

О. Г. ГРИБ, І. Т. КРАПАЛЮК, О. В. ЛУКА, Є. О. КАУРКІН

ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ ОБ'ЄКТІВ ЗА РАХУНОК ВИКОРИСТАННЯ БЕЗПЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ

Розглядається питання щодо підвищення надійності роботи об'єктів в енергетичній системі України. Показано, що електроенергетичний комплекс України має значні рівні зносів, що в свою чергу призводить до зростання кількості аварійних станів, збільшення часу післяаварійних відновлень, і, як наслідок, зменшення надійності електропостачання в цілому. Відповідно і втрати електричної енергії будуть тим більше, чим вище знос систем і обладнання. Для підтримання електроенергетичної системи в межах нормативних вимог для обладнання із більшим зносом витрати на обслуговування також мають збільшуватися. Застаріле і зношене обладнання призводить до зростання втрат енергії, зростання витрат на підтримання стану працездатності і, як наслідок, втрат фінансових. Зменшення втрат електроенергії на зношеному обладнанні не може бути виконано одночасно і кардинально, в силу неможливості економіки України оновити енергетичне обладнання за короткий строк. Автори пропонують зменшення фінансових втрат провести за рахунок зменшення витрат на обслуговування існуючого обладнання. І зробити це пропонується за умови використання сучасних технологій, а саме використання БПЛА для моніторингу енергетичного обладнання. Пропонується звернути увагу тільки на один параметр, а саме на безперебійність функціонування енергооб'єктів. Так для мережеских компаній моніторинг технічного стану ліній і контроль засобів ізоляції є основним типом моніторингу. Щільність відмов побудована в графічному вигляді, де представлена нормована кількість оглядів, яка виходить із вимог надійності. Розрахунок кількості оглядів виконують за нормативними документами. В роботі показано, що графік зміни ймовірності безвідмовної роботи не є прямою. Тому регулярність оглядів не може використовувати періодичність не пов'язану із зносом обладнання. І для підтримання рівня надійності необхідно збільшувати кількість оглядів для забезпечення нормативного рівня надійності. Зменшення витрат на збільшену кількість оглядів автори пропонують виконати за допомогою БПЛА. Наведені економічні розрахунки показують високу економічну ефективність такої пропозиції.

Ключові слова: втрати електричної енергії, надійність, безвідмовна робота, частота відключень повітряних ліній, зменшення аварійності, поверхові огляди, БПЛА.

O. GRUB, I. KRAPALYUK, O. LUKA, Y. KAURKIN

INCREASING THE RELIABILITY OF ELECTRIC POWER FACILITIES THROUGH THE USE OF UNMANNED AERIAL VEHICLES

The issue of increasing the reliability of the operation of facilities in the energy system of Ukraine is being considered. It is shown that the electric power complex of Ukraine has significant levels of depreciation, which, in turn, leads to an increase in the number of emergency conditions, an increase in the time of post-accident recovery, and as a result, a decrease in the reliability of power supply in general. Accordingly, the loss of electrical energy will be the more, the higher the wear of systems and equipment. Maintenance costs must also increase to keep the power system within regulatory requirements for high wear equipment. Outdated and worn-out equipment leads to an increase in energy losses, an increase in the cost of maintaining the state of working capacity and, as a result, financial losses. Reduction of electricity losses on worn-out equipment cannot be carried out instantly and radically due to the impossibility of the Ukrainian economy to upgrade power equipment in a short time. The authors propose to reduce financial losses by reducing the cost of maintaining existing equipment. And it is proposed to do this through the use of modern technologies, namely the use of UAVs for monitoring power equipment. It is proposed to pay attention to only one parameter, namely the uninterrupted operation of power facilities. Thus, for network companies monitoring the technical condition of lines and control of isolation means is the main type of monitoring. Density of failures of equipment operation is built in graphical form, where a normalized number of inspections is presented, based on reliability requirements. The number of inspections is calculated according to regulatory documents. The paper shows that the graph of the change in the probability of failure-free operation is not straight. Therefore, the frequency of inspections cannot use the frequency that is not related to the wear and tear of the equipment. And to maintain the level of reliability, it is necessary to increase the number of inspections to ensure the standard level of reliability. Therefore, the authors propose to reduce costs with an increased number of inspections using UAVs. The above economic calculations show the high economic efficiency of such a proposal.

Keywords: losses of electrical energy, reliability, trouble-free operation, frequency of outages of overhead lines, reduction of accidents, surface inspections, UAVs.

Постановка проблеми. Електроенергетичний комплекс України має значні рівні зносів, що призводить до зростання кількості аварійних станів збільшення часу післяаварійних відновлень, зменшення надійності електропостачання. Всі ці події можна завести в одну групу – якість електропостачання. Зрозуміло, що якість електропостачання має прямо пропорційну залежність від рівня зношеності обладнання. Відповідно і втрати електричної енергії будуть тим більше, чим вище знос систем і обладнання. Для підтримання електроенергетичної системи в межах нормативних вимог для обладнання із більшим зносом витрати на обслуговування також мають збільшуватися. Для електроенергетичної системи України така ситуація є природною. І виправити її за умови значної розгалуженості енергосистеми і її значного зносу за короткі терміни не можливо. Ще треба зазначити, що

застаріле і зношене обладнання призводить до зростання втрат енергії і, як наслідок, втрат фінансових. Цілком істотно, що в Україні величина втрат за останні роки змінюється в сторону збільшення. «Втрати електричної енергії в електромережах у 2020 році зросли до 10,4 %, що коштувало країні та споживачам десятки мільярдів гривень» [1]. За останні два роки величина втрат електроенергії в мережах збільшилася майже на 2 % [1], що для деяких країн світу становить не рівень зміни, а величину втрат за рік, так, наприклад, рівень втрат в країнах за рік: Сінгапур 2 %, Німеччина 4 %, Фінляндія 4 % [2].

Якщо зменшення втрат на зношеному обладнанні не може бути виконано одночасно і кардинально, в силу неможливості економіки України оновити енергетичне обладнання за короткий строк [1, 3–5]. То авторами пропонується зменшити витрати на

обслуговування існуючого обладнання за рахунок використання сучасних технологій, а саме використання БПЛА для моніторингу енергетичного обладнання.

Забезпечення безперервності через кількість оглядів энергооб'єктів. В економічному розрахунку стаття моніторингу за технічним станом об'єкту в системі електропостачання включена в операційні витрати і в загальнопромислові витрати. Тому для вирахування сум витрат необхідно дослідити наступні:

- витрати на управління виробництвом;
- витрати на утримання, експлуатацію та ремонт, страхування, операційну оренду основних засобів, інших необоротних активів загальнопромислового призначення;
- витрати на вдосконалення технології й організації виробництва;
- витрати на обслуговування виробничого процесу;
- витрати на охорону праці, техніку безпеки і охорону навколишнього природного середовища;
- інші витрати.

Слід звернути увагу на те, що розподіл витрат на моніторинг технічного стану об'єктів буде відрізнятися для різних типів підприємств енергетики. Так для генеруючих підприємств моніторинг має включати заходи по контролю за технологічними циклами виробництва електроенергії. Для підприємств, що займаються перетворенням енергії (перетворювальні підстанції), то для таких компаній є необхідність поза контролем технічного стану засобів ще й виконувати моніторинг режимів роботи енергетичної системи. Для мережевих компаній моніторинг технічного стану ліній і контроль засобів ізоляції є основним типом моніторингу. Тому загальні витрати на моніторинг можна вирахувати за наступною формулою:

$$V_{\text{мон}} = V1 + V2 + V3,$$

де V1 – витрати пов'язані із моніторингом стану основних фондів і технологічних режимів на генеруючих об'єктах;

V2 – витрати на моніторинг станцій перетворення електричної енергії;

V3 – витрати на моніторинг мережевих компаній.

У відповідності до розрахунків витрат розглядаються тільки такі складові, розміри яких мають бути затверджені відповідними рішеннями комісій, міністерством або урядом. І самі суми на відрахування беруться із доходів зазначених компаній. Причому стан зносу обладнання не враховується у величині відрахувань. Наприклад, за регламентами, обхід ліній має бути проведено один раз на рік (для дозволених періодів експлуатації). В такому випадку не береться до уваги, що зношене обладнання потребує додаткового моніторингу. Тому виникнення відмови може настати «несподівано». В непередбачуваний час. Зафіксуємо терміни відмова, діагностика і ресурс роботи обладнання у відповідності до стандартів.

Відмова: це подія, що полягає в порушенні працездатного стану об'єкту, тобто у втраті об'єктом

здатності виконувати необхідну функцію.

Ресурсний (визначальний) параметр: параметр (характеристика), досягнення яким деякого критичного (граничного) значення призводить до відмови об'єкту.

Діагностичний параметр: параметр (характеристика), який може бути виміряний в процесі експлуатації об'єкту і який побічно характеризує витрачання ресурсу об'єкту.

Залишковий ресурс: сумарне напрацювання об'єкту від моменту контролю його технічного стану до переходу в граничний стан. Залишковий ресурс (залишкове напрацювання до відмови, залишковий термін служби) є індивідуальними показниками безвідмовності (довговічності), що відбивають фактичну тривалість експлуатації певного об'єкту до моменту, коли об'єкт досягне граничного стану, відмовить або подальша експлуатація об'єкту недоцільна. Правила доцільності будуються за економічними критеріями і критеріями безпеки.

Граничний стан об'єкту може характеризуватися:

- переходом невідновного об'єкту в непрацездатний стан;
- зниженням ефективності використання об'єкту внаслідок погіршення надійності;
- економічною недоцільністю подальшої експлуатації;
- моральним старінням апаратури і устаткування.

Для обрахування напрацювання до граничного стану використовують DM-розподіл:

$$F(t) = DM(t; \mu, \nu) = \Phi\left(\frac{t - \mu}{\nu\sqrt{\mu t}}\right),$$

де $\Phi(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^z \exp\left(-\frac{U^2}{2}\right) dU$ – нормований нормальний розподіл.

Щільність розподілу залишкового ресурсу:

$$r(t) = \frac{(t + \mu) \exp\left[-\frac{(t - \mu)^2}{2\nu^2 \mu t}\right]}{2\nu t \sqrt{2\pi \mu t} \Phi\left(\frac{\mu - \tau}{\nu\sqrt{\mu \tau}}\right)}$$

при $t \geq \tau$.

Математичне очікування залишкового ресурсу:

$$\pi(\tau) = \frac{\left[\mu\left(1 + \frac{\nu^2}{2}\right) - \tau\right] \Phi\left(\frac{\mu - \tau}{\nu\sqrt{\mu \tau}}\right) + \frac{\mu\nu^2}{2} \exp\left(\frac{2}{\nu^2}\right) \Phi\left(-\frac{\mu + \tau}{\nu\sqrt{\mu \tau}}\right) + \frac{\nu\sqrt{\mu \tau}}{\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(\tau - \mu)^2}{2\nu^2 \mu t}\right]}{\Phi\left(\frac{\mu - \tau}{\nu\sqrt{\mu \tau}}\right)}$$

Побудована в графічному вигляді щільність відмов [6] відповідає моделі (рис. 1).

За нормативами є необхідна кількість оглядів і ремонтів для обладнання. Нормована кількість оглядів виходить із вимог надійності.

З цих нормованих трудовитрат вираховується необхідна кількість обслуговуючого персоналу на певну систему або обладнання. Розрахунок кількості оглядів виконують за нормативними документами (наприклад, ГОСТ 27.502-83).

При розрахунку визначають мінімальний обсяг

статистичної інформації, за яким з необхідною вірогідністю можна одержати показники надійності елементів СЕП. Відповідно до ГОСТ 27.502-83 методи визначення мінімального числа об'єктів спостережень можуть бути параметричними (при відомому виді закону розподілу досліджуваної випадкової величини) і непараметричними (вид закону розподілу невідомий).



Рис. 1. Класифікація відмов за трьома етапами

Якщо відомий закон розподілу шуканої величини, варто задатися відносною (або абсолютною) похибкою з довірчою ймовірністю β . Крім того, необхідно мати оцінку випадкової величини $x_{\text{досл}}$, отриману на підставі дослідів або по вибірках з множини значень випадкової величини. Для двопараметричних законів розподілу необхідно також вибіркове середнє квадратичне відхилення $\sigma_{\text{досл}}$.

Так, при експонентному законі, коли функція щільності ймовірності задана в вигляді $f(t) = \lambda e^{-\lambda t}$ при $t \geq 0$.

Число N об'єктів спостереження залежить від відносної похибки δ визначення середнього значення $t_{\text{ср}}$ досліджуваної випадкової величини t з довірчою ймовірністю β .

Відносну помилку визначають як

$$\delta = \frac{(t^B - t_{\text{ср}})}{t_{\text{ср}}},$$

де t^B – верхня одностороння довірна границя.

Рекомендується використовувати довірчі ймовірності β , рівні 0,80; 0,90; 0,95; 0,99.

Число N об'єктів спостережень визначають з формули:

$$\delta + 1 = \frac{2N}{\chi^2_{1-\gamma}(2N)},$$

де $\chi^2_{1-\gamma}(2N)$ – квантиль розподілу χ^2 при числі ступенів свободи $2N$, що відповідає ймовірності $1-\gamma$.

В зазначеній формулі відсутні повторні випадки і терміни відліку урахування вірогідності. Такий підхід виправдано в умовах заміни і глибокої реконструкції систем і обладнання дає сталі значення значень спостережень.

Ймовірність безвідмовної роботи – це ймовірність того, що виріб не відмовить протягом заданого проміжку часу t в заданих умовах експлуатації.

Ймовірність безвідмовної роботи виражається через щільність ймовірності $f(t)$ у такий спосіб:

$$\text{Над}(t) = \int_0^{\infty} f(t) dt.$$

Подія протилежна ймовірності безвідмовної роботи називається ймовірністю відмови протягом заданого проміжку часу t в заданих умовах експлуатації

$$\text{Авар}(t) = \int_0^t f(t) dt.$$

Як події протилежні і представляють повну групу подій

$$\text{Над}(t) + \text{Авар}(t) = 1.$$

Розглянемо вірогідність відмови виробу за проміжок часу t , вважаючи, що відмови підкоряються нормальному закону розподілу

$$\text{Авар}(t) = \int_0^t f(t) dt = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_0^t e^{-\frac{(t_i - t_{\text{ср}})^2}{2\sigma^2}} \cdot dt.$$

Після введення заміни і підстановки отримуємо

$$\text{Авар}(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_0^{z_0} e^{-\frac{z_0^2}{2}} \cdot dz_0.$$

Цей інтеграл можна представити у вигляді двох інтегралів

$$\text{Авар}(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^0 e^{-\frac{z_0^2}{2}} \cdot dz_0 + \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^{z_0} e^{-\frac{z_0^2}{2}} \cdot dz_0.$$

Перший інтеграл суми дорівнює 0,5 тобто

$$\frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^0 e^{-\frac{z_0^2}{2}} \cdot dz_0 = 0,5.$$

Другий інтеграл суми аналітичними методами не береться, а обчислюється чисельними методами і найчастіше позначається як $\hat{O}(z_0)$, тобто

$$\hat{O}(z_0) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^{z_0} e^{-\frac{z_0^2}{2}} \cdot dz_0 - \text{Інтеграл Лапласа.}$$

Тоді пропонується ймовірність відмови за проміжок часу висловити як:

$$\text{Авар}(t) = 0,5 + \hat{O}(z_0).$$

На графіку показана зміна ймовірності безвідмовної роботи системи в залежності від часу експлуатації (рис. 2). По графіку отримуємо, ймовірність відмов нарощується поступово. Технічними показниками зростання ймовірності відмови є поступове погіршення надійності блоків системи. І при навантаженні, яке перевищує межовості зношеного елемента, настає відмова елемента (ланки) і, в наслідок чого, погіршення роботи, або відмова всієї системи.

Для варіантів, коли обладнання не досягло стану групи 3 (рис. 1), якщо поверхневий огляд проводять один раз на рік, то можливо оцінити стан і передбачити слабко плинні процеси зносу обладнання. Але частіше просто зафіксувати нормальний робочий стан обладнання.

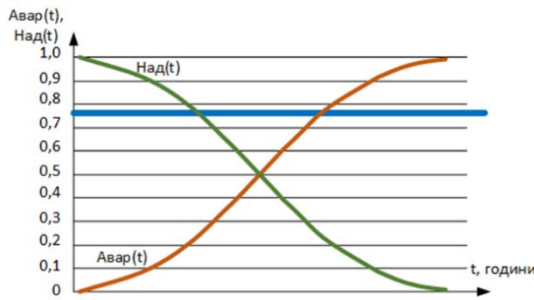


Рис. 2. Графік зміни ймовірності безвідмовної роботи

Зрозуміло, що огляди призначені виявити різке зростання $\Delta\text{Авар}(t)$ або виявити рівень $\text{Авар}(t)$, який може відповідати величинам аварійності. Таким чином, необхідно збільшити частоту річних оглядів для досягнення необхідних значень $\Delta\text{Авар}(t)$. Чим більш зношене обладнання тим частіше мають проводитися огляди (рис. 3, 4).

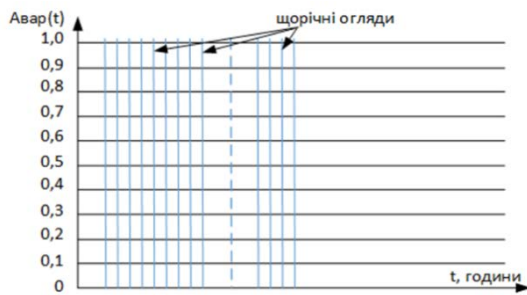


Рис. 3. Графік відмов обладнання і періодичні огляди на обладнанні нормального періоду експлуатації

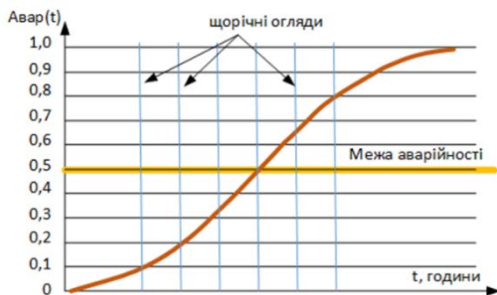


Рис. 4. Графік відмов обладнання і періодичні огляди на обладнанні із значним зносом

$$N = f(\text{Авар}(t))$$

Визначаємо необхідну кількість осмотров для забезпечення надійності по попередженню відмов.

Проміжок часу між оглядами (частота оглядів) має забезпечити прирощення функції відмов на певну величину $\Delta Q(t) \leq \text{const}$.

Запишемо прирощення функції відмов для початкового часу t_0 :

$$\Delta\text{Авар}(t_0) = \text{Авар}(t_0 + \Delta t) - \text{Авар}(t_0) .$$

Але це прирощення має відбутися за певний проміжок часу Δt

$$\frac{\Delta\text{Авар}(t_0)}{\Delta t} = \frac{\text{Авар}(t_0 + \Delta t) - \text{Авар}(t_0)}{\Delta t} .$$

То отримаємо похідну від функції $\text{Авар}(t)$.

Якщо не задавати Δt якимось конкретним (рік або місяць), а спрямувати його до нуля, то отримаємо

$$\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \left(\frac{\Delta\text{Авар}(t_0)}{\Delta t} \right) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \left(\frac{\text{Авар}(t_0 + \Delta t) - \text{Авар}(t_0)}{\Delta t} \right) .$$

Таким чином отримуємо, що кількість оглядів має бути залежною від похідної функції відмов:

$$N = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \left(\frac{\text{Авар}(t_0 + \Delta t) - \text{Авар}(t_0)}{\Delta t} \right) = \text{Авар}'(t) .$$

В графічному представленні кількість оглядів матиме вигляд представлений на рис. 5.

Зрозуміло, що кількість оглядів для підтримання (попередження) відмов на заданому рівні має зростати у відповідності до зростання функції відмов. І кількість оглядів значно перевищує нормативні значення для зношеного обладнання.

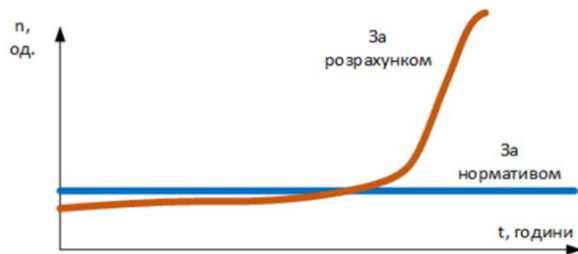


Рис. 5. Графік оглядів за нормативом і за розрахунком

Українська енергосистема має значний знос обладнання [7, 8]. Тобто система оглядів в теперішній час не дозволяє забезпечити необхідний рівень безвідмовної роботи.

Вихід із даної ситуації пропонується введенням моніторингу ЛЕП за рахунок БПЛА. Частота обльотів лінії може бути значно частішою аніж обходи бригадами лінійного персоналу, чим зменшується $\Delta\text{Авар}(t)$ і досягається необхідний рівень безперебійності системи.

Забезпечення зменшення аварійності через попередження механічних пошкоджень. Показниками зносу елементів можуть бути різні параметри:

- електричні;
- механічні;
- хімічні.

В електричних системах контроль електричних параметрів виконують за допомогою датчиків систем релейного захисту або додатковим протиаварійним обладнанням. А контроль механічного стану виконують тільки поверхневим оглядом. Хімічні параметри оцінюють тільки під час аналізу виникнення аварії. Хімічні показники для поточного моніторингу нами не розглядаються.

Контроль механічних показників є вкрай необхідним як на нових, так і на зношених електричних системах. Основні причини аварій на ЛЕП:

- порив кабелів повітряних ліній облуденням;
- руйнування проводів і тросів від вібрації біля затискачів;
- вітрове навантаження (порив проводів,

перекидання опор);

- руйнування опор (вітер, вода, діяльність людини);

- часті випадки коротких замикань або тривала дія струмів коротких замикань;

- комутаційне перевищення напруги (пробої ізоляції);

- перевищення напруги (блискавка);

- хімічна дія забрудненого повітря.

Частота відключень повітряних ліній в залежності від причин розглядалася різними дослідниками. В [7] наведено розподіл відключень з наступним простом ЛЕП більше години внаслідок різних причин (рис. 6).

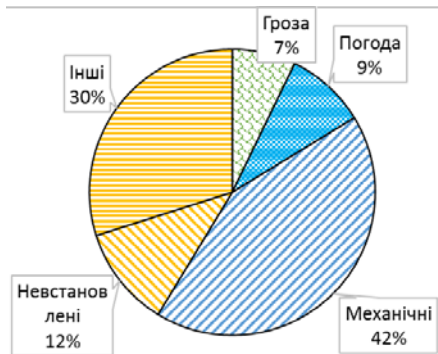


Рис. 6. Розподіл автоматичних відключень ЛЕП з простом більше години

З наведених даних зрозуміло, що механічні причини відключення ЛЕП є основними.

Розрахунок економічного ефекту від впровадження використання БПЛА. Розрахунок проведемо за наступним алгоритмом, вирахуємо збиток від відключень і відокремимо ту частку, яку може попередити введення БПЛА її вважатимемо за дохідну (Д) частину економічного ефекту:

$$D = Z_{\text{п}} \cdot 0,42,$$

де $Z_{\text{п}}$ – повний збиток від відключень, грн;

0,42 – пояснена частка відключень, які можна попередити введенням БПЛА, од.

Розрахуємо витрати на впровадження комплексу БПЛА ($V_{\text{зах}}$):

$$V_{\text{зах}} = V_{\text{БПЛА}} + V_{\text{річ}}.$$

де $V_{\text{БПЛА}}$ – витрати на придбання комплектів БПЛА, тис.грн.;

$V_{\text{річ}}$ – річні витрати на підтримання роботи комплексів, тис. грн. в рік.

Після пошуку точки беззбитковості визначимо економічний ефект від впровадження комплексу БПЛА в електроенергетичній системі для однієї енергокомпанії.

Визначення дохідної частини від впровадження заходу. Відповідно до статистичних даних на балансі енергокомпанії перебуває мережеве і станційне обладнання [9, 10]. Опишемо ситуацію із станом обладнання на прикладі реальної енергетичної компанії: енергокомпанія має на своєму балансі повітряні і кабельні лінії (табл. 1).

На балансі енергокомпанії є підстанції, кількість яких представлена в табл. 2.

Таблиця 1 – Повітряні лінії, що знаходяться на балансі енергокомпанії на 2020 р.

№	Повітряна лінія	Довжина, км
1	ПЛ 154 кВ	16,600
2	ПЛ 110 кВ	3505,993
3	ПЛ 35 кВ	3478,679
4	ПЛ 10 кВ	12975,375
5	ПЛ 6 кВ	1020,861
6	ПЛ 0,4 кВ	19448,058

Таблиця 2 – Кількість підстанцій по напрузі станом на 2020 р.

№	Підстанція	Кількість, од
1	110	93
2	35	195
3	6–10	11159

Електрообладнання енергокомпанії має значний експлуатаційний знос, що в середньому становить 60 %.

Збиток енергокомпаній від недоотриманого прибутку. Розрахунок проводили за даними АК Харківобленерго. У відповідності до статистики по енергогалузі за 2020 рік на електричних мережах відбулося 139 випадків відключення різних ділянок мережі. Дані відключень приведені в таблицях (табл. 3–5).

Якщо відокремити тільки лінії напругою 110 кВ, які здебільшого постачають енергії для промислових підприємств, а серед них розглянути тільки відключення внаслідок механічних пошкоджень то втрати будуть наступні (табл. 6).

Таблиця 3 – Причини відключення високовольтних ліній за 2020 р.

№	Причина відключення	Кількість відключень, од
1	Погодні умови (опаді, вітер)	74
2	Механічні пошкодження	65
	Всього відключень	139

Таблиця 4 – Час відключення в залежності від напруги лінії і причини

№	Напруга ділянки, кВ	Кількість відключень, од	Час відключення, хв.	Причина відключення
1	110	38	5702	Опади
2	110	41	6065	Механіч.
3	35	37	14510	Опади
4	35	23	8894	Механіч.
	Всього	139	34340	

Таблиця 5 – Обсяг недовідпущеної електричної енергії внаслідок відключень

№	Напруга ділянки, кВ	Обсяг недовідпуску, МВт·год	Причина відключ.
1	110	5,702	Опади
2	110	7,721	Механічні
3	35	38,387	Опади
4	35	8,623	Механічні
5	Всього	59,891	

Таблиця 6 – Наслідки відключень ліній 110 кВ від механічних пошкоджень

№	Кількість відключень, од	Час відключення, хв.	Обсяг невідпуску, МВт·год
1	41	6065	7,721

Враховуючи що середня вартість кіловат часу електричної енергії за 2023 рік становить [11] 2,64 грн. з ПДВ. Тоді збитки в грошовому вимірі безпосередньо від невідпуску електричної енергії становлять:

$$7721 \cdot 2,64 = 20,4 \text{ тис. грн.}$$

Тобто збитки енергетичної компанії від недоотриманого прибутку: $Z_k = 20,4$ тис.грн.

Збиток споживача від знищення, пошкодження основних фондів і майна третіх осіб. За статистичними даними кількість відключень на лініях 110 кВ становить 41 відключення за рік (табл. 6). 11 відключень припадає на відключення мереж що живлять відповідальні підприємства.

В розрахунок було обрано підприємства, які використовують складні науково-технологічні виробничі цикли, фінансові установи, ІТ компанії, телекомунікаційні фірми, виробники із безперервними циклами.

Збиток для кожних груп компаній представлено в табл. 7.

Збитки споживачів: $Z_{\text{оф}} = 130,6$ млн. грн.

Повні збитки. Повні збитки становлять:

$$Z_n = Z_k + Z_{\text{оф}} = 20,4 + 130640,0 = 130,66 \text{ млн. грн.}$$

Розраховуємо дохідну частину заходів:

$$D = 130,66 \cdot 0,42 = 54,88 \text{ млн. грн.}$$

Таблиця 7 – Розраховані збитки споживачів від провалів і невідпуску електричної енергії

№	Назва групи компаній	Сума, млн. грн.
1	Підприємства із складними науково-технологічними виробничими циклами	63,80
2	Фінансові установи	34,77
3	ІТ компанії	9,79
4	Телекомунікаційні фірми	14,03
5	Виробники із безперервними циклами	8,25
	Всього	130,64

Визначення витрат на придбання комплектів БПЛА. У відповідності до запланованого обсягу обслуговування ЛЕП розрахункова потреба в БПЛА становить 1 комплекс на 150 км ЛЕП (табл. 8).

Таблиця 8 – Розрахунок кількості комплектів БПЛА

№	Повітряна лінія, кВ	Довжина, км	Кількість БПЛА, од
1	ПЛ 154	16,6	0,1
2	ПЛ 110	3505,993	23,4

Вартість одного комплексу БПЛА Квадрокоптер DJI Matrice 210 RTK V2 Combo (рис. 7) за даними [12] становить 326,4 тис. грн.



Рисунок 7 – Квадрокоптер DJI Matrice 210 RTK V2 Combo

Загальна вартість для 23 комплектів:

$$V_{\text{БПЛА}} = V_{\text{БПЛА1}} \cdot N,$$

де $V_{\text{БПЛА1}}$ – вартість одного комплексу БПЛА, тис. грн.

N – кількість комплектів, од.

$$V_{\text{БПЛА}} = 326,4 \cdot 23 = 7637,6 \text{ тис. грн.}$$

Витрати на придбання комплектів БПЛА:

$$V_{\text{БПЛА}} = 7,65 \text{ млн. грн.}$$

Визначення витрат на поточні витрати підтримання БПЛА. Для виконання робіт за допомогою БПЛА необхідно найняти (перепідготувати) працівника із навичками пілотування і обслуговування такого обладнання.

Фонд заробітної плати (ФЗП) інженера-оператора БПЛА становитиме (з урахуванням податків) 16,78 тис. грн. за місяць.

ФЗП за рік відповідно $16,78 \cdot 12 = 201,36$ тис. грн.

Планується до придбання 23 комплекти БПЛА, звідси ФЗП за всьома інженерами-операторами БПЛА становитиме:

$$201,36 \cdot 23 = 4711,82 \text{ тис. грн. на рік;}$$

$$V_{\text{річ}} = 4,71 \text{ млн. грн. на рік.}$$

Визначення ефективності впровадженого заходу на п'ять років. Відповідно до технічних регламентів БПЛА має ресурс 10000 годин роботи, що відповідає п'яти рокам експлуатації.

Тоді витрати на комплекси БПЛА за п'ять років становитимуть:

$$V_5 = V_{\text{річ}} \cdot 5 + V_{\text{БПЛА}};$$

$$V_5 = 7,64 + 4,71 \cdot 5 = 31,19 \text{ млн. грн.}$$

Дохідна частина за п'ять років (на прикладі однієї області) становитиме:

$$D_5 = D \cdot 5 \text{ років;}$$

$$D_5 = 54,88 \cdot 5 = 274,38 \text{ млн. грн.}$$

Висновки. Запропонована технологія проведення моніторингу об'єктів енергосистеми України за допомогою БПЛА має значний потенціал. І можливості від його використання далеко не використані в енергетиці нашої країни. Наведений приклад використання БПЛА тільки для поверхневих оглядів високовольтних ліній електропередач, навіть за приведеними не дуже детальними економічними розрахунками показав, що така технологія має дуже

короткі терміни окупності. За п'ять років не тільки можливо окупити проект, але й отримати прибуток. Для багатьох типів енергетичного обладнання п'ять років дуже короткий термін. Тому автори вважають, що використання БПЛА для систем моніторингу елементів енергетичної системи України має і технічні і економічні переваги. Тому роботу по розробці і впровадженню різних систем діагностики і моніторингу за допомогою БПЛА необхідно продовжити.

Список літератури

1. Гурковська Н. *Втрати електроенергії в українських мережах у 2020 році перевищили 10 %*. URL: <https://www.rbc.ua/rus/news/poteri-elektroenergi-ukrainskih-setyah-2020-1627646052.html> (дата звернення: 08.08.2023).
2. *Electric power transmission and distribution losses (% of output)*. URL: <https://data.worldbank.org/indicator/EG.ELC.LOSS.ZS?end=2014&start=2000&view=chart> (дата звернення: 08.08.2023).
3. Онищенко В. А., Самойленко І. А., Грїб О. Г., Жаркін А. Ф., Васильченко В. І., Ушаповський К. В., Сендерович Г. А., Светелик А. Д., Кондратенко К. І., Довгалюк О. Н., Щербаківа П. Г., Захаренко Н. С. *Аналіз і оцінка економічних ушкоджень від низького якості електричної енергії*. Харків: ПП «Граф-Ікс», 2013. 329 с.
4. Зниження втрат електроенергії в мережах на її транспортування. Заходи щодо покращання роботи зі споживачами. *Новини енергетики*. 2002. № 7. С. 1–59.
5. Грїб О. Г., Сокол Е. І., Жаркін А. Ф., Васильченко В. І., Тесик Ю. Ф. *Якість електричної енергії. Том 2. Контроль якості електричної енергії*. Харків: ПП «Граф-Ікс», 2014. 244 с.
6. Bindra A. *Best Practices for Boosting Reliability in Power Supplies*. URL: <http://www.digikey.com/en/articles/techzone/2014/jul/best-practices-for-boosting-reliability-in-power-supplies> (дата звернення: 15.02.2023).
7. Аналітичний центр досліджень енергетики. URL: <http://eircenter.com/> (дата звернення: 16.02.2023).
8. Дячук О., Чепелев М., Подолець Р., Трипольська Г., Венгер В., Саприкіна Т., Юхимець Р. *Перехід України на відновлювану енергетику до 2050 року*. Київ: АРТ КНИГА, 2017. 88 с.
9. *План розвитку системи розподілу АТ «Харківобленерго» на 2020-2024 роки*. URL: http://www.oblenergo.kharkov.ua/sites/default/files/pdf/plan_rozvytku_2020-2024.pdf (дата звернення: 01.06.2023).
10. Артемчук В. О., Білан Т. Р., Блінов І. В. та ін. *Теоретичні та прикладні основи економічного, екологічного та технологічного функціонування об'єктів енергетики*. Київ: Білан, 2017. 312 с.
11. *Ціни на електроенергію для споживачів з 01 вересня 2023 року*. URL: <https://ukrstat.gov.ua/> (дата звернення: 01.08.2023).
12. *Квадрокоптери України*. URL: http://store.drone.ua/product/kvadrokopter-matrice-210-rtk-v2-combo/?gclid=Cj0KCQiA-bjyBRcSARIsAFboWg1qESIws2Vba0YddnfxHFr3EdLcJiEEuhmLKFZ93UEhRUearpiKfvAaAhJCEALw_wcB (дата звернення: 10.08.2023).

References (transliterated)

1. Hurkov's'ka N. *Vtraty elektroenerhiyi v ukrayins'kykh merezhakh u 2020 rotsi perevyschly 10 %* [Electricity losses in Ukrainian grids exceeded 10% in 2020]. Available at: <https://www.rbc.ua/rus/news/poteri-elektroenergi-ukrainskih-setyah-2020-1627646052.html> (accessed 08.08.2023).
2. *Electric power transmission and distribution losses (% of output)*. Available at: <https://data.worldbank.org/indicator/EG.ELC.LOSS.ZS?end=2014&start=2000&view=chart> (accessed 08.08.2023).
3. Onishchenko V. A., Samoylenko I. A., Grib O. G., Zharkin A. F., Vasil'chenko V. I., Ushchapovskiy K. V., Senderovich G. A., Svetelik A. D., Kondratenko K. I., Dovgalyuk O. N., Shcherbakova P. G., Zakharenko N. S. *Analiz i otsenka ekonomicheskikh ushcherbov ot nizkogo kachestva elektricheskoy energii* [Analysis and assessment of economic damage from poor quality electricity]. Kharkov, PP "Graf-Iks" Publ., 2013. 329 p.
4. Znyzhennya vtrat elektroenerhiyi v merezhakh na yiyi transportuvannya. Zakhody shchodo pokrashchannya roboty zi spozhyvachamy [Reducing electricity losses in the grid due to transmission. Measures to improve customer relations]. *Novynny enerhetyky*. 2002, no. 7, pp. 1–59.
5. Grib O. G., Sokol E. I., Zharkin A. F., Vasil'chenko V. I., Tesik Yu. F. *Kachestvo elektricheskoy energii. Tom 2. Kontrol' kachestva elektricheskoy energii* [Quality of electrical energy. Vol. 2. Quality control of electrical energy]. Kharkov, PP "Graf-Iks" Publ., 2014. 244 p.
6. Bindra A. *Best Practices for Boosting Reliability in Power Supplies*. Available at: <http://www.digikey.com/en/articles/techzone/2014/jul/best-practices-for-boosting-reliability-in-power-supplies> (accessed 15.02.2020).
7. *Analitychnyy tsentr doslidzhen' enerhetyky* [Analytical Centre for Energy Studies]. Available at: <http://eircenter.com/> (accessed 16.02.2023).
8. Dyachuk O., Chepelyev M., Podolets' R., Trypol's'ka H., Venher V., Saprykina T., Yukhymets' R. *Perekhid Ukrayiny na vidnovlyuvanu enerhetyku do 2050 roku* [Ukraine's Transition to Renewable Energy by 2050]. Kyiv, ART KNYHA Publ., 2017. 88 p.
9. *Plan rozvytku systemy rozpodilu AT "Kharkivoblenerho" na 2020-2024 roky* [Distribution system development plan of JSC "Kharkivoblenergo" for 2020-2024]. Available at: http://www.oblenergo.kharkov.ua/sites/default/files/pdf/plan_rozvytku_2020-2024.pdf (accessed 01.06.2023).
10. Artemchuk V. O., Bilan T. R., Blinov I. V. ta in. *Teoretychni ta prykladni osnovy ekonomichnoho, ekolohichnoho ta tekhnolohichnoho funktsionuvannya ob'yektiv enerhetyky* [Theoretical and applied bases of economic, ecological and technological functioning of energy objects]. Kyiv, Bilan Publ., 2017. 312 p.
11. *Tsiny na elektroenerhiyu dlya spozhyvachiv z 01 veresnya 2023 roku* [Electricity prices for consumers from 01 September 2023]. Available at: <https://ukrstat.gov.ua/> (accessed 01.08.2023).
12. *Kvadrokopty Ukrayiny* [Quadcopters in Ukraine]. Available at: http://store.drone.ua/product/kvadrokopter-matrice-210-rtk-v2-combo/?gclid=Cj0KCQiA-bjyBRcSARIsAFboWg1qESIws2Vba0YddnfxHFr3EdLcJiEEuhmLKFZ93UEhRUearpiKfvAaAhJCEALw_wcB (accessed 10.08.2023).

Надійшла (received) 25.08.2023

Відомості про авторів / About the Authors

Грїб Олег Герасимович (Grib Oleg) – доктор технічних наук, професор, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», професор кафедри «Автоматизація та кібербезпека енергосистем»; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4758-8350>; e-mail: oleg47gryb@gmail.com

Карпалюк Ігор Тимофійович (Karpaliuk Igor) – доктор технічних наук, професор, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», професор кафедри «Автоматизація та кібербезпека енергосистем»; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5634-6807>; e-mail: humpway@gmail.com

Лука Олексій Володимирович (Luka Oleksiy) – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», аспірант кафедри «Автоматизація та кібербезпека енергосистем»; м. Харків, Україна; ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-4178-8856>; e-mail: oleksiy luka141@gmail.com

Кауркін Євген Олексійович (Kaurkin Yevgen) – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», аспірант кафедри «Автоматизація та кібербезпека енергосистем»; м. Харків, Україна; ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-5878-128X>; e-mail: yevgenkaurkin141@gmail.com