

УДК 629.735.015.4:629.735.45(045)

А.Г. Огир

ВЕРТОЛІТ ЯК ОБ'ЄКТ КЕРУВАННЯ

Національний авіаційний університет, м.Київ, anna_ogyr@ukr.net

Згідно даним фахівців, на сьогоднішній день вертольоти складають близько 40-50% парку всіх літальних апаратів світу, що знаходяться в експлуатації. Темпи зростання парку цивільних вертольотів складають близько 15% в рік. Ефективність їх широкого поширення у всіх сферах життєдіяльності людини залежить від характеристик стійкості, спостережуваності та керованості вертольоту у польоті. Для покращення цих характеристик потрібно виявити особливості вертольота як об'єкта керування.

Ключові слова: вертоліт, одногвинтовий вертоліт, несучий гвинт, рульовий гвинт, фенестрон, NOTAR.

Вступ. В наш час вертольоти широко застосовуються в різноманітних сферах діяльності людини, тому їх розвитку приділяється значна увага в більшості країн світу, а проблема створення та вдосконалення ефективних систем керування та стабілізації з урахуванням всіх їх особливостей та вимог до використання вертольотів є досить актуальною в сучасному авіабудуванні.

Постановка задачі. Вертоліт як об'єкт керування є специфічним суттєво нестійким літальним апаратом (ЛА), керування та стабілізація руху якого здійснюється через зміну величини та напрямку вектора тяги несучого гвинта (НГ) та зміну величини тяги кермового гвинта на вертольотах одногвинтової схеми [1]. Головною перевагою вертольотів над іншими ЛА є їх маневреність: вертольоти на відмінну від інших ЛА здібні до вертикального зльоту, вертикальної посадки, зависання в повітрі. Ці особливості роблять вертоліт найбільш корисними в порівнянні з іншими. Крім того, вертольоти можуть перевозити вантаж на зовнішніх підвісках, що дозволяє транспортувати негабаритні вантажі, а також виконувати монтажні роботи.

До недоліків вертольотів в порівнянні з літаками можна віднести менші максимальні швидкості та висоту польоту, складність в управлінні та суттєві обмеження зони відхилень керуючих органів від системи автоматичного керування, погані характеристики стійкості, керованості та суттєві перехресні впливи, високу питому витрату палива і, як наслідок, вищу вартість польоту з розрахунку на пасажирокілометр або одиницю маси вантажу, що перевозиться.

Розв'язок поставленої задачі. Одним із методів класифікації вертольотів є класифікація за аеродинамічною схемою, тобто за кількістю і способом розташування НГ. Аналіз показав, що найбільше розповсюдження у вертольотобудуванні отримали одногвинтові вертольоти (90% від загальної кількості) завдяки простоті конструкції та системи управління. Тому подальше дослідження буде зв'язане саме з особливостями одногвинтового вертольоту як об'єкту керування.

Серед переваг вертольотів одногвинтової схеми з механічним приводом НГ можна виділити наступні: енергетична ефективність, конструктивна простота, висока надійність конструкції, які й зумовили настільки широке їх розповсюдження. Вертольоти інших схем мають певні переваги у вузькому діапазоні режимів висіння і малих швидкостей польоту (співвісна і синхрокотер), проте поступаються одногвинтовій схемі по показнику транспортної ефективності як найбільш важливому параметру, що характеризує економічну ефективність ЛА.

При цьому можна виділити й ряд недоліків, властивих вертольотам одногвинтової схеми з рульовим гвинтом (РГ): додаткова вага конструкції; витрата потужності на привід рульового гвинта; ускладнення технічного обслуговування і небезпека зачіпання РГ за перешкоди; пошкодження від ударів гравію і інших предметів, що піднімаються із землі потоком НГ, при зльоті і посадці; високий рівень вібрацій і шуму; погана стійкість і керованість на різних режимах польоту. Розглянемо можливі варіанти покращення характеристик одногвинтового вертольоту окремо та більш детально.

Зниження рівня вібрацій при конструюванні вертольота забезпечується шляхом підбору жорстких характеристик фюзеляжу, пружним кріпленням гвинта до фюзеляжу (між редуктором з валом НГ, і фюзеляжем включаються пружні елементи із спеціально підібраними характеристиками), також використовуються динамічні гасителі коливань [2]. Відомо, що динамічні маятникові гасителі коливань дозволяють понизити рівень нормально обумовлених вібрацій у декілька разів.

На сьогоднішній день розробці нових шляхів усунення вібрацій при польоті вертольоту приділяється значна увага. На черговій щорічній виставці Heli-expo 2011 Sikorsky Aircraft Inc представив нову систему активного втулкового гасителя вібрацій (HMVS) замість пасивного маятникового біфілярного віброгасителя, що відрізняється меншими габаритами і вагою, але має при цьому більшу ефективність [3].

Крім того Eurocopter на тій же виставці представив наступну інноваційну технологію – лопаті НГ, із зміщеними вперед стріловидними закінцівками для поліпшення акустичних і вібраційних характеристик вертольота (Blue edge blade). Додатково до Blue Edge, Eurocopter планує в найближчому майбутньому просувати технологію Blue Pulse. Суть її роботи полягає у використанні трьох спеціальних модулів, вбудованих в задню кромку кожної лопаті. П'єзоелектричні мотори приводять ці модулі в рух із швидкістю 15-40 помахів в секунду, що, у свою чергу, значно знижує рівень шуму НГ.

В деяких моделях вертольотів замість РГ використовують фенестрон – багатолопатеви́й гвинт в кільцевому каналі, що встановлюється безпосередньо в килі вертольоту [4]. Інтерес до фенестрону викликаний прагненням подолати ряд експлуатаційних недоліків, які притаманні звичайним РГ. Основними перевагами використання фенестрона є:

- підвищення безпеки польоту вертольота на малих висотах завдяки корпусу фенестрона, який захищає гвинт від можливих зіткнень з різними перешкодами поблизу землі;
- підвищення живучості вертольота завдяки використанню великого кіля, який в горизонтальному польоті на крейсерському режимі практично повністю розвантажує фенестрон;
- малий рівень динамічної напруги в лопатях гвинта фенестрона навіть на великих швидкостях польоту, що сприятливо позначається на збільшенні його ресурсу.

До недоліків фенестрона відносять: значно більша в порівнянні з РГ потребує потужність на режимі висіння, збільшення шуму і аеродинамічного опору на режимі горизонтального польоту (за рахунок установки кіля).

Діаметр фенестрона менший діаметру традиційного РГ, що дозволяє зменшити передавальне число хвостового редуктора, а отже, масу трансмісії. При цьому відпадає необхідність в проміжному кутовому редукторі, що також знижує масу [4].

Статистика використання вертольотів, зокрема проведена фірмою “Аероспасьєль” (Франція), показує, що 15% всіх аварій вертольотів відбувається із-за поломки РГ при його зіткненні з перешкодами на землі (дерева, будівлі, лінії електропередачі тощо) або попадання в нього сторонніх предметів. Використання фенестрона значно знижує в цих випадках можливість його поломки. При цьому, згідно даних цієї ж фірми, істотно збільшується живучість бойового вертольота, оскільки у зв'язку з малими розмірами гвинта фенестрона приблизно в два рази зменшується вірогідність попадання в гвинт снаряда малого калібру.

Існують також одногвинтові вертольоти із струменевою системою управління: для компенсації реактивного моменту використовується система управління пограншаром на хвостовій балці і реактивне сопло на кінці, відома як NOTAR [4]. Використання системи NOTAR на легких вертольотах дає ряд переваг: низькі показники шуму порівняно з класичним рульовим гвинтом або фенестроном; компактніші розміри хвостової балки вертольота; підвищена економічна ефективність на режимах висіння та польоту з невеликими швидкостями, за рахунок ефекту суперциркуляції; полегшене пілотування (менше робоче навантаження пілота, менша чутливість до бічного вітру).

Система NOTAR застосовується у вертольотах компанії MD Helicopters. Крім того, вертольоти даної фірми забезпечені лижами і мають міцнішу платформу при посадках, ніж вертольоти з шасі. Використання системи NOTAR за заявою фірми “McDonnell Douglas Corporation” на 20 % надійніше, на 35 % понижена уразливість і шум в порівнянні з РГ. При цьому були зменшені вібрації і механічна складність елементів, що збільшило надійність і ремонтпридатність.

Для стабілізації на різних режимах польоту вертоліт зазвичай споряджається елементами штучної стабілізації, які умовно можна розділити на дві групи [5]: механічні гіроскопічні пристрої, які є невід'ємною частиною систем НГ і використовуються на вертольотах фірм “Белл”, “Хіллер” та “Локхід”; елетромеханічні системи, на вхід яких подається сигнал, що відповідає кутовому положенню фізеляжа або швидкості відхилення гіроскопа.

Подальше дослідження буде проведено щодо стабілізації вертольоту за допомогою гіроскопічного пристрою Белла. Гіроскопічні стабілізуючі пристрої дають змогу значно підвищити демпфування НГ і тим самим покращити стійкість вертольоту.

Так як гіроскоп може обертатися відносно валу, то рівняння його руху має таку ж форму, що й рівняння руху лопаті [6] під дією гіроскопічного моменту та моменту інерції. Отже, якщо δ є кутовим зміщенням гіроскопу, то рівняння його руху має вигляд: $\ddot{\delta} + 2k\omega_n\dot{\delta} + \omega_n^2 = -2\omega_n\dot{\psi}\sin\psi_{\text{пл}} + \ddot{\psi}\cos\psi_{\text{пл}}$ (1)

де k – коефіцієнт в'язкого тертя демфера; $\dot{\psi}$ – кутова швидкість обертання втулки НГ.

Так як найбільш нестійким режимом вертольоту є режим висіння, особливо при десантуванні вантажу, то подальший аналіз стосуватиметься саме цього режиму. При відсутності управління в режимі висіння й $\vec{V} = 0, \tau = 0, Z_u = 0$, вертикальний рух не зв'язаний з рухом тангажу і повздовжнім рухом та представляє собою аперіодичний стійкий рух із сильним загасанням [2]. Інші види руху визначаються за умови:

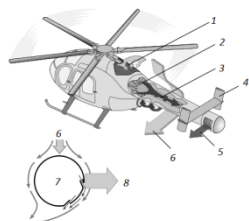


Рис. 1 Струменева система управління вертольотом NOTAR

(1 – повітрязбірник, 2 – вентилятор, 3 – хвостова балка з соплами, що створюють ефект Коанди, 5 – кілі, 6 – реактивне повітряне

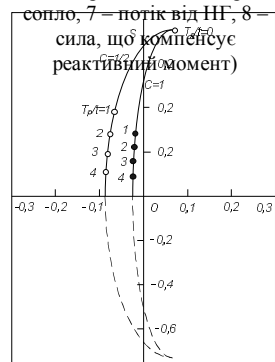


Рис. 2 Корені довгоперіодичного коливання

Корені довгоперіодичного коливання мають вигляд, представлений на рис. 2

З аналізу даних рис. 2 можна зробити висновок, що можливості стабілізації гіроскопа Белла є обмеженими. Вертольоти із системою Белла мають перевагу безпосереднього керування лопатями НГ, однак маневреність таких вертольотів є обмеженою із-за високої стійкості апарату. Крім того стабілізатор Белла потребує наявності в його конструкції додаткового елемента – демпфера.

Висновки. На основі розглянутих вище недоліків вертольоту як об'єкта керування та методів покращення характеристик в цілому можна зробити висновок, що для провідних компаній це є першочерговою задачею. Оптимізація систем автоматичної стабілізації та автоматичного керування польотом вертольотів здійснюється з урахуванням властивої їм нестійкості, яка потребує постійного втручання пілота та контролю ним всіх органів керування під час виконання ним маневрів, та навіть звичайного горизонтального польоту, що є досить виснажливим протягом тривалого часу. Вертольоти зазвичай споряджаються елементами штучної стабілізації. Проведений аналіз гіроскопа Белла показав, що даний стабілізуючий пристрій значно покращують стійкість, але при цьому обмежує його маневреність. Отримані результати мають значення для подальшої розробки нових шляхів покращення систем автоматичної стабілізації та систем автоматичного керування польотом вертольотів.

Список використаної літератури

1. Володко А. М. Основы аэродинамики и динамики полета вертолетов / Володко А. М. – Москва: Транспорт, 1988. – 342 с.
2. Володко А. М. Основы летной эксплуатации вертолетов. Аэродинамика / Володко А. М. – Москва: Транспорт, 1984. – 256 с.
3. Джонсон У. Теория вертолета: в 2 книгах / Джонсон У.; пер. с англ. Баскин В.Э., Есаулов С. Ю., Каплан В. С. – Москва: Мир, 1983. – Кн. 1. – 503 с.
4. Богданов Ю. С., Михеев Р. А., Скулков Д. Д. Конструкция вертолетов. – М.: Машиностроение, 1990. – 272 с.
5. Красовский А. А., Вавилов Ю. А., Сучков А. И. Системы автоматического управления летательных аппаратов / под ред. Красовского А. А. – Москва: ВВИА им. проф. Н.Е. Жуковского, 1986. – 462с.
6. Ля Хи Фонг Нейросетевое десанзирование грузов с помощью тросовой системы с вертолета на палубу судна в сложных погодных условиях. – М.: Научтехлитиздат, "Авиакосмическое приборостроение", 2003. №3. – с. 31-35.

$$\begin{bmatrix} \lambda - x_u & W_c \\ m_u & \lambda^2 - m_{\dot{\theta}} \end{bmatrix} \quad (2)$$

Тобто $\lambda^3 - (x_u + m_{\dot{\theta}})\lambda^2 + x_u m_{\dot{\theta}}\lambda + m_u W_c = 0$ (3), де W_c – вертикальна швидкість. Тоді для режиму висіння рівняння повздовжнього руху при відсутності керування матиме вигляд:

$$\frac{du}{dt} - x_u U + W_c \theta = 0; \quad -m_u u + \frac{d^2\theta}{dt^2} - m_{\dot{\theta}} \frac{d\theta}{dt} - m_{B_1} B_1 = 0; \quad (4)$$

$$\frac{cd\theta}{dt} - \frac{dB_1}{dt} - \frac{\bar{t}}{T_j} B_1 = 0, \text{ де } u \in U \text{ – складова основної швидкості, а}$$

амплітуда циклічного кроку B_1 є функцією часу.

Характеристичне рівняння системи (4) з урахуванням (3) запишеться:

$$\left(\lambda + \frac{\bar{t}}{T_j}\right) \left\{ \lambda^3 - (x_u + m_{\dot{\theta}})\lambda^2 + x_u m_{\dot{\theta}}\lambda + m_u W_c \right\} - cm_{B_1} \lambda (\lambda - x_u) = 0 \quad (5)$$

Похідна керування m_{B_1} у співвідношеннях (4) та (5) представляє собою коефіцієнт моменту, що відповідає поодинокій зміні циклічного кроку, який залежить від виносу шарнірів. Для безшарнірного гвинта цей коефіцієнт дорівнює $m_{B_1} \leq -0,0214$. Аналіз характеристичного рівняння (5) показує, що воно включає в себе два коливальних рухи при відсутності керуючих впливів: сильно демпфовані коливання з коротким періодом, тобто короткоперіодичні коливання; слабо згасаючі коливання з великим періодом (довгоперіодичні), які можна рахувати власними незгасаючими коливаннями при фіксованому управлінні й з урахуванням наявності стабілізатора (гіроскопа) Белла.