

УДК 004.032.26:629.735.33

*Ткачук В.Ю., здобувач
Добржанський О.О. к.т.н., доцент
Державний університет «Житомирська політехніка»*

НЕЙРОМЕРЕЖЕВІ МЕТОДИ ПРОГНОЗУВАННЯ ЕНЕРГЕТИЧНОГО СТАНУ БПЛА ДЛЯ РЕАЛІЗАЦІЇ АВТОНОМНОЇ СИСТЕМИ ЗАРЯДЖАННЯ

Обмежений енергетичний ресурс акумуляторних батарей залишається одним із головних чинників, що стримує тривале автономне функціонування безпілотних літальних апаратів. Для місії у динамічних умовах недостатньо лише контролювати поточну напругу батареї, оскільки реальний енергетичний стан БПЛА визначається сукупністю показників, зокрема рівнем заряду, станом здоров'я батареї, залишковим ресурсом, температурними умовами, профілем навантаження та режимом польоту. Сучасні дослідження у сфері авіаційних батарей підкреслюють, що саме інтелектуальні методи оцінювання цих параметрів дають змогу підвищити надійність енергетичного менеджменту в БПЛА та створюють основу для автономного прийняття рішень щодо повернення, посадки й підзарядження.

Метою роботи є розробка нейромережових методів прогнозування енергетичного стану БПЛА для реалізації автономної системи зарядження, здатної у реальному часі оцінювати залишковий енергетичний ресурс і формувати рішення про перехід до режиму автоматичного повернення та зарядження. Запропонований підхід передбачає використання бортових даних про струм, напругу, температуру акумулятора, тягове навантаження, швидкість польоту, просторове положення апарата та параметри місії. На основі цих даних нейромережева модель повинна прогнозувати не лише поточний рівень заряду, а й часовий горизонт безпечного виконання місії, що є критично важливим для систем автономного енергетичного керування.

Функціонально система складається з бортової сенсорної підсистеми, модуля збору телеметрії, нейромережевого модуля прогнозування, блоку прийняття рішень та автономної зарядної станції. Для задач прогнозування доцільно використовувати рекурентні й часові архітектури, зокрема LSTM, Temporal Convolutional Network, Transformer-подібні моделі або гібридні physics-informed підходи, оскільки вони краще враховують нелінійну динаміку батареї та змінний

характер польотного навантаження. Вектор енергетичного стану БПЛА можна подати у вигляді:

$$x_k = [SOC_k, SOH_k, RUL_k, T_k, P_k]^T$$

де SOC_k – рівень заряду акумулятора, SOH_k – стан його деградації, RUL_k – залишковий корисний ресурс, T_k – температура, P_k – поточне енергоспоживання. Тоді нейромережева модель прогнозування може бути описана узагальненим співвідношенням:

$$\hat{x}_{k+1} = f_{\theta}(x_k, u_k, z_k)$$

де u_k – керуючі та польотні параметри, z_k – телеметричні вимірювання, f_{θ} – параметризована нейромережева модель. На основі прогнозованого значення SOC та оціненого енергетичного резерву система визначає момент, коли подальше виконання місії стає недоцільним, і генерує команду на автономне повернення до зарядної платформи.

Ключовою перевагою такого підходу є перехід від реактивного контролю батареї до прогнозного енергетичного керування. На відміну від порогових алгоритмів, що реагують лише на вже наявне зниження напруги, нейромережевий модуль враховує історію навантаження, характер маневрування, зовнішні умови та деградаційні процеси батареї. Це дає змогу завчасно ініціювати процедуру повернення, уникати глибокого розряду, зменшувати ризик аварійної посадки та підвищувати загальну безпеку автономного польоту. Практична цінність запропонованого рішення особливо зростає для БПЛА, що працюють у режимі довготривалого моніторингу, інспекції інфраструктури, логістики або пошуково-рятувальних операцій.

Для реалізації повністю автономного циклу енергозабезпечення прогнозний модуль має бути інтегрований із системою автоматичного докування та заряджання. Сучасні огляди показують, що такі системи базуються на поєднанні алгоритмів точного наведення, візуального позиціонування, сенсорного злиття та контактних або безконтактних механізмів підзаряджання. Тому нейромережеве прогнозування енергетичного стану доцільно розглядати як верхній рівень прийняття рішень, який визначає момент активації сценарію повернення, тоді як нижній рівень забезпечує безпечну посадку, зчеплення із платформою та подальше відновлення енергетичного ресурсу.

Список використаних джерел

1. Osman A. A., Mistarihi M. Z., Ramadan M., Ghazal M., Alkhedher M. *A Review and Bibliometric Analysis of Intelligent Techniques for Advanced Battery State Estimation in Aviation Propulsion Systems*. Results in Engineering. 2025. Vol. 27. Art. 106741. DOI: 10.1016/j.rineng.2025.106741.
2. Zhao T., Zhang Y., Wang M., Feng W., Cao S., Wang G. *A Critical Review on the Battery System Reliability of Drone Systems*. Drones. 2025. Vol. 9, No. 8. Art. 539. DOI: 10.3390/drones9080539.
3. Duan M. et al. *PIDNN: A Hybrid Intelligent Prediction Model for UAV Battery Degradation*. Batteries. 2026. Vol. 12, No. 4. Art. 124. DOI: 10.3390/batteries12040124.