозу необхідно враховувати ряд факторів [10]: температуру повітря, швидкість та напрямок вітру, пору року та ін.

Згідно з [5, 6, 10] допустиме нагрівання проводів не повинно перевищувати 70°C . Однак, відомі дослідження [6] показали, що без суттєвої шкоди для міцності проводів їхня температура може досягати 90°C , а при застосуванні спеціальних термостійких проводів (наприклад, GTACSR або TAC [6]) навіть 200°C .

Головна ідея прогнозування критичного рівня нагріву проводів ЛЕП з використанням сплайн-функцій полягає у наступному:

- за допомогою БПЛА і встановленої на ньому тепловізійної апаратури отримують значення кількісних оцінок температури t_i° , $i \in \overline{1, k}$ за певний проміжок часу $\Delta T \in [a, b]$, який називається *інтервалом спостереження*;

- за отриманими даними t_i° , $i \in \overline{1, k}$ з використанням спеціального програмного забезпечення, яке ґрунтується на методах статистичних сплайн-функцій [1, 14] та з урахуванням отриманої інформації про тенденції зміни температури в певних точках проводів ЛЕП, із вибраним довірчим інтервалом будується *інтервал прогнозу*.

Як відомо [1, 14], для діагностики будь-якого елемента електротехнічного обладнання необхідно вибрати певний діагностичний параметр (або сукупність діагностичних параметрів) та відповідний критерій, згідно з яким приймається рішення про технічний стан досліджуваного вузла. Базуючися на цих даних [14], можна побудувати прогноз, що дозволяє визначити проміжок часу, в якому із заданою достовірністю кількісні оцінки контрольованого параметру досягнуть критичної межі, за якою подальша експлуатація об'єкту, що діагностується, може призвести до аварійних ситуацій.

При побудові *короткотермінового прогнозу* з використанням статистичних сплайнів будемо вважати, що досліджуване електротехнічне обладнання працює в однакових умовах протягом усього інтервалу часу спостереження $\Delta T \in [a, b]$, де через a та b позначено моменти часу початку та завершення спостереження відповідно. Тобто, ніякі зміни метеорологічних умов (що дуже важливо для обладнання повітряних ЛЕП, оскільки вони розташовуються на відкритому повітрі) у даному інтервалі не відбуватимуться. У цьому випадку можна припустити, що діагностичний параметр y змінюється у часі T у відповідності до деякої функціональної залежності $y = f(T, A)$, де A – детермінований вектор невідомих дійсних параметрів, що лінійно входять у $f(T, A)$.

У результаті вимірювань, що здійснювалися протягом інтервалу $\Delta T \in [a, b]$ спостереження, отримано послідовність значень y_i , $i \in \overline{1, N}$ функції y , які відповідають значенням аргументу $T_i \in [a, b]$, $i \in \overline{1, N}$. Внаслідок того, що вимірювання здійснюються одним і тим самим вимірювальним приладом з однаковою точністю у незалежні моменти часу, можна вважати, що значення y_i розподілені за гаусовим законом з однаковими дисперсіями ($Dy_i = \sigma^2$, $i \in \overline{1, N}$, D – оператор дисперсії) і некорельовані.

Представимо шукану функціональну залежність у наступному вигляді:

$$My_i = \sum_{k=0}^r x_{ik} a_k = f(T_i, A), \quad i \in \overline{1, N}, \quad (1)$$

де M – оператор математичного сподівання; $A = (a_0, a_1, \dots, a_r)$ – невідомі параметри; $X = (x_{ik})$, $i \in \overline{1, N}$, $k \in \overline{0, r}$ – так звана матриця планування, що складається з наперед заданих елементів, які залежать від T_i .

Вираз (1) можна переписати в матричній формі $MY = XA$, де $Y = (y_i)$, $i \in \overline{1, N}$ та A – матриця-стовпець. Таким чином, задача одержання залежності $y = f(T, A)$ зводиться до пошуку статистичних оцінок елементів вектора A за результатами спостережень y_i , $i \in \overline{1, N}$. При цьому допускається довільний вибір елементів матриці планування X , що дає можливість шукати оптимальний у

певному розумінні розв'язок.

Знаючи, що вид матриці планування задає клас відновлюваних функцій. Розглянемо розв'язання цієї задачі у класі сплайн-функцій, а статистичні оцінки невідомих параметрів будемо будувати за методом найменших квадратів [1, 14].

Як відомо, сплайн – це функція, “склеєна” з відрізків різних функцій за певною схемою [1, 14]. Поліноміальні сплайни складаються з частин, пов'язаних з різними многочленами таким чином, щоб забезпечити необхідну гладкість отриманого сплайна. При інтерполяції за допомогою поліноміальних сплайнів на відрізку $[a, b]$ осі T задається сітка

$$\Delta_r = \{T_j\}_{j=0}^r, \quad a = T_0 < T_1 < \dots < T_r = b. \quad (2)$$

Функція $S_m(T) = S_{m,k}(T, \Delta_r)$ є поліноміальним сплайном ступеня m дефекту k ($1 \leq k \leq m$) з вузлами (2), якщо

$$\begin{aligned} \text{а) } S_m(T) &\in \mathbf{P}_m \text{ при } T \in [T_j, T_{j+1}], \quad j = \overline{0, r-1}; \\ \text{б) } S_m(T) &\in \mathbf{C}^{m-k} [a, b], \end{aligned}$$

де \mathbf{P}_m – множина дійсних поліномів ступеня не вище m ; $\mathbf{C}^k [a, b]$ – множина неперервних на $[a, b]$ функцій, що мають неперервну k -ту похідну.

В умовах сформульованої задачі на відрізку $[a, b]$ при заданому r треба знайти таку сітку Δ_r , щоб побудований на ній сплайн забезпечив оптимальну (за методом найменших квадратів) статистичну оцінку вектора A , елементи якого будемо вважати ординатами у вузлах інтерполюючого сплайна 1-го ступеня. Згідно з методом найменших квадратів необхідно забезпечити мінімум виразу

$$(Y - XA)^{(*)} * (Y - XA) = \sum_{i=1}^N \left(y_i - \sum_{j=r}^r a_j x_{ij} \right)^2. \quad (3)$$

Вектор A знаходимо за виразом

$$A = (X * X)^{-1} X * Y. \quad (4)$$

Довірчий інтервал з ймовірністю β для знайдених оцінок A обчислюється за формулою

$$I_{\beta}^{(j)} = \left[a_j \mp \gamma_{\beta} \sqrt{\left\{ (X * X)^{-1} \right\}_{jj} \frac{d}{N - r - 1}} \right], \quad (5)$$

де γ_{β} – величина, яка задовольняє співвідношенню $\mathbf{P} \{ |T_{N-r-1}| \leq \gamma_{\beta} \} = 1 - \beta$, якщо випадкова величина T_{N-r-1} розподілена за законом Стюдента з $(N - r - 1)$ ступенями свободи; d – сума квадратів відхилень спостережень y_i від значень отриманого сплайна у відповідних точках.

Співвідношення (5) надає можливість побудувати довірчі інтервали в кожному вузлі сплайна, а на всьому інтервалі – довірчий коридор.

Для отримання прогнозу за допомогою статистичного сплайна до множини вузлів сплайна вводиться додатковий вузол, абсциса якого відповідає інтервалу прогнозу. Методом перебору на комп'ютері вибирається така сітка, яка задовольняє рівнянню (4) і одночасно мінімізує (3) на множині можливих нерівномірних сіток та ширині довірчого інтервалу у вузлі прогнозу. В результаті отримуємо очікуване значення та довірчий інтервал для вибраного діагностичного параметра в кінці інтервалу прогнозу. Межі довірчого коридору формуються шляхом лінійної інтерполяції верхньої та нижньої границь довірчих інтервалів у всіх вузлах отриманого сплайна, включаючи і вузол прогнозу.

На основі розглянутого методу сплайн-прогнозу було побудовано алгоритми та розроблено комп'ютерну програму, яка реалізує цей метод. Саме ця комп'ютерна програма є основною частиною запропонованого методу, що дозволяє здійснити короткотерміновий прогноз з визначення проміжку часу, за якого температура проводів ЛЕП може досягнути критичних значень. Всі основні відомості про цю програму, практичні питання її застосування викладено у роботі [14], а також у спеціальній документації.

Застосування запропонованого методу побудови прогнозу розглянемо на конкретному прикладі. Для здійснення такого прогнозу необхідно було, перш за все, одержати експериментальні статистичні дані про температурний стан проводів ЛЕП. Крім того, вихідними даними для програми є:

- число вимірювань температури, $n = 11$ (у нашому випадку);
- кількість годин прогнозу, $n_{\text{прогн}} = 3$;
- число інтервалів, що інтерполює сплайн, $r = 5$;
- число інтервалів розбивки часового проміжку, на якому здійснюється вимірювання температури (розбивка виконується з метою знаходження оптимального інтерполяційного сплайна), $n_{\text{розб}} = 10$;
- довірна ймовірність оцінки прогнозу довжини проміжку часу досягнення критичної температури проводами ЛЕП, $P = 0,95$;

У результаті розрахунку по програмі отримуємо дані, які наведено у таблиці та у вигляді графіка на рис. 2.

Години	9 ⁰⁰	9 ³⁰	10 ⁰⁰	10 ³⁰	11 ⁰⁰	11 ³⁰	12 ⁰⁰	12 ³⁰	13 ⁰⁰	13 ³⁰	14 ⁰⁰
t°, C	40,5	39,5	40,5	45,0	47,0	47,5	50,0	49,0	51,0	55,0	57,0

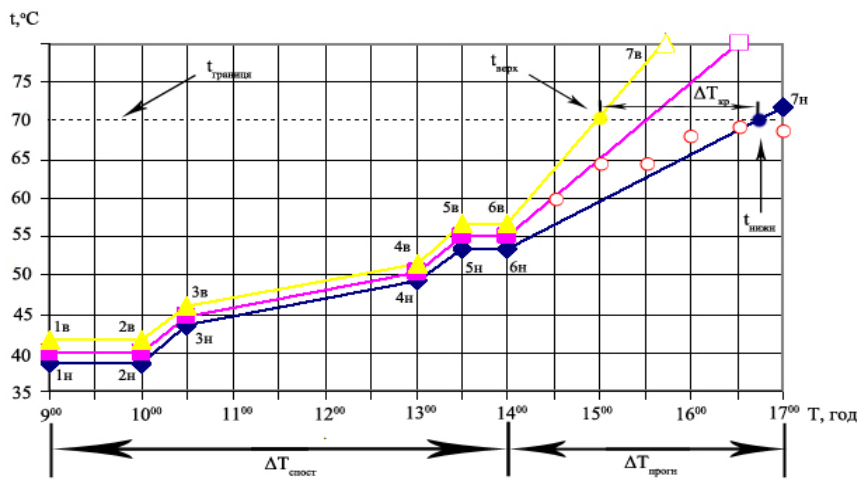


Рис. 2

У верхньому рядку таблиці вказано години, коли здійснювалося вимірювання температури проводів ЛЕП. Нижній рядок містить відповідні значення температури.

Графік на рис. 2 представляє собою сплайн-апроксимацію у вигляді деякого каналу, що складається із шістьох ділянок. Точки стикування сплайна по верхній границі каналу позначено 1^в–7^в (ці точки позначено символом Δ), а на нижній границі 1^н–7^н (для позначення цих точок використано символ ◇). У основній

лінії апроксимації для позначення точок стикування вибрано позначення □. Ширина каналу визначається прийнятою довірчою ймовірністю $P = 0,95$. Ділянки 1–6 графіка характеризують інтервал спостереження $\Delta T_{\text{спост}}$, а ділянка 6–7 – інтервал прогнозу $\Delta T_{\text{прогн}}$. Прогноз здійснювався на 3 години уперед відносно 14⁰⁰ годин від останньої точки з інтервалу спостереження. Як видно з графіка, із збільшенням у часі інтервалу прогнозу його верхня та нижня границі розширюються, тобто ймовірність прогнозу із збільшенням часу зменшується.

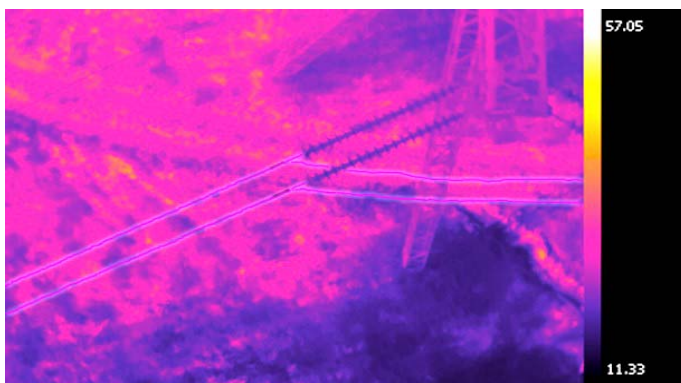
Статистичний сплайн (рис. 2) побудовано за результатами спостереження значень температури проводів ЛЕП, що знаходиться в експлуатації. Вимірювання температури здійснювалося на інтервалі часу $\Delta T_{\text{спост}} \in 9 \dots 14$ через кожні 0,5 години за допомогою тепловізора, встановленого на БПЛА. Кількісні значення виміряної температури представлені у нижньому рядку таблиці та показані на графіку у вигляді чорних точок, розміщених на інтервалі спостереження $\Delta T_{\text{спост}}$.

Побудований сплайн (рис. 2) поділено на дві ділянки, а саме: ділянку, де із заданою ймовірністю ($P = 0,95$) проведено інтерполяцію даних за виміряною температурою проводів ЛЕП на інтервалі часу $\Delta T_{\text{спост}} \in 9 \dots 14$, та ділянку $\Delta T_{\text{прогн}} \in 13 \dots 17$. Прогнозоване значення інтервалу часу $\Delta T_{\text{крит}}$, на якому температура проводів ЛЕП може досягти критичного рівня, визначається довжиною проміжку часу між точками перетину лінії граничного значення температури з верхньою $t_{\text{верхн}}$ і нижньою $t_{\text{нижн}}$ границями побудованого сплайну. Лінія граничного значення температури $t_{\text{гранич}} = 70^\circ C$ будується паралельно вісі абсцис у відповідності до існуючих нормативних документів з експлуатації ЛЕП [8]. На рис. 2 прогнозована довжина $\Delta T_{\text{крит}}$ позначена чорною лінією зі стрілками.

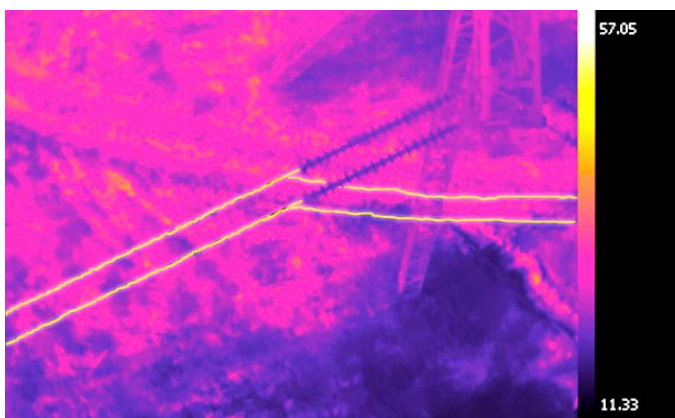
З метою перевірки працездатності запропонованого методу прогнозування можливих значень температури проводів ЛЕП за допомогою БПЛА було здійснено експериментальне вимірювання температури цих проводів у період часу, що відповідає інтервалу прогнозу $\Delta t_{\text{прогн}}$. Дані результатів цих вимірювань (6 точок, позначених \circ) нанесено на вказаний інтервал $\Delta t_{\text{прогн}}$ графіка. Майже всі (крім однієї точки значення температури, що була виміряна о $T = 17^{00}$) одержані експериментальні дані не вийшли за межі верхньої та нижньої границь побудованого сплайн-прогнозу. Це підтверджує працездатність запропонованого методу прогнозування значень часового інтервалу, протягом якого проводи ЛЕП можуть досягти неприпустимих значень температури.



Рис. 3



а



б

Рис. 4

На основі побудованого сплайн-прогнозу інтервал часу, коли проводи ЛЕП можуть досягти гранично допустимого значення температури 70^0 С знаходиться між 15^{00} та 16^{45} годинами з довірчою імовірністю $P = 0,95$, причому лише при незмінних умовах експлуатації ЛЕП.

При побудові короткотермінового сплайн-прогнозу передбачалося, що нагрів проводів спричинювався випадковим характером зміни навантаження ЛЕП та незмінністю інших умов протягом усього інтервалу спостереження.

Для візуалізації отриманих результатів на рис. 3, 4 показано фотографії ділянки ЛЕП з опорою та тепловізійні зображення цієї ділянки, одержані з використанням БАК, на яких видно металеву опору і електричні проводи, підвишені на гірляндах керамічних ізоляторів. Зйомку було виконано 9 жовтня 2015 року о 7^{00} ранку (рис. 4, а) та об 11^{00} годині (рис. 4, б). Проводи (рис. 4, а) внаслідок струмового навантаження розігріті до температури 29^0 С, за тепловізійною шкалою, яку представлено на цих знімках праворуч від основного зображення. На чорно-білому зображенні електричні проводи виділяються ледь світлим тоном. Температура проводів (рис. 4, б) за даними тепловізійних спостережень складає 52^0 С, відповідно і «колір» проводів ЛЕП світліший у порівнянні із рис. 4, а.

Висновки. Проведені експерименти підтвердили працездатність побудованого температурного блоку у складі БАК. Практичне застосування БПЛА, на відміну від існуючих засобів, забезпечує оперативне проведення дистанційного температурного контролю довгопротяжних об'єктів (у нашому випадку ЛЕП) у важкодоступних та небезпечних місцях.

Експериментально підтверджено, що використання методу статистичних сплайн-функцій у поєднанні з новими інформаційними технологіями, реалізованими за допомогою

безпілотного літального апарату і при збереженні незмінними метеорологічних умов, дозволяють із

заданою вірогідністю здійснювати короткотермінове прогнозування часового інтервалу, протягом якого обладнання ЛЕП може досягати критичних температур.

Подяка. Автори щиро вдячні доктору технічних наук, професору *О.Ф.Буткевичу* за цінні поради, надання консультативної допомоги і плідні дискусії в процесі підготовки матеріалу статті.

1. *Бабак С.В., Мыслович М.В., Сысак Р.М.* Статистическая диагностика электротехнического оборудования. – Киев: Ин-тут электродинамики НАН Украины, 2015. – 456 с.
2. *Буткевич О.Ф., Тутик В.Л.* Моніторинг та діагностування електроенергетичних об'єктів України на базі комплексів «Регіна» // Гідроенергетика України. – 2010. – №3. – С. 46 – 49.
3. *Кузьмин В.В., Лившиц А.Л., Шпаченко В.С.* Малозатратные и энергосберегающие технологии реабилитации турбогенераторов – основа технического перевооружения энергетики Украины // Электромеханика и энергосберегающие системы. – 2011. – Выпуск 2(14). – С. 90–92.
4. *Левинзон А., Коттик Д., Книжник Р., Френкель Л.* Беспроводная система он-лайн мониторинга частичных разрядов для определения уровня загрязнённости линейной изоляции высоковольтных ЛЭП // CIGRE, 2012, B2-205. Available at: <http://www.cigre.org>. (accessed 20.10.2015)
5. Методика расчёта предельных токовых нагрузок по условиям нагрева проводов для действующих линий электропередачи. РД 34.20.547 (МТ 34-70-037-87). – М.: СПО Союзтехэнерго, 1987. – 36 с.
6. *Никифоров Е.П.* Об увеличении нагрузочной способности действующих ВЛ по току // Электрические станции. – 2008. – № 11. – С. 33–37
7. Правила охорони електричних мереж. Кабінет міністрів України. Постанова №209 від 4 березня 1997 // Офіційний вісник України. – 1997. – № 10. – С. 28.
8. Правила технічної експлуатації електроустановок споживачів в новій редакції 2012 р. Наказ Міністерства енергетики та вугільної промисловості України №91 від 13.02.2012 р. – Київ, 2012. – 77 с.
9. Про землі енергетики та правовий режим спеціальних зон енергетичних об'єктів. Закон України, №5460-VI (5460-17), від 16.02.2012 / Відомості Верховної ради. – 2014. – № 2-3, ст.41.
10. *Сацук Е.И., Лужковский Ю.И.* Метод прогнозирования перегрузки воздушных линий электропередачи для автоматического противоаварийного управления // Известия вузов. Электромеханика. – 2015. – № 2(538). – С. 49–52.
11. *Самарин А., Масалов В.* Современные технологии мониторинга воздушных электросетей ЛЭП // Control Engineering Россия. – 2013. – № 3(45). – С. 88–94.
12. *Стогній Б.С., Кириленко О.В., Буткевич О.Ф., Сопель М.Ф., Рибіна О.Б., Тутик В.Л.* Система збору та обробки інформації, що реєструється комплексами «Регіна – Ч» // Праці Інституту електродинаміки. – 2011. – № 29. – С. 35–46.
13. Интеллектуальная система мониторинга воздушных линий электропередачи. Available at: <http://www.energo-bit.ru/> (accessed 20.10.2015)
14. *Khimjuk I.V., Myslovich M.V., Sysak R.M., Zvarich V.N.* Method of estimation of power electrical equipment reliability based on statistical splines // Prezeglad Elektrotechniczny. – 2009. – № 4. – Pp. 83–85.

УДК 621.31+620.9.001

ОСОБЕННОСТИ ПРАКТИЧЕСКОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ АВТОНОМНЫХ ДИАГНОСТИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ ДЛЯ ТЕПЛОВОГО КОНТРОЛЯ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ

С.В.Бабак¹, канд.экон.наук, **М.В.Мыслович**², докт.техн.наук

¹ – Государственное предприятие «НТЦ новейших технологий НАН Украины»,
пер. Машинобудивный, 28, Киев, 03067, Україна, e-mail: sergii.babak@gmail.com

² – Институт электродинамики НАН Украины,

пр. Победы, 56, Киев-57, 03680, Украина.

e-mail: mysl@ied.org.ua

С помощью тепловизионной аппаратуры, которая была установлена на беспилотном квадрокоптере, проведены экспериментальные исследования температурного состояния проводов воздушной линии электропередачи (ЛЕП). Рассмотрен пример применения метода статистических сплайн-функций для прогнозирования интервала времени, в котором (при выполнении определенных условий) для проводов исследуемой ЛЕП возможно достижение недопустимых температурных значений. Библ. 14, табл. 1, рис. 4.

Ключевые слова: воздушная ЛЭП, автономная система диагностики, беспилотный летательный аппарат, прогноз температурного состояния проводов ЛЕП.

PRACTICAL APPLICATION PECULIARITIES OF AUTONOMOUS DIAGNOSTIC COMPLEXES FOR THERMAL CONTROL OF OVERHEAD POWER LINES

S.Babak¹, M.Myslovych²

¹ – State enterprise «STC of emerging technologies of the NAS of Ukraine»,
Mashynobudivnyi lane, 28, Kyiv, 03067, Ukraine,

E-mail: sergii.babak@gmail.com

² – Institute of Electrodynamics of the NAS of Ukraine,
Peremohy ave., 56, Kyiv-57, 03680, Ukraine.

E-mail: myvl@ied.org.ua

Using thermal imaging equipment, installed on unmanned quadcopter, experimental researches of temperature condition of the overhead power transmission line wires were conducted. Provided an example of spline functions statistical method application for prediction of time interval where, under certain conditions, it is possible to reach unacceptable temperatures for studied overhead power transmission line wires. References 14, table 1, figures 4.

Key words: overhead power transmission line, autonomous diagnostic system, unmanned aerial vehicle, prognosis of overhead power transmission line wires temperature conditions.

1. Babak S.V., Myslovich M.V., Sysak R.M. Statistical diagnostics of electrical equipment. – Kiev: Institut Elektrodinamiki Natsionalnoi Akademii Nauk Ukrainy. – 2015. – 456 p. (Rus)
2. Butkevych O.F., Tutyk V.L. Monitoring and diagnostics of power facilities Ukraine on the basis of complex "Regina" // *Hidroenerhetyka Ukrainy*. – 2010. – No 3. – Pp. 46–49. (Ukr)
3. Kuzmin V.V., Livshits A.L., Shpatenko V.S. Low-cost and energy-saving technologies of rehabilitation of turbine generators – the basis of technical re-equipment of energy in Ukraine // *Elektromekhanichni ta Enerhozberihaiuchi Systemy*. – 2011. – No 2(14). – Pp. 90–92. (Rus)
4. Levinson A., Kottik D., Knizhnik R., Frenkel L. Wireless system of partial discharge online monitoring to determine the level of contamination of the linear insulation high-voltage power lines // *CIGRE*, 2012, B2-205. Available at: <http://www.cigre.org> (accessed 20.10.2015)
5. *The methodology for calculating the current loads limit on conditions of heating cables for existing power lines*. – Moskva: SPO Soiuztekhenergo, 1987. – 36 p. (Rus)
6. Nikiforov E.P. On increasing the load capacity of the existing overhead line current // *Elektricheskie Stantsii*. – 2008. – No 11. – Pp. 33–37. (Rus)
7. *Rules of electrical networks*. Cabinet of Ministers of Ukraine. Resolution № 209 of 4 March 1997 // *Official Bulletin of Ukraine*. – 1997. – No 10. – P. 28. (Ukr)
8. *Rules of technical operation of electrical consumers in the new edition of 2012*. Order of the Ministry of Energy and Coal Industry of Ukraine No 91 from 13.02.2012. – Kyiv, 2012. – 77 p. (Ukr)
9. *On the ground of Energy and the legal regime of special zones of energy facilities*. The Law of Ukraine, №5460-VI (5460-17), 16.02.2012 // *Vidomosti Verkhovnoi Rady*. – 2014. – No 2-3. – Article 41. (Ukr)
10. Satsuk E.I., Luzhkovsky Yu.I. Method of prognostication of overload of air-tracks of electricity transmission for the automatic crisis against control // *Izvestiia VUZov. Elektromekhanika*. – 2015. – No 2(538). – Pp. 49–52.
11. Samarin A., Masalov V. Modern monitoring technology of overhead power lines // *Control Engineering Russia*. – 2013. – No 3(45). – Pp. 88–94. (Rus)
12. Stognii B.S., Kyrylenko O.V., Butkevych O.F., Sopol M.F., Rybina O.B., Tutyk V.L. The system of collecting and processing information recorded complex "Regina - F" // *Pratsi Instytutu Elektrodynamiky Natsionalnoi Akademii Nauk Ukrainy*. – 2011. – No 29. – Pp. 35–46. (Ukr)
13. *Intelligent monitoring system of overhead power lines*. Available at: <http://www.energo-bit.ru/> (accessed 20.10.2015)
14. Khimjuk I.V., Myslovich M.V., Sysak R.M., Zvarich V.N. Method for estimation of power electrical equipment reliability based on statistical splines // *Prezglad Elektrotechnichny*. – 2009. – No 4. – Pp. 83–85.

Надійшла 26.10.2015

Остаточний варіант 29.12.2015