

ОЦІНКА КОМБІНОВАНОГО ЕЛЕКТРОЖИВЛЕННЯ СИСТЕМ БЕЗПЕРЕРВНОГО СПОСТЕРЕЖЕННЯ НА БАЗІ ДРОНІВ

¹Національний університет «Чернігівська політехніка»

Запропоновано систему безперервного спостереження на основі кількох дронів, які працюють за певним алгоритмом: поки одні дрони залишаються в повітрі для спостереження, інші підзаряджаються на землі та замінюють ті, що потребують підзарядки. Вказана система обладнана комбінованою системою електрозабезпечення, яка базується на основній та допоміжній системах. Основна система електрозабезпечення ґрунтується на використанні електроенергії, згенерованої від фотоелектричної системи та системи збереження енергії (акумуляторної батареї). Водночас допоміжна система живиться змінним струмом та використовує електроенергію від промислових електромереж.

У статті досліджені часові та енергетичні характеристики зарядної станції для дронів. Обґрунтована модель спостереження, яка враховує порядок розміщення дронів, параметри їхнього цільового спорядження та зону спостереження. Створена математична модель визначення електроспоживання системою впродовж безперервного спостереження.

Проведено моделювання, за результатами якого визначено кількість сонячних панелей фотоелектричної системи, що залежить від різних груп периметрів спостереження, що забезпечує універсальність системи безперервного спостереження для різної місцевості. Результати моделювання показують, що для периметрів від 7297 м² до 17140 м² оптимальною кількістю сонячних панелей буде від 55 до 75, для периметрів від 24155 м² до 33206 м² оптимальною кількістю сонячних панелей буде від 206 до 450, також для периметрів від 36260 м² до 40758 м² оптимальною кількістю сонячних панелей буде від 424 до 1182. Визначені характеристики системи накопичення енергії для використання в часи низького генерування від фотоелектричної системи.

Окремим результатом моделювання визначено, що зменшення загальної кількості сонячних панелей, призводить до необхідності компенсації недостатку електроенергії від мережі максимум на 18 % від загальної необхідної кількості електроенергії, що споживає система безперервного спостереження. Для забезпечення електроенергією системи в період недостатнього генерування від сонячних панелей та живлення від мережі використовується система збереження енергії.

Ключові слова: безперервне спостереження, електрозабезпечення, електроспоживання, фотоелектрична система, дрони, безпілотні літальні апарати, моделювання.

Вступ

Безпілотні літальні апарати, відомі як дрони, знаходять дедалі ширше застосування: від зйомки відеокліпів до використання як розвідників або «камікадзе» в бойових діях. Однією з новітніх сфер застосування є спостереження для охорони, моніторингу поширення стихійних лих або забруднення повітря. Спостереження може проводитися як для окремих об'єктів, так і за визначеними маршрутами, обмежено у часі або безперервно. Для забезпечення безперервного спостереження використовуються кілька дронів, які працюють за певним алгоритмом: поки одні дрони залишаються в повітрі для спостереження, інші підзаряджаються на землі та замінюють ті, що потребують підзарядки.

Такий підхід дозволяє здійснювати безперервне спостереження, використовуючи різні способи живлення для зарядки дронів. Проте, у віддалених регіонах з обмеженнями доступу до електричних мереж, система вимагає рішень де забезпечується автономне або, у випадку наявності деяких потужностей електромереж, комбіноване живлення з частковим доповненням від промислової

електромережі. Досягнення високого рівня автономності можливе за допомогою комбінації відновлюваних джерел енергії, таких як фотоелектричні системи, і системи збереження енергії (СЗЕ) — акумуляторні батареї. У такому випадку актуальними задачами стають задачі підвищення автономності шляхом розрахунку оптимальних режимів роботи системи електрозабезпечення з

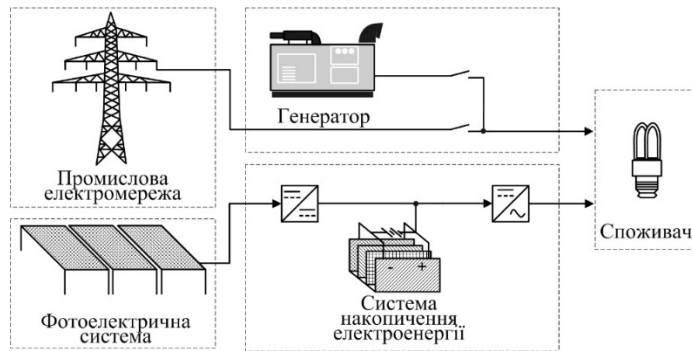


Рис. 1. Узагальнена концепція комбінованої системи електрозабезпечення

урахуванням профілів польоту та споживання енергії дронами, ефективності фотоелектричної системи та системи збереження енергії.

Узагальнена концепція комбінованої системи електрозабезпечення, яка використовує як підключення до промислової електромережі, так і електроенергії, що генерується від відновлюваних джерел енергії, показана на рис. 1.

З вищезазначеного випливає, що станом на зараз є актуальним питання забезпечення автономності енергоза-

безпечення системи безперервного спостереження на основі дронів, оскільки саме це впливає на можливості функціонування системи в умовах невизначеності енергозабезпечення.

Побудова моделей автономних та комбінованих систем електроживлення для різних застосувань є предметом інтенсивних досліджень науковців усього світу. Серед багатьох наукових публікацій варто звернути увагу на такі результати.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Однією з найбільших станом на сьогодні сфер застосування автономних енергетичних систем є енергозабезпечення зарядних станцій електромобілів. Зокрема, в роботі [1] авторами запропоновано модель системи заряджання електромобілів, з використанням електроенергії, що генерується фотоелектричною системою. Натурним експериментом виявлено, що найбільше навантаження на систему спостерігається вранці, коли сонячна електростанція не виробляє достатньої кількості електроенергії для зарядки електромобілів. В дослідженні в наслідок економічних обмежень не враховувалось довготривале забезпечення системи за допомогою акумуляторних батарей, а також відсутній розрахунок кількості фотоелектричних перетворювачів (ФЕП) та додаткової енергії з мережі, яка повинна компенсувати недостачу енергії від ФЕП. В роботах [2]—[6] дослідження сфокусовані на моделюванні гібридної системи для заряджання електромобілів, де кількість сонячних панелей обмежується доступною площею паркувального місця, а в деяких випадках — також і формою навісів для авто. Для такої зарядної станції система використовує в основному електроенергію від мережі і меншою мірою — від фотоелектричної системи. Авторами пропонується заряджати електромобілі повільнішими методами, щоб зменшити витрати на використання електроенергії від мережі з причин її високої вартості. В продовження цього питання, автори досліджень [7]—[9] висвітлюють проблему неузгодженості кількості електроенергії що генерується фотоелектричною системою та прибуття електромобілів (споживачів) на зарядну станцію. Це проблемне питання пропонується вирішувати за допомогою методів глибокого навчання системи, в результаті якого планується корегувати стан заряду системи збереження енергії.

Ще однією сферою автономних та гібридних енергетичних систем є енергозабезпечення віддалених телекомунікаційних веж. В статтях [10]—[12] запропоновано модель невеликої гібридної енергетичної системи, де використовуються ФЕП, дизельний генератор та СЗЕ. В дослідженні визначена потреба в потужності та необхідна кількість електроенергії для компенсації від дизельного генератора. Результати дослідження показують про ефективність зазначених систем, проте невирішеною залишається проблематика зміни потужності споживачів, одночасно повністю енергонезалежність системи за допомогою сонячних електростанцій не забезпечується через використання дизельного генератора, який вимагає дозаправлення та обслуговування. На відміну від попередніх робіт, автори статей [13], [14] розраховували повністю енергонезалежну систему з забезпечення електроенергією групу телекомунікаційних веж за допомогою фотоелектричних систем. Вказані системи за результатами моделювання показують задовільні результати автономного енергозабезпечення, проте не враховують можливі оновлення штатного обладнання систем та за-

безпечення адаптивності енергетичної системи.

Значним сегментом застосувань є системи спостереження для охорони, моніторингу поширення стихійних явищ, забруднення повітря, та доставлення з дронів. Зокрема, в статті [15] авторами запропоновано модель автономної системи для знищення комах в деяких регіонах Азії та Африки за допомогою дронів. Система використовує невелику фотоелектричну станцію для заряджання дронів. Але в дослідженні використання системи обмежене п'ятьма місяцями автономної роботи за умови використання в день з 10 ранку до 10 вечора. В свою чергу, авторами робіт [16], [17] розроблено фотоелектричну систему для живлення системи бездротового заряджання дронів, які здійснюють моніторинг місцевості. Дослідниками обмежено фотоелектричну систему площею поверхні даху, на якому вона розміщувалась, тому така модель автономної системи не дозволяє забезпечити повну автономність. Авторами досліджень [18], [19] розроблено систему бездротового заряджання дронів з доставлення комерційних товарів. Живлення зарядних пристроїв забезпечується шляхом фотоелектричної системи, модель якої створена з метою забезпечення максимально автономної системи з доставлення та заряджання. В моделі зроблено акцент саме на бездротову систему заряджання, однак, математична модель фотоелектричної системи не враховувала зміни погодних умов та інсоляції впродовж року.

Таким чином, проведений аналіз останніх досліджень та публікацій щодо моделей ефективної автономних та гібридних систем електроживлення в основних сферах їхнього застосування, говорить про те, що подібна задача вже розв'язана, зокрема для заряджання електромобілів, віддалених телекомунікаційних веж та енергетичних систем для заряджання дронів. За результатами огляду встановлено, що науковцями вже запропоновано різні методи забезпечення автономності, які базуються на використанні систем ФЕП, генераторів, СЗЕ, та електроенергії від промислових електромереж. Адаптивність систем може забезпечуватися за допомогою інтелектуальних алгоритмів (зокрема, використання нейронних мереж) та техніко-економічного аналізу споживання. Таким чином, результати опублікованих досліджень дають комплексне розуміння способів забезпечення автономності, а також прокладають шлях для майбутніх досліджень у сферах інтеграції відновлюваних джерел електричної енергії для реалізації автономного та напівавтономного електроживлення систем безперервного спостереження за допомогою дронів.

Метою роботи є оцінка електроживлення систем безперервного спостереження на базі дронів в автономному та комбінованому режимах.

Концептуальна модель системи електрозабезпечення

Запропоновано систему безперервного спостереження на основі дронів, з кількома секціями спостереження. Одна секція включає в себе два елементи: зарядну станцію та визначену зону спостереження для дронів, які заряджаються у ній. Схема системи безперервного спостереження на базі дронів з комбінованою системою живлення показана на рис. 2. Вона складається з двох систем електрозабезпечення — основної та допоміжної. Основна система електрозабезпечення ґрунтується на використанні електроенергії, згенерованої фотоелектричною системою (ФЕС) та СЗЕ. Враховуючи те, що акумуляторні батареї дронів заряджаються постійним струмом, як проміжну ланку в системі запропоновано використовувати ланку постійного струму. Таким чином, всі перетворювачі в системі, що забезпечують інтеграцію зарядних пристроїв, ФЕС та СЗЕ,

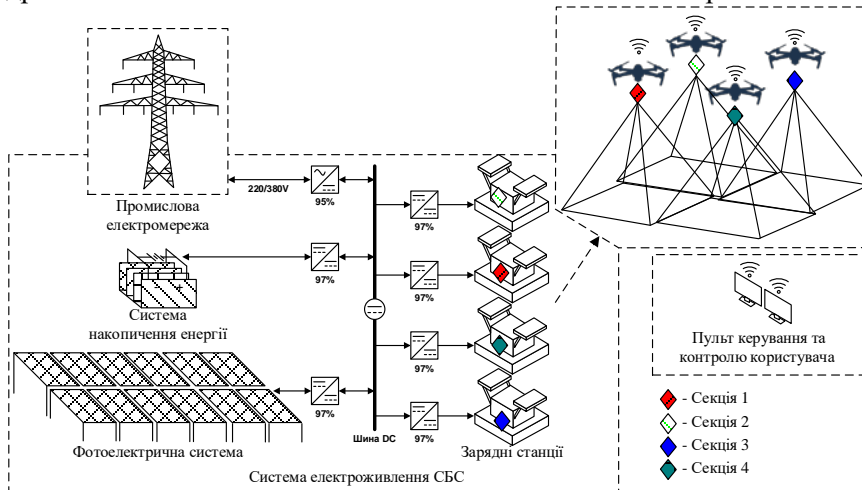


Рис. 2. Схема системи безперервного спостереження на базі дронів з комбінованою системою живлення

будуть DC-DC перетворювачами. В свою чергу, допоміжна система змінного струму використовуватиме електроенергію від промислових електромереж, яка за допомогою ізолюваного AC/DC пере-

творювача — основної та допоміжної. Основна система електрозабезпечення ґрунтується на використанні електроенергії, згенерованої фотоелектричною системою (ФЕС) та СЗЕ. Враховуючи те, що акумуляторні батареї дронів заряджаються постійним струмом, як проміжну ланку в системі запропоновано використовувати ланку постійного струму. Таким чином, всі перетворювачі в системі, що забезпечують інтеграцію зарядних пристроїв, ФЕС та СЗЕ,

творювача буде підключатися до проміжної шини постійного струму. Типовий к.к.д. кожного елемента в системі показаний на рис. 2 під зображенням відповідного перетворювача, як видно, за рахунок використання ланки постійного струму запропонована система матиме вищий к.к.д., у порівнянні з перетворенням у змінний струм та навпаки.

В запропонованій системі ФЕС за наявності достатньої вихідної потужності, яка залежить від кількості ФЕП, коефіцієнта інсоляції, та навантаження (кількість зарядних пристроїв для дронів, які використовуються) буде одночасно здійснювати як живлення зарядних пристроїв для дронів, так і накопичення залишків енергії у СЗЕ. У випадку відсутності інсоляції, або зниження потужності фотоелектричної системи, живлення зарядних пристроїв для дронів здійснюватиме СЗЕ. Промислова електромережа, у випадку її наявності, за необхідності, забезпечуватиме компенсацію нестачі енергії для живлення зарядних пристроїв дронів від основної системи електрозабезпечення, та слугуватиме для відведення залишків електроенергії від основної системи в мережу за умови повного зарядження СЗЕ та енергії від ФЕП більшої ніж потрібно для зарядження дронів.

На рис. 3 показано відповідну діаграму станів системи електроживлення та переходи між ними.

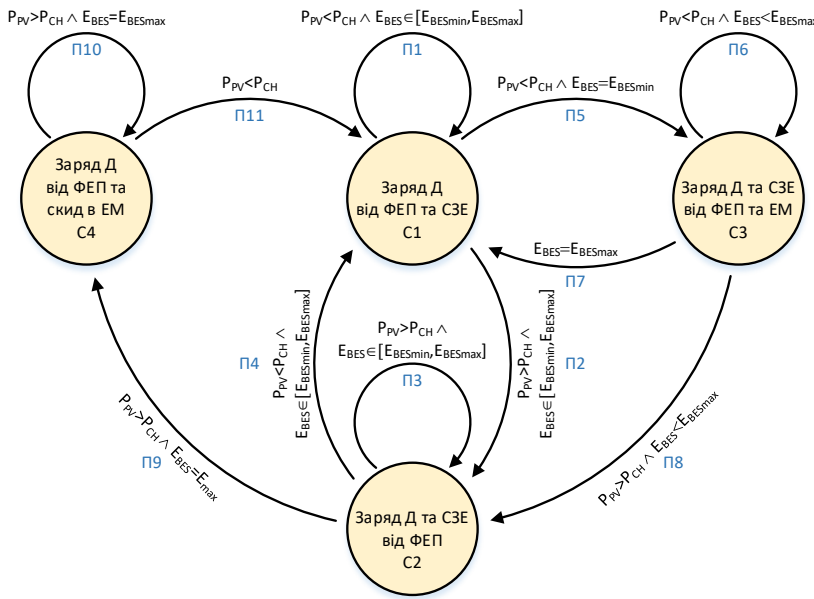


Рис. 3. Діаграма станів комбінованої системи електроживлення

Пі на рис. 3). У випадку, коли потужність ФЕС перевищить необхідну для зарядження дронів потужність, то система перейде (П2) у С2, в якому ФЕС буде заряджати дрони та СЗЕ одночасно, залишаючись у цьому стані (П3) до зміни умов. Якщо потужність від ФЕС впаде нижче за необхідну для зарядження дронів, система знову повернеться в С1 (П4), й СЗЕ знову працюватиме в режимі розрядження. Якщо ж рівень заряду СЗЕ впаде до мінімального, й потужності від ФЕП не вистачатиме для зарядження дронів, необхідне примусове підключення до електромережі (П5 у С3), та використання її для зарядження СЗЕ, поки рівень заряду СЗЕ буде меншим за повний (П6). Вихід з цього стану можливий або у випадку повної зарядки СЗЕ (П7 до С1) й переходу на живлення від неї, або, у випадку збільшення потужності ФЕС до рівня, достатнього для зарядження всіх дронів (залишок витратиться на підзарядку СЗЕ) — П8 у С2. У випадку, якщо енергії від ФЕС буде більше ніж необхідно, і СЗЕ буде повністю заряджена, залишок енергії буде передаватися в мережу (П9 у С4), де система буде залишатися (П10) до поки ФЕС вироблятимуть менше, ніж необхідно енергії, й система перейде (П11) у основний стан С1, коли для зарядження дронів будуть одночасно використовуватися ФЕС та СЗЕ. Варто зазначити, що запропонований алгоритм роботи реалізує максимальне використання СЗЕ та ФЕС, а живлення від мережі відбувається лише у випадку відсутності достатньої кількості енергії в основній системі.

Визначення параметрів компонентів електроспоживання

Найважливішим елементом споживання системи безперервного спостереження є робота зарядних станцій дронів. Модель роботи зарядних станцій дронів включає в себе два стани:

- зарядження мінімальної кількості дронів;
- зарядження максимальної кількості дронів.

Для визначення параметрів споживання зарядних станцій дронів припущено що всі дрони, що є на зарядних станціях, заряджаються безперервно.

Мінімальна кількість дронів на зарядній станції буде спостерігатись коли виконується один цикл заміни дрона, що включає в себе зліт дрона (n), який замінить дрон що вже розрядився ($n + 1$), політ зі швидкістю S_{hor} на дальність x_{dmax} та повернення дрона ($n + 1$) зі швидкістю S_{hor} на дальність x_{dmax} в точку посадки. Алгоритм одного циклу заміни дрона показано на рис. 4.

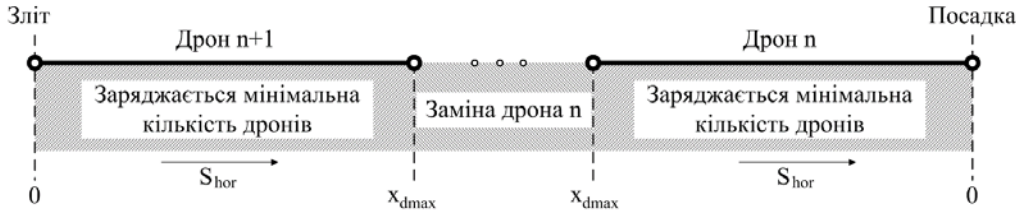


Рис. 4. Алгоритм одного циклу заміни дрона

Враховуючи наведений алгоритм, кількість часу за один цикл польоту, під час якого на зарядній станції заряджається мінімальна кількість дронів, визначається за формулою

$$T_{mc} = 2 \frac{x_{dmax}}{S_{hor}}, \quad (1)$$

де x_{dmax} — дальність до точки спостереження, м; S_{hor} — горизонтальна швидкість дрона, м/с.

Загальна кількість циклів польоту визначається як відношення кількості часу безперервного спостереження (24 години) на максимальний час польоту одного дрона з урахуванням резервного залишку за формулою

$$n_{one} = \frac{T_{cont}}{T_{one} - (T_{one} \cdot SOC_{min})}, \quad (2)$$

де T_{cont} — час безперервного спостереження, хв; T_{one} — максимальний час польоту одного дрона, хв; SOC_{min} — зарезервованний залишок батареї дрона (зазвичай 0,2 або 20 %).

Максимальний час польоту одного дрона (T_{one}) залежить від струму споживання в кожен проміжок польоту в точку спостереження. На струм споживання дрона впливає значна кількість чинників, які пропонується визначити в окремому дослідженні. Для спрощення моделі в розрахунках прийнято номінальний струм споживання. Максимальний час польоту за номінальних значень струму споживання, в більшості випадків надається в документації виробниками дронів.

Враховуючи наведене, в рамках безперервного спостереження, загальний час, необхідний для зарядки мінімальної кількості дронів, визначатиметься за формулою

$$T_{1sec} = T_{mc} \cdot n_{one}. \quad (3)$$

Тоді загальний час, використаний для зарядки максимальної кількості дронів, буде розраховуватись за формулою

$$T_{2sec} = T_{cont} - T_{1sec}. \quad (4)$$

Кількість дронів, які одночасно можуть бути в повітрі, обмежується відповідно до забезпечення ефективної роботи системи безперервного спостереження та не може бути більше двох на одну секцію. Відповідно кількість зарядних станцій однієї секції, що постійно працюють, можна розрахувати за формулами

$$c_{min} = r - 2, \quad (5)$$

$$c_{max} = r - 1, \quad (6)$$

де r — кількість дронів, що знаходяться в циклі секції, од; c_{max} — максимальна кількість дронів, що одночасно заряджаються, на секцію, од; c_{min} — мінімальна кількість дронів, що одночасно заряджаються, на секцію, од.

Потужність зарядного пристрою зарядної станції, в одній секції, з урахуванням к.к.д перетво-

ривачів зарядних пристроїв розраховується за формулою

$$P_{1s} = \frac{I_{ch} \cdot U_{ch} \cdot c_{\min}}{\eta_{ch}}; \quad (7)$$

$$P_{2s} = \frac{I_{ch} \cdot U_{ch} \cdot c_{\max}}{\eta_{ch}}, \quad (8)$$

де U_{ch} — напруга зарядки в режимі CV, В; η_{ch} — к.к.д. перетворювача зарядних пристроїв ($\eta_{ch} = 0,97$).

Визначення основних параметрів елементів системи

Модель спостереження ґрунтується на умові, що кожна ділянка зони спостереження повинна бути постійно в полі зору камери дрона. В такому випадку дрони зависають кожен в своїх заздалегідь визначених координатах і розміщуються у відповідних секціях вздовж периметра спостереження, відповідно до заздалегідь визначеної схеми польоту.

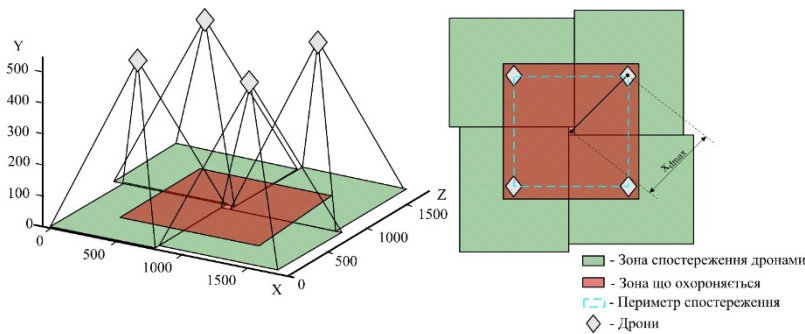


Рис. 5. Положення дронів для перекриття периметром 1×1 кілометр

Приклад розміщення дронів для перекриття зони, що охороняється, в 1×1 кілометр чотирма секціями зображено на рис. 5.

Зону, що охороняється, визначено форми квадрата, зарядна станція дронів знаходиться в середні зони, що охороняється. Периметр спостереження визначається за формулою

$$L = 4x_{d \max} \cdot \sqrt{2}. \quad (9)$$

Кут горизонтального огляду бортової відеокамери дрона використовується для розрахунку кількості секцій

$$x = \frac{L}{2y_d \cdot \operatorname{tg}\left(\frac{\alpha}{2}\right)}, \quad (10)$$

де y_d — висота польоту, м; α — горизонтальний кут огляду бортової відеокамери, град.

За несприятливих погодних умов таких як опади, туман, низька хмарність y_d зменшується.

Враховуючи кількість секцій та споживання енергії зарядними пристроями, визначається загальне споживання енергії протягом безперервного спостереження за формулами

$$E_1 = x \cdot P_{1s} \cdot T_{1\text{sec}}; \quad (11)$$

$$E_2 = x \cdot P_{2s} \cdot T_{2\text{sec}}; \quad (12)$$

де P_{sn} — потужність що витрачається під час заряджання максимальної та мінімальної кількості дронів, Вт.

Необхідна потреба в електроенергії для забезпечення сталого споживання системою за час безперервного спостереження визначається за формулою

$$E = E_1 + E_2. \quad (13)$$

Таким чином ємність акумуляторної батареї, для забезпечення повної автономності можна визначити за формулою

$$Q_{bat} = \frac{Ek}{V_{\min_bat} \cdot \eta_{ps_bat}}, \quad (14)$$

де k — коефіцієнт врахування глибини розряду ($k = 1,2$); V_{\min_bat} — мінімально-допустима напруга батареї, В; η_{ps_bat} — к.к.д. перетворювача електроенергії від батареї до шини DC ($\eta_{ps_bat} = 0,97$).

Для досягнення автономності системи пропонується використання фотоелектричної системи,

кількість сонячних панелей в якій визначається за формулою

$$k_s = \frac{E \cdot 0,001}{Ins \cdot S_{PV} \cdot \eta_{PV} \cdot 0,01 \cdot \eta_{ps_pv}}, \quad (15)$$

де k_s — необхідна кількість сонячних панелей для місяця s , од; η_{PV} — ефективність сонячної панелі, %; Ins — показник сонячної інсоляції за місяць, кВт·год/м²/день; S_{PV} — площа модуля сонячної електростанції, ефективність модуля сонячної електростанції, м²; η_{ps_pv} — к.к.д. перетворювача електроенергії від ФЕС до шини DC ($\eta_{ps_pv} = 0,97$).

Моделювання системи безперервного спостереження

З метою виявлення закономірностей та їхніх співвідношень з поставленими завданнями дослідження проведено моделювання системи безперервного спостереження на основі запропонованої математичної моделі.

Визначено характеристики електроспоживання зарядних пристроїв дронів та параметри системи збереження енергії.

Вихідні дані для моделювання подано в таблиці.

Вихідні дані для моделювання

Параметр	Значення	Коефіцієнти інсоляції Ins , кВт·год/м ² /день	
		Місяць	Значення
Ємність АКБ дрона, Q	5000 мАг	Місяць	Значення
Струм на виході з зарядного пристрою дрона, I_{ch}	5 А	січень	2,04
Напруга на виході з зарядного пристрою дрона, U_{ch}	17,6 В	лютий	3,3708
Горизонтальна швидкість, S_{hor}	10 м/с	березень	5,193
Максимальний час польоту дрону, T_{one}	46 хв (може змінюватись в холодну пору року та внаслідок старіння)	квітень	6,578
Мінімальна напруга батареї, V_{min_bat}	51,2 В	травень	7,758
Коефіцієнт врахування глибини розряду батареї, k	1,2	червень	8,185
Ефективність панелі, η_{PV}	15,5 %	липень	7,889
Площа однієї панелі, SPV	1,6 м ²	серпень	6,693
К.к.д перетворювачів зарядних пристроїв дронів, η_{ch}	0,97	вересень	5,56
К.к.д перетворювача АС до шини DC, η_{ps_ac}	0,95	жовтень	3,8406
К.к.д перетворювача СНЕ до шини DC, η_{ps_bat}	0,97	листопад	2,543
К.к.д перетворювача ФЕС до шини DC, η_{ps_pv}	0,97	грудень	1,82

Отримані результати моделювання дозволяють виділити три групи результатів, за яких забезпечується робота системи від основної та допоміжної системи електрозабезпечення. Дані та результати групування периметрів подано на рис. 6.

Результати моделювання показують, що для периметрів від 7297 м² до 17140 м² оптимальною кількістю сонячних панелей буде від 55 до 75, для периметрів від 24155 м² до 33206 м² оптимальною кількістю сонячних панелей буде від 206 до 450, тоді як для периметрів від 36260 м² до 40758 м² оптимальною кількістю сонячних панелей буде від 424 до 1182.

Створена модель дозволяє визначити кількість електроенергії що потрібно доповнити з мережі за умови зменшення кількості задіяних сонячних панелей фотоелектричної системи. Дані, які враховують річне споживання енергії, показані на рис. 7.

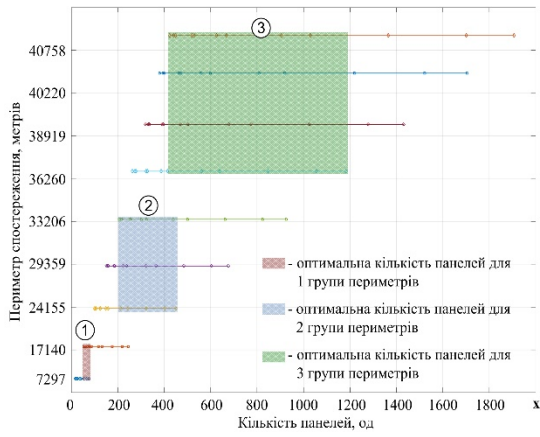


Рис. 6. Дані моделювання кількості сонячних панелей та результати групування

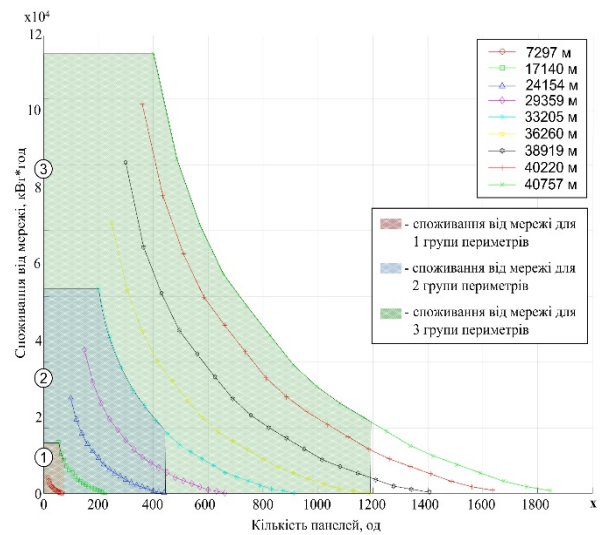


Рис. 7. Дані моделювання споживання енергії від мережі та результати групування периметрів

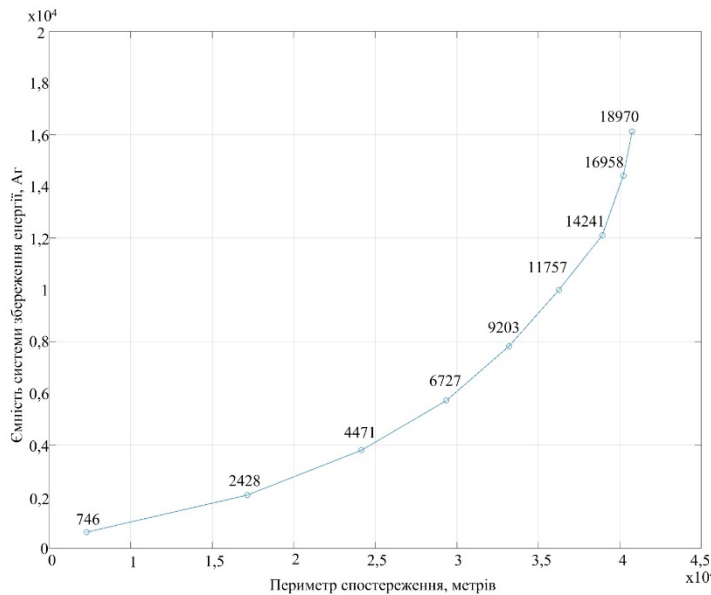


Рис. 8. Залежність ємності акумуляторної батареї від периметра спостереження

забезпечувати працездатність системи впродовж 24 годин. Для визначених периметрів спостереження ємність такої акумуляторної батареї становила від 793 А·год до 20162 А·год.

Висновки

За результатами аналізу літературних джерел та напрацювань інших авторів, в роботі створено модель електрозабезпечення, яка базується на основній та допоміжній системі, і відповідно до алгоритму функціонування дозволяє системі безперервного спостереження забезпечувати виконання завдань за призначенням в умовах невизначеності енергопостачання. Створена модель електроспоживання на основі визначення часових та енергетичних характеристики циклів польоту дронів та характеристик потужності зарядної станції.

Обґрунтована модель спостереження, яка враховує порядок розміщення дронів та параметри їхнього цільового спорядження, дозволяє визначити необхідну загальну кількість дронів, які використовуватимуться в системі, та зону спостереження.

За результатами моделювання визначені оптимальні характеристики основної та допоміжної системи електроживлення. Визначена кількість сонячних панелей фотоелектричної системи для різних груп периметрів, що забезпечують універсальність системи безперервного спостереження

для різної місцевості. Розраховані характеристики системи збереження енергії, що включає в себе акумуляторну батарею ємністю від 793 А·год до 20162 А·год для забезпечення працездатності системи впродовж 24 годин.

Водночас зменшення загальної кількості сонячних панелей призводить до необхідності компенсації нестачі електроенергії від мережі максимум на 18 % від загальної необхідної кількості електроенергії, яку споживає система безперервного спостереження впродовж всього року.

Результати моделювання можуть бути використані й для інших сфер застосувань шляхом зміни вихідних даних та характеристик електроспоживання та електроживлення, через що запропонована модель є універсальною.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- [1] M. Amir, Haque Zaheeruddin, A. F. I. Bakhsh, V.S.B. Kurukuru, and M. Sedighzadeh, *Intelligent energy management scheme-based coordinated control for reducing peak load in grid-connected photovoltaic-powered electric vehicle charging stations*. IET Gener. Transm. Distrib. 18, 1205-1222, 2024. <https://doi.org/10.1049/gtd2.12772>.
- [2] S. Cheikh-Mohamad, M. Sechilariu, F. Locment, and Y. Krim, *PV-Powered Electric Vehicle Charging Stations: Preliminary Requirements and Feasibility Conditions*. Appl. Sci. 2021, 11, 1770. <https://doi.org/10.3390/app11041770>.
- [3] A.J. Alrubaie, M. Salem, K. Yahya, M. Mohamed, and M. A. Kamarol, "Comprehensive Review of Electric Vehicle Charging Stations with Solar Photovoltaic System Considering Market," *Technical Requirements, Network Implications, and Future Challenges. Sustainability* 2023, 15, 8122. <https://doi.org/10.3390/su15108122>.
- [4] H. Fakour, M. Imani, Lo, SL. et al., "Evaluation of solar photovoltaic carport canopy with electric vehicle charging potential," *Sci Rep* 13, 2136 (2023). <https://doi.org/10.1038/s41598-023-29223-6>.
- [5] Mohamed Khalid, Henok Wolde, and Salma Alarefi, *Optimal Space Utilisation for Solar Powered EV Charging Station*. 562-567, 2020. <https://doi.org/10.1109/ENERGYCon48941.2020.9236538>.
- [6] H. K. Singh, and N. Kumar, "Solar PV Array Powered ON Board Electric Vehicle Charging with Charging Current Protection Scheme," in *2020 IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES)*, Jaipur, India, 2020, pp. 1-5, <https://doi.org/10.1109/PEDES49360.2020.9379820>.
- [7] F. Sun, et al., "Prediction-Based EV-PV Coordination Strategy for Charging Stations Using Reinforcement Learning," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 60, no. 1, pp. 910-919, Jan.-Feb. 2024, <https://doi.org/10.1109/TIA.2023.3326433>.
- [8] Y. Li, et al., "Multi-Agent Graph Reinforcement Learning Method for Electric Vehicle on-Route Charging Guidance in Coupled Transportation Electrification," *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, vol. 15, no. 2, pp. 1180-1193, April 2024, <https://doi.org/10.1109/TSTE.2023.3330842>.
- [9] M. Sharif, and H. Seker, "Smart EV Charging With Context-Awareness: Enhancing Resource Utilization via Deep Reinforcement Learning," *IEEE Access*, vol. 12, pp. 7009-7027, 2024, <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3351360>.
- [10] Jose, Jeffy Marin, and V. I. Cherian. "Analysis on solar PV based hybrid power solution for remote telecom towers." *International journal of advance research in Engineering Science and Technology*, 2.11, pp. 61-66, 2013.
- [11] D. Chandran, M. Joshi, and V. Agarwal, "Solar PV based retrofit solution for cell phone towers powered by diesel generators," in *2016 IEEE International Telecommunications Energy Conference (INTELEC)*, Austin, TX, USA, 2016, pp. 1-8, <https://doi.org/10.1109/INTLEC.2016.7749099>.
- [12] Janardhan Kavali, et al. "Performance Investigation of Solar Photovoltaic System for Mobile Communication Tower Power Feeding Application." *International Journal of Electrical & Electronics Research* 10.04, pp. 921-925, 2022.
- [13] Gerard Jansen, Zahir Dehouche, Richard Bonser, and Harry Corrigan, "Validation of autonomous renewable energy hybrid wind/photovoltaic/RHFC prototype for the cell tower industry using MATLAB/Simulink," *Materials Today: Proceedings*, vol. 10, p. 3, pp. 408-418, 2019. ISSN 2214-7853, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.03.004>.
- [14] Bahgaat, Naglaa & Salam, Nariman & Roshdy, Monika & Sakr, Sandy, "Design of Solar System for LTE Networks," *International Journal of Environmental Sustainability and Green Technologies*, no. 11, pp. 1-15. <https://doi.org/10.4018/IJESGT.2020070101>.
- [15] Essam Ali, Mohamed Fanni, Abdelfatah M. Mohamed "Design and task management of a mobile solar station for charging flying drones," in *E3S Web Conf.* 167 05004, 2020. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202016705004>.
- [16] P. K. Chittoor, and C. Bharatiraja, "Wireless Electrification System for Photovoltaic Powered Autonomous Drone Charging," *IEEE Transactions on Transportation Electrification*. pp. 1-1, 2023. <https://doi.org/10.1109/TTE.2023.3305022>.
- [17] Prithvi Krishna Chittoor, and C. Bharatiraja, "Building integrated photovoltaic powered wireless drone charging system," *Solar Energy*, vol. 252, pp. 163-175, 2023. ISSN 0038-092X, <https://doi.org/10.1016/j.solener.2023.01.056>.
- [18] D. Raveendhra, M. Mahdi, R. Hakim, R. Dhaouadi, S. Mukhopadhyay, and N. Qaddoumi, "Wireless Charging of an Autonomous Drone," in *2020 6th International Conference on Electric Power and Energy Conversion Systems (EPECS)*, Istanbul, Turkey, 2020, pp. 7-12, <https://doi.org/10.1109/EPECS48981.2020.9304971>.
- [19] P. K. Chittoor, B. Chokkalingam, and L. Mihet-Popa, "A Review on UAV Wireless Charging: Fundamentals, Applications," *Charging Techniques and Standards. IEEE Access*, no. 9, pp. 69235-69266, 2021.

Рекомендована кафедрою біомедичної інженерії та оптико-електронних систем ВНТУ

Стаття надійшла до редакції 12.07.2024

Лось Андрій Миколайович — аспірант кафедри електричної інженерії та інформаційно-вимірювальних технологій, e-mail: andriilos91@gmail.com ;

Велігорський Олександр Анатолійович — канд. техн. наук., доцент, завідувач кафедри радіотехнічних та вбудованих систем, e-mail: o.veligorskiy@stu.cn.ua .

Національний університет «Чернігівська політехніка», Чернігів

Evaluation of Combined Power Supply of Continuous Surveillance Systems Based on Drones

¹Chernihiv Polytechnic National University

The paper proposes a continuous monitoring system based on multiple drones, which operate according to a specific algorithm: while some drones remain airborne for surveillance, others recharge on the ground and replace those that need recharging. This system is equipped with a combined power supply system based on primary and auxiliary systems. The primary power supply system relies on electricity generated from a photovoltaic system and an energy storage system (battery). In its turn, the auxiliary system is powered by alternating current and uses electricity from industrial power grids.

The article examines the temporal and energy characteristics of the drone charging station. Monitoring model is substantiated, taking into account the placement order of the drones, the parameters of their target equipment, and the monitoring area. Mathematical model for determining the system's power consumption during continuous monitoring has been created.

Modeling has been conducted, the results of which determine the number of solar panels in the photovoltaic system, depending on different groups of monitoring perimeters, ensuring the versatility of the continuous monitoring system for various terrains. The modeling results show that for perimeters from 7297 m² to 17140 m², the optimal number of solar panels is from 55 to 75, for perimeters from 24155 m² to 33206 m², the optimal number of solar panels is from 206 to 450, in turn, for perimeters from 36260 m² to 40758 m², the optimal number of solar panels is from 424 to 1182. The characteristics of the energy storage system for use during periods of low generation from the photovoltaic system have been determined.

An additional result of the modeling determines that reducing the total number of solar panels leads to the need to compensate for the electricity deficit from the grid by a maximum of 18% of the total required electricity consumed by the continuous monitoring system. To supply the system with electricity during periods of insufficient generation from the solar panels and grid power, an energy storage system is used.

Keywords: continuous surveillance, power supply, energy consumption, photovoltaic system, drones, unmanned aerial vehicles, modeling.

Los Andrii M. — Post-Graduate Student of the Chair of Electrical Engineering, Information and Measuring Technologies, e-mail: andriilos91@gmail.com ;

Veligorskyi Oleksandr A. — Cand. Sc. (Eng.), Associate Professor, Head of the Chair of Radio Engineering and Embedded Systems, e-mail: o.veligorskiy@stu.cn.ua