

УДК 632.31

**О. Г. Гриб, д. т. н., проф.; І. Т. Карпалюк, к. т. н., доц.; С. В. Швець, к. т. н., доц.;  
Н. С. Захаренко, к. екон. н., доц.**

## **ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ЗА РАХУНОК БЕЗПЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ**

*Енергетична система України має розгалужені електричні мережі із складною конфігурацією, при цьому об'єкти споживання та генерування рознесені на значній території. В країні використовують значну кількість об'єктів енергетики, які потребують постійного нагляду. Однак оновлення технічних систем проходить низькими темпами, що призводить до постійного зростання рівня зношуваності обладнання. Це негативно позначається на надійності електропостачання та на його якісних показниках. Високий рівень зношуваності призводить до зростання вірогідності аварійних станів, через які системи вимикають. Через неможливість повної заміни обладнання прийнята концепція поступової заміни. У таких умовах підтримання робочого стану обладнання забезпечує поточне обслуговування, яке проводиться оперативним персоналом. Однак штат оперативного персоналу постійно скорочують, тому для підтримання енергосистеми в робочому стані необхідно розробити нові технології, що дозволять, своєчасно виявляти пошкодження, точно визначати місце аварії та її характер. У статті показано залежність надійності системи від частоти поверхових оглядів. Для досягнення нормованих значень надійності частота оглядів є функцією від зношення обладнання й не є константою. Наведено розрахунки щодо необхідності збільшення оглядів для підтримання надійності системи на належному рівні. Підвищення частоти оглядів призводить до зростання вартості обслуговування енергосистеми, у наслідок чого зростає собівартість електричної енергії. Пропонуємо використовувати безпілотні літальні апарати для проведення поверхових оглядів, визначення місця аварії. Показано, що використання безпілотних літальних апаратів дозволить збільшити кількість і якість оглядів, завдяки цьому підвищиться надійність електроенергетичної системи й відповідно зменшиться собівартість транспортування електричної енергії.*

**Ключові слова:** система електропостачання, надійність, якість електричної енергії, безпілотні літальні апарати, моніторинг, вартість транспортування електричної енергії.

### **Вступ**

В Україні використовують значну кількість об'єктів енергетики, які потребують постійного нагляду. Для виконання таких обов'язків функціонують системи телеметрії й бригади обходчиків. Останнім часом оновлення технічних систем проходить низькими темпами, тому рівень зношуваності обладнання зростає [1, 4, 5, 8]. Високий рівень зношуваності призводить до зростання вірогідності аварійних станів, через які системи вимикають. Ситуація посилюється ще й тим, що штат оперативного персоналу потрібно збільшувати для обслуговування зношених систем, але енергокомпанії не тільки не збільшують штатні розклади оперативного складу, а навіть скорочують його, тому для підтримання енергосистеми в робочому стані необхідно розробити нові технології [2, 3], що дозволять, не збільшуючи кількість персоналу, підвищити вірогідність визначення місця аварії, її характер.

**Метою роботи** є розроблення заходів з обслуговування електричних мереж і енергетичних систем за допомогою безпілотних літальних апаратів і доведення економічних переваг зазначеної технології над традиційною.

**Результати дослідження**

Серед усіх об'єктів енергетики України розглянуто такі:

- об'єкти генерації (гідроелектростанції, теплові станції, атомні станції);
- станції перетворення енергії;
- електричні мережі.

Для цих об'єктів характерне значне зношення (таблиця 1, таблиця 2).

Таблиця 1

**Стан гідроелектростанцій із потужністю понад 10 МВт**

№	Назва ГЕС	Установлена потужність, МВт	Річне вироблення, млн. кВт год	Рік уведення останнього блоку
1	Дніпровська	1 548	4 008	2008
2	Дністровська-1	702,0	865	1983
3	Кременчуцька	682,8	1 516	1960
4	Канівська	444,0	972	1975
5	Київська	408,5	790	1968
6	Середньодніпровська	352,0	1 328	2008
7	Каховська	351,0	1 489	1956
8	Дністровська-2	40,8	-	2000
9	Теребля-Ріка	27,0	123	1956
10	Олександрівська	11,5	30	1999
	Разом	4 491,4	>11 111	

На прикладі однієї енергетичної компанії покажемо стан зношення обладнання. Ситуація із станом обладнання щодо перерозподілу й постачання електричної енергії подібна й на інших обленерго [7].

Таблиця 2

**Кількість елементів підстанцій і їхній стан зношення**

№	Назва	Кількість, од.	Зношення, %
1	Силові трансформатори (110 кВ)	173	88
2	Силові трансформатори (35 кВ)	332	93
3	Силові трансформатори (6 – 10 кВ)	12947	64
4	Вимикачі (6 – 110 кВ)	7435	22
5	Комплекти ОД і КЗ (110 кВ)	84	100
6	Комплекти ОД і КЗ (35 кВ)	63	100
7	РП (6 – 10 кВ)	272	82

**Залежність частоти аварій від зношення обладнання**

Залишковий ресурс: Сумарне напрацювання об'єкта від моменту контролю його технічного стану до переходу в граничний стан, залишковий ресурс (залишкове напрацювання до відмови, залишковий термін служби) є індивідуальними показниками надійності (довговічності, безвідмовності), що відображають фактичну тривалість експлуатації певного об'єкта до моменту, коли об'єкт досягне граничного стану, відмовить або подальша експлуатація об'єкта стане недоцільною. Правила доцільності побудовані за економічними критеріями й критеріями безпеки.

Граничний стан об'єкта може характеризуватися:

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

Відповідно до нормативу (ГОСТ 27.502-83), існує необхідна кількість оглядів і ремонтів для обладнання. Нормована кількість оглядів зумовлена вимогами надійності.

Із цих нормованих трудовитрат вираховують кількість персоналу необхідного для обслуговування певної системи або обладнання. Розрахунок кількості оглядів виконують за нормативними документами (наприклад, ГОСТ 27.502-83)

Під час розрахунку визначають мінімальний обсяг статистичної інформації, за яким із необхідною вірогідністю можна одержати показники надійності елементів системи електропостачання. Відповідно до ГОСТ 27.502-83, методи визначення мінімального числа об'єктів спостережень можуть бути параметричними (за умови відомого виду закону розподілу досліджуваної випадкової величини) і непараметричними (вид закону розподілу невідомий).

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

Імовірність безвідмовної роботи виражається через щільність імовірності  $f(t)$  у такий спосіб

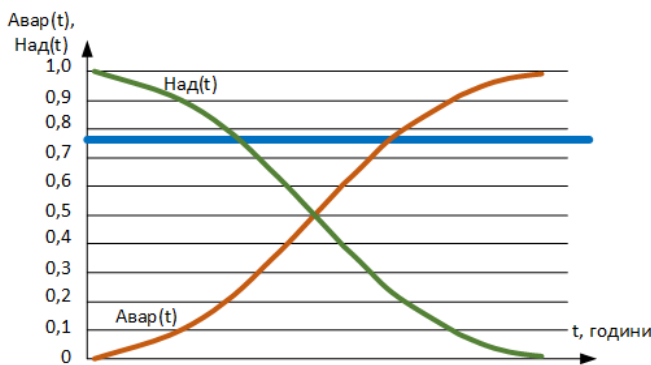
$$\text{Над}(t) = \int_e^{\infty} f(t)dt$$

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

$$\text{Авар}(t) = \int_{-\infty}^t f(t)dt$$

Повна група подій представляє

$$\text{Над}(t)+\text{Авар}(t)=1.$$



На графіку (Рис. 1) показано зміну ймовірності безвідмовної роботи системи залежно від часу експлуатації. Із графіка видно, що ймовірність відмов нарощується поступово. Технічними показниками зростання ймовірності відмови є поступове погіршення надійності блоків системи. І під час навантаження, яке перевищує можливості зношеного елемента,

Рис. 1. Графік зміни ймовірності безвідмовної роботи  
Наукові праці ВНТУ, 2020, № 1

стається відмова елемента (ланки), через це погіршення роботи або відмова всієї системи.

Для варіантів коли обладнання не досягло стану групи 3 (рис. 1) і якщо поверхневий огляд проводять один раз на рік, можна оцінити стан і передбачити слабкоплинні процеси зносу обладнання. Але частіше таким чином просто фіксують нормальний робочий стан обладнання.

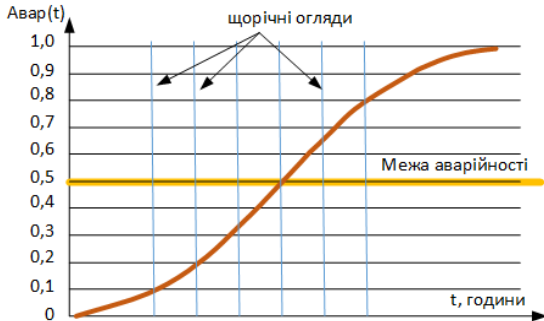


Рис. 2. Графік відмов обладнання і періодичні огляди на обладнанні із значним зносом

Зрозуміло, що огляди призначені виявити різке зростання  $\Delta Aвар(t)$  або виявити рівень  $Aвар(t)$  який може відповідати величинам аварійності, тому необхідно збільшити частоту річних оглядів для досягнення необхідних значень  $\Delta Aвар(t)$ . Чим більш зношене обладнання, тим частіше треба проводити огляди.

$$N = f(Aвар(t))$$

Визначаємо необхідну кількість оглядів для забезпечення надійності щодо

попередження відмов.

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

Запишемо прирощення функції відмов для початкового часу  $t_0$ :

$$\Delta Aвар(t_0) = Aвар(t_0 + \Delta t) - Aвар(t_0)$$

Але це прирощення має відбутися за певний проміжок часу  $\Delta t$

$$\frac{\Delta Aвар(t_0)}{\Delta t} = \frac{Aвар(t_0 + \Delta t) - Aвар(t_0)}{\Delta t},$$

то отримаємо похідну від функції  $Aвар(t)$

При спрямуванні  $\Delta t$  до нуля, отримаємо

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

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

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

У графічному представленні

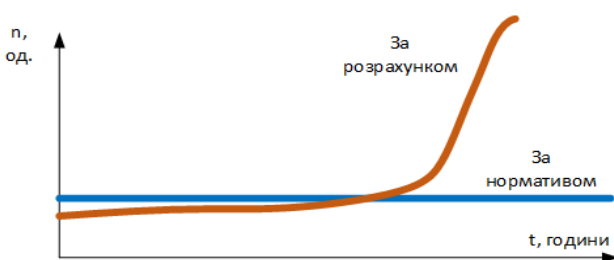


Рис. 3. Графік оглядів за нормативом і за розрахунком  
Наукові праці ВНТУ, 2020, № 1

Зрозуміло, що кількість оглядів для підтримання (попередження) відмов на заданому рівні має зростати відповідно до зростання функції відмов. І кількість оглядів повинно перевищувати нормативні значення для

зношеного обладнання.

Українська енергосистема має значне зношення обладнання [1, 4, 6, 7], тобто система оглядів на сьогодні не дозволяє забезпечити необхідний рівень безвідмовної роботи.

Як вихід із цієї ситуації пропонуємо ввести моніторинг ЛЕП за рахунок БПЛА. Частота обльотів лінії може бути частішою, аніж обходи бригад лінійного персоналу: завдяки цьому зменшується  $\Delta Aвар(t)$  і досягається необхідний рівень надійності системи.

Запропоноване рішення

Відповідно до запланованого обсягу обслуговування ЛЕП розрахункова потреба в БПЛА становить 1 комплекс на 150 км ЛЕП.

Вартість одного комплексу БПЛА складається із вартості квадрокоптера і обладнання. Квадрокоптер DJI Matrice 210 RTK V2 Combo, за даними [9], становить 326,4 тис. грн.



Рис. 4. Квадрокоптер DJI Matrice 210 RTK V2 Combo

Для виконання робіт за допомогою БПЛА необхідно найняти (перепідготувати) працівника із навичками пілотування й обслуговування такого обладнання.

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

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

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

$$B_5 = B_{річ} * 5 + B_{БПЛА}$$

$$B_5 = 326,4 + 201,36 * 5 = 1333,2 \text{ тис.грн.} = 1,33 \text{ млн.грн.}$$

Прибуткова частина використання БПЛА складається із частки аварій, яких удалося запобігти (вартості їхніх наслідків для споживача). Уважаємо, що частка від аварій, яких можна запобігти завдяки поверховим оглядам, становить 42 % від загальної кількості аварій. На прикладі однієї області обраховано збитки в зоні дії одного БПЛА можуть становити 1,3 млн. грн. на рік.

Тоді сума втрат, яких удалося уникнути завдяки БПЛА, становитиме:

$$Д = 1,3 * 0,42 = 0,55 \text{ млн. грн.}$$

Дохідна частина за п'ять років використання БПЛА становитиме:

$$Д5 = Д * 5 \text{ років} = 0,55 * 5 = 2,73 \text{ млн. грн.}$$

Термін окупності одного комплексу БПЛА становитиме  $V5/Д5 = 1,33/2,73 = 0,4872$  року.

### Висновки

Для підтримання регламентованого рівня надійності енергетичної системи необхідно використовувати змінну частоту поверхових оглядів, яка є функцією від зношення обладнання. Запропоновано використовувати поверхові огляди комплексами безпілотних літальних апаратів. Показано, що такі комплекси дозволять не тільки підтримати рівень надійності, але й зменшити витрати на підтримання системи, унаслідок цього зменшиться собівартість транспортування електричної енергії. Автори вважають напрям досліджень перспективним і продовжать роботу над розробкою подібних систем.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Використання безпілотників для підвищення безпеки та ефективності енергетичної системи / [С. І. Сокол, М. М. Резинкіна, О. Г. Гриб та ін.] ; під ред. С. І. Сокола. – Х. : ФОП Бровін О. В., 2020. – 148 с.
2. Економічна ефективність моніторингу ліній електропередач безпілотними літальними апаратами / [С. І. Сокол, М. М. Резинкіна, О. Г. Гриб та ін.] ; під ред. С. І. Сокола. – Х. : ФОП Бровін О. В., 2020. – 140 с.
3. Грабко В. В. Математична модель для коригування температурних зображень об'єктів при контролі електрообладнання / В. В. Грабко, В. В. Грабко // Міжвідомчий науково-технічний збірник. Електромашинобудування та електрообладнання. Тематичний випуск. Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія і практика. Київ : Техніка. – 2006. – С. 394 – 396.
4. Лист ДП «НАЕК «Енергоатом» «Про надання інформації» №11673 від 16.08.2013 р. [Електронний ресурс] / Режим доступу: <http://necu.org.ua/wp-content/uploads/2017/04/vidpovid-ea-2013.pdf>.
5. Постанова Кабінету Міністрів України від 7 грудня 2011 р. № 1270 «Про затвердження Комплексної (зведеної) програми підвищення рівня безпеки енергоблоків атомних електростанцій» [Електронний ресурс] / Режим доступу : <http://zakon0.rada.gov.ua/laws/show/1270-2011-%D0%BF>.
6. Sustainability criteria for hydropower development [Електронний ресурс] / Режим доступу : <https://bankwatch.org/publications/sustainability-criteria-hydropower-development>.
7. Аналітичний центр досліджень енергетики [Електронний ресурс] / Режим доступу : <http://eircenter.com/>.
8. Перехід України на відновлювану енергетику до 2050 року / [О. Дячук, М. Чепелев, Р. Подолець, Г. Трипольська та ін.] ; за заг. ред. Ю. Огаренко та О. Алієвої // Представництво Фонду ім. Г. Бюлля в Україні. – Київ : Вид-во ТОВ «АРТ КНИГА», 2017. – 88 с.
9. Квадрокоптери України [Електронний ресурс] / Режим доступу : [https://store.drone.ua/product/kvadrokopter-matrice-210-rtk-v2-combo/?gclid=Cj0KCQiA-bjyBRCcARIsAFboWg1qESIws2Vba0YddnfxHFr3EdLcJiEEuhmLKFZ93UEhRUearpiKfvAaAhJCEALw\\_wcB](https://store.drone.ua/product/kvadrokopter-matrice-210-rtk-v2-combo/?gclid=Cj0KCQiA-bjyBRCcARIsAFboWg1qESIws2Vba0YddnfxHFr3EdLcJiEEuhmLKFZ93UEhRUearpiKfvAaAhJCEALw_wcB).

Рекомендована кафедрою Автоматизації та кібербезпеки енергосистем Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут».

Стаття надійшла до редакції 19.03.2020 р.

Стаття пройшла рецензування 28.03.2020 р.

**Гриб Олег Герасимович** – д. т. н., проф., завідувач кафедри Автоматизація та кібербезпека енергосистем.

**Карпалюк Ігор Тимофійович** – к. т. н, доц., доцент кафедри Автоматизація та кібербезпека енергосистем; e-mail: [humpway@gmail.com](mailto:humpway@gmail.com).

**Швець Сергій Вікторович** – к. т. н., доц., доцент кафедри Автоматизація та кібербезпека енергосистем.

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут».

**Захаренко Наталя Сергіївна** – канд. економ. наук, доцент кафедри економіки підприємств.

Державний вищий навчальний заклад "Приазовський державний технічний університет".