

Слюсар В.І.  
Центральний науково-дослідний інститут озброєння та військової техніки  
ЗС України,  
Почернін С.П.  
Центральний науково-дослідний інститут озброєння та військової техніки  
ЗС України

## **ПІДХОДИ ДО ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ БЕЗПІЛОТНИХ СИСТЕМ**

Дані підходи базуються на поєднанні технічних, алгоритмічних і організаційних рішень, спрямованих на мінімізацію енерговитрат при збереженні необхідних показників продуктивності, точності та надійності. Сучасні підходи до енергетичного менеджменту передбачають інтеграцію методів прогнозного керування, інтелектуального розподілу ресурсів і оптимізації траєкторій руху з урахуванням обмежень середовища та логістичних можливостей.

Одним із перспективних напрямів є застосування методів керування з прогноною моделлю (Model Predictive Control, MPC), що забезпечують формування керуючих дій на основі прогнозу майбутніх станів системи. MPC дозволяє одночасно враховувати обмеження на енергоресурс, динаміку зміни параметрів джерел живлення, метеоумови, техногенні фактори та просторово-часові обмеження виконання завдання. На кожному кроці алгоритм обчислює оптимальну послідовність керуючих дій, мінімізуючи функціонал енергоспоживання або комбіновану цільову функцію, що включає також критерії точності, часу та ризику. Завдяки цьому безпілотна система здатна адаптивно змінювати режим руху, маршрут або профіль потужності відповідно до реальної обстановки, зберігаючи оптимальний баланс між енергетичними витратами та результативністю місії. Для групових або ройових архітектур ефективним є застосування розподіленого прогнозного керування (Distributed Model Predictive Control, DMPC), у межах якого кожен агент формує локальну стратегію, узгоджену із загальною метою групи. Такий підхід забезпечує децентралізований розподіл енергоресурсів, що особливо важливо при обмежених можливостях зв'язку або перебуванні у середовищі з підвищеним рівнем завад. Використання DMPC дозволяє зменшити

сумарні енерговитрати рою за рахунок раціонального розподілу завдань і чергування активних та пасивних фаз роботи окремих апаратів. У результаті досягається не лише підвищення тривалості автономного функціонування, а й зниження ризику передчасної деградації джерел живлення.

Другий напрям пов'язаний із оптимізацією траєкторій руху з урахуванням енергетичної «вартості» кожного сегмента маршруту. Використання карт енергетичних витрат, сформованих на основі аеродинамічних, гідродинамічних або тягових моделей, дає змогу визначати мінімально витратні траєкторії, які забезпечують виконання завдання з найменшими втратами енергії. У поєднанні з MPC така оптимізація може здійснюватися в реальному часі, що забезпечує адаптацію маршруту до змін середовища або тактичної ситуації. Для багатоплатформових систем додатковим фактором підвищення ефективності є узгодження траєкторій між агентами, що зменшує дублювання зон покриття і забезпечує раціональне використання енергетичного потенціалу групи.

Наступним елементом є логістика енергопостачання, яка передбачає планування, розміщення та використання стаціонарних і мобільних пунктів підзаряджання чи заміни батарей. Розроблення алгоритмів оптимального розташування таких пунктів дозволяє скоротити транспортні втрати, мінімізувати час простою і забезпечити стійкість виконання місій на тактичну або оперативну глибину. У перспективі доцільним є створення інтегрованих систем «енергетичних вузлів», які поєднують функції підзаряджання, обміну даними та технічного обслуговування. Це формує основу для енерго-логістичного континууму, де процес відновлення енергоресурсу є частиною загального циклу управління місією.

Особливе місце займають адаптивні методи прогнозування стану джерел живлення. На основі параметрів SoC (State of Charge), SoH (State of Health) і RUL (Remaining Useful Life) формується прогнозний вектор енергетичної працездатності, який використовується для прийняття рішень у процесі керування. Включення цих показників у систему прогнозного керування дозволяє здійснювати превентивне перерозподілення навантаження, своєчасно виводити елементи системи з активного циклу та зменшувати ймовірність відмов. Це забезпечує зростання операційної

надійності та стабільності функціонування безпілотних систем у складних умовах середовища.

Важливий напрям удосконалення енергетичного менеджменту – інтеграція інтелектуальних алгоритмів оптимізації, що використовують методи машинного навчання та евристичного пошуку для підвищення точності прогнозування та прийняття рішень. Комбіновані моделі, що поєднують фізико-математичні закономірності та дані телеметрії, забезпечують адаптивну оптимізацію енерговитрат залежно від поточних умов експлуатації. Такий підхід дозволяє враховувати нелінійні залежності між енергоспоживанням, навантаженням і середовищними параметрами, що традиційно складно описати аналітично.

Таким чином, комплексне застосування прогнозних, розподілених і адаптивних методів керування енергетичними ресурсами формує концепцію інтелектуального енергетичного менеджменту безпілотних систем. Її реалізація забезпечує підвищення операційної ефективності, зменшення витрат енергії, продовження ресурсу джерел живлення та зниження ризику відмов. Подальший розвиток цього напрямку пов'язаний із створенням єдиних моделей взаємодії між енергетичною підсистемою, системою керування і зовнішнім середовищем, що дозволить перейти від локальних рішень до повноцінних інтегрованих систем прогнозно-адаптивного управління енергетикою безпілотних комплексів. Наступні дослідження доцільно спрямувати на розроблення узагальненої моделі енергетичного балансу безпілотних систем, яка враховує фізичні, інформаційні та логістичні взаємозв'язки, а також на формування уніфікованих критеріїв оцінювання енергетичної ефективності. Це дозволить створити основу для побудови універсальної архітектури інтелектуального енергетичного менеджменту, придатної для різних класів безпілотних систем і умов їх застосування.