

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЛЬОТНА АКАДЕМІЯ
НАЦІОНАЛЬНОГО АВІАЦІЙНОГО УНІВЕРСИТЕТУ

**МАТЕРІАЛИ
VIII Міжнародної
науково-практичної
конференції**

*"Управління високошвидкісними рухомими об'єктами
та професійна підготовка операторів
складних систем"*

20 грудня 2019 року

Кропивницький, 2019

Методика розрахунку БПЛА мультикоптерного типу

Ми знаходимося на порозі «Індустрії 4.0» - четвертої промислової революції. Суть її полягає в тому, що матеріальний світ сьогодні зливається з віртуальним, у результаті чого створюються нові кіберфізичні комплекси, які поєднані в єдину цифрову екосистему. Роботизоване виробництво, «розумні» заводи та «розумні» міста, безпілотні технології в транспорті — це все компоненти цієї системи.

Зараз в світі існує більше 1000 напрямків використання БПЛА (або просто дронів) в різних сферах життя від доставки товарів з інтернет-магазинів до аеротаксі. Безпілотники входять в наше життя подібно лавині. Наведемо ще один красномовний факт: в 2025 році 90% операцій ВПС США будуть виконуватися засобами безпілотної авіації. За даними Всесвітньої організації безпілотної авіації (The Organization for Unmanned Vehicle Systems Worldwide) до 2025 року економічна ефективність використання дронів у сільському господарстві (за рахунок створення нових робочих місць та оптимізації існуючих процесів) складе \$82 млрд. А Україна важливий гравець на світовому ринку виробництва сільськогосподарської продукції. «Дронізація» сільського господарства в 21 столітті так само неминуха, як і його механізація в 20-му [1, 2].

БПЛА бувають різного типу: мультикоптери, планери, гелікоптери і т.д. Для вирішення конкретних задач ефективнішим буде той чи інший вид конструкції. Наприклад, якщо для виконання завдання потрібний вертикальний зліт та посадка, чи здатність дрону зависати в одному місці, то доцільним було б використання БПЛА мультикоптерного типу: квадрокоптеру, гексакоптеру, октакоптеру і т.д.

Більшість з них мають типові конструкції, що відрізняються, переважно, параметрами основних робочих вузлів: потужність моторів, кількість гвинтів, ємність і напруга акумуляторної батареї, діаметром пропелера і т.п.

Різноманіття задач, що вирішуються, обумовлює велику кількість різних компоновок конструкцій, які б могли їх вирішувати, а отже і тисячі можливих комбінацій параметрів основних вузлів. Тут важливим є розуміти фізику польоту для визначення ще на етапі проектування основних параметрів компонентів та їх оптимального поєднання. Кожен з двигунів створює силу тяги F_i (у випадку квадрокоптера $i=1,2,3,4$), що регулюється зміною струму на двигунах. Керуючи орієнтацією векторів F_i виникають широкі можливості для компенсації зовнішнього навантаження, яке діє на корпус дрона, і для керування траєкторією його польоту. Політ мультикоптеру описується досить складною системою диференціальних рівнянь [3], деякі параметри якої потрібно розраховувати експериментально.

Аналіз фізичних процесів, які лежать в основі польоту мультикоптеру, з урахуванням типових співвідношень між технічними параметрами вузлів, наявних на сьогоднішній день, дозволяє спростити як розрахунок так і підбір їх ефективних комбінацій. Тому розробка фізичних основ розрахунку параметрів мультикоптерних систем є актуальним теоретичним дослідженням.

Хоч політ мультикоптера описується достатньо складною системою рівнянь, в переважній кількості випадків нас не цікавить конкретна траєкторія, а лише ЛТХ дрону, що дозволяють оцінити спроможність дрону виконати поставлені перед ним задачі, такі як, підняти певну вагу в повітря, пролетіти певну відстань, триматися в повітрі певний час, піднятися на певну висоту і т.д. Оцінка цих залежностей і є першочерговим завданням при проектуванні, оскільки дозволяє оцінити здатність дрону виконати технологічні задачі, які ставляться перед ним в процесі експлуатації.

Розв'язанням цієї проблеми є використання електронних програмних засобів, так званих електронних калькуляторів дронів. Їх достатньо багато, проте досить популярним є онлайн ресурс xcopter Calc [4]. Він дозволяє по введеним компонентам виконати розрахунок ЛТХ дронів: часу польоту, вагу коптера, корисне навантаження, електричну потужність і багато іншого. Не знаючи фізичних закономірностей та зв'язків між параметрами польоту досить складно підібрати оптимальну конструкцію, оскільки це тисячі доступних комбінацій.

Тому розглянемо фізику процесів польоту [5]. Як показують розрахунки, що зроблені для серії акумуляторів Lipo, питома енергія акумуляторів знаходиться приблизно на одному рівні. При розрахунку конструкції важливим є встановлення відношення маси батареї до ваги дрону.

Припустимо, що ми розраховували всі компоненти дрону, які дозволяють нам очікувати певну дальність польоту. При цьому маса акумулятора була значно менша загальної маси дрону. Зрозуміло, що якщо тепер збільшити тільки ємність батареї, наприклад в 2 рази, то і збільшиться в 2 рази запас енергії, а отже збільшується в 2 рази і час її розрядження, а отже і час польоту, що спричинить зростання дальності польоту. Проте, при подальшому зростання маси акумулятора, коли це буде приводити до суттєвого зростання маси дрону, почне суттєво зростати й тяга двигунів та споживна потужність, які є обмеженими. Тому такий мультикоптер - або не підніметься в повітря, або швидкість польоту буде незначною, а отже і зменшиться максимальна дальність польоту.

Отже, для даної компоновки повинно існувати якесь оптимальне співвідношення маси акумулятора дрону до маси дрону без акумулятора. Результати розрахунків представлено в роботі.

Досвід роботи з програмою xcopterCalc дозволяє стверджувати, що високі значення ефективності E лежать в межах $6-9 \frac{\text{г}}{\text{Вт}}$ при $f < 4 \frac{\text{кг}}{\text{м}^2}$.

Ввівши відповідні позначення, такі як мінімальна тяга дрону T_{min} для стабільного польоту, навантаження на одиницю площі, яку покривають при обертанні всі гвинти f та кількість гвинтів Z та виконавши відповідні математичні розрахунки, отримуємо формулу (1), для розрахунку діаметру пропелера:

$$D = 2 \cdot \sqrt{\frac{T_{min}}{\pi \cdot Z \cdot f}} \quad (1)$$

До основних компонентів мультикоптера, які треба визначати, слід віднести: акумулятор, гвинти, мотори.

Для прикладу: вага квадрокоптеру 1 кг, тобто $T_{min} = 2 \text{ кг}$. Візьмемо $f = 4 \frac{\text{кг}}{\text{м}^2}$. Отримуємо: $D = 39,5 \text{ см} = 15,8''$.

Поклавши ефективність E рівною $8 \frac{\text{г}}{\text{Вт}}$ розраховуємо загальну потужність $N=250 \text{ Вт}$. Це дозволяє оцінити потужність одного двигуна величиною 64 Вт. При вазі батареї 0,5 кг маємо енергію акумулятора $230000 \text{ А} \cdot \text{В} \cdot \text{с} = 63,88 \text{ А} \cdot \text{Вгод}$. Час польоту знайдемо як відношення енергії батареї до її потужності: $t = 230000 / 250 = 920 \text{ с} = 15,3 \text{ хв}$.

Вибір складових компонентів мультикоптера і подальшу оптимізацію слід виконувати, використовуючи програму xcopterCalc, яку й використовуємо для перевірки розробленого алгоритму.

Перш за все слід зазначити, що отримані результати з допомогою xcopterCalc та розрахунків добре корелюються між собою. Невелика розбіжність по часу висіння обумовлюється тим, що в параметрах розрахунку вказана гранична межа розряду батареї - 15%, що становить трохи більше 2 хвилини.

Розглянемо економічну ефективність використання мультикоптерних систем.

Слід зазначити, що за винятком акумуляторної батареї і пропелерів, більшість комплектуючих має високий запас ресурсу до відмови.

При аваріях, як правило, основна шкода завдається рамі (корпусу) і пропелерам. При низькій вартості останніх, особливо коли мова йде про пропелер невеликого діаметра, це не є критичним. Слід зазначити, що надійність роботи мультикоптерних систем зростає з кожним днем. Наприклад, DJI Phantom 4 PRO, при правильній експлуатації, вкрай надійний, має багато ступенів захисту, сенсорних датчиків, автоматичних режимів і інтелектуальних мод. Це призводить до того, що навіть в руках новачка аварій практично не трапляється.

Для аналізу можна обрати кілька конфігурацій типових рішень мультикоптерів різних класів. Як показує наш аналіз, ціни на готові комплектації дронів коливаються: від кілька десятків тисяч гривень - для коптерів вантажопідйомністю близько 0,5 кг і до декількох сотень тисяч гривень - для великої вантажопідйомності 15-20 кг. Що є значно дешевше вартості вертольота або літака.

Також треба відзначити простоту в експлуатації, транспортуванні, обслуговуванні і компактність при зберіганні. Використання автоматичних інтелектуальних режимів польотів дозволяє значно зменшити навантаження на оператора, спростити вимоги до його кваліфікації для певних операцій управління і прискорити час його навчання.

Окремо потрібно розглянути амортизацію акумулятора. Ресурс циклів перезарядки залежить від того, як експлуатують і зберігають батареї, а також від виробника. Для оцінки розглянемо акумулятори для квадрокоптера DJI Phantom 4 PRO. Виробник гарантує 200 циклів перезарядки при дотриманні правил експлуатації, що дозволяє розраховувати на близько 100 годин роботи дрона.

На практиці, цей ресурс виявляється як мінімум в декілька разів вище. З огляду на роздрібну вартість батареї, а це менше 10% вартості квадрокоптера, можна робити висновок про те, що 1 година польоту Phantom 4 PRO коштує менше 0,1% його вартості. Це дозволяє говорити про те, що при інтенсивному використанні дрона, вона не перевищує 50 грн. Це з урахуванням вартості електроенергії для зарядки, але без урахування наслідків можливої аварії.

Взявши до уваги той факт, що переважно використовуються LiPo акумулятори, які мають близькі значення питомої енергії на кілограм ваги батареї, то дані цифри можна взяти для первинної оцінки амортизації для інших мультикоптерів.

При вартості батареї, на сьогодні близько 6 тис. грн., ємністю 5870 мА · год, з напругою 15,2 В і типових значеннях питомої тяги близько 5 г/Вт можна оцінити вартість транспортування 1 кг вантажу повітрям близько 30 грн/год або 50 коп/хв. Дані значення дозволяють з упевненістю говорити про економічну вигоду при використанні БПЛА мультикоптерного типу.

Література

1. Ковальов Ю. Г., Ковальова О. С., Ковальов С. Г. Елементи STEM-навчання під час вивчення основ керування БПЛА/Управління високошвидкісними рухомими об'єктами та професійна підготовка операторів складних систем : Міжнар. наук.-практ. конф., 26-27 листопада 2017 р. : тези доп. – Кіровоград, 2017. – С. 21.

2. Неділько С. М., Ковальов Ю. Г., Шин Мо Се. Центри безпілотних літальних апаратів як осередки впровадження інноваційних технологій у об'єднаних територіальних громадах регіону // Управління високошвидкісними рухомими об'єктами та професійна підготовка операторів складних систем: VII Між. наук.-практ. конференція, 22-23 листопада 2018 р.: тези доп., – Кропивницький: вид-во КЛА НАУ, 2018. – С.51-52.

3. Емельянова О. В., Яцун С. Ф., Попов Н. И. Изучение движения квадрокоптера в вертикальной плоскости [Текст] // Актуальные вопросы технических наук: Материалы II Междунар. науч. конф. (Пермь, февраль 2013 г.). — Пермь: Меркурий, 2013. -С. 66-69.

4. <https://www.ecalc.ch/xcoptercalc.php?lang=en>.

5. <http://www.naun.org/main/NAUN/mechanics/2015/a372003-136.pdf>.