

КОМПЛЕКСНИЙ ПІДХІД ДО ОЦІНКИ НЕРІВНОМІРНОГО РОЗПОДІЛУ ПОЛЯ ІНДУКТИВНИХ ШВИДКОСТЕЙ ПО ДИСКУ АВТОРОТУЮЧОГО НЕСУЧОГО ГВИНТА

Наведено результати розрахункових досліджень по оцінці нерівномірного розподілу поля індуктивних швидкостей по диску авторотуючого несучого гвинта

Поліпшення характеристик авторотуючого несучого гвинта можливо тільки за рахунок кращого розуміння закономірностей його взаємодії з повітрям. Несучий гвинт в стані авторотації представляє собою складну динамічну систему з параметрами, що досить швидко змінюються. Обертання несучого гвинта приводить до того, що елементарні аеродинамічні сили лопатей суттєво змінюються в залежності, як від кутового положення лопаті, так і від положення елементу лопаті, що розглядається. Непостійність кутової швидкості обертання несучого гвинта в режимі авторотації є головною відмінністю від несучого гвинта вертольоту в експлуатаційних режимах польоту. Все це, з урахуванням значного нерівномірного розподілу конструктивних параметрів вздовж лопаті, приводить до того, що всебічне аналітичне дослідження несучого гвинта є досить складною задачею.

Зниження на режимі авторотації несучого гвинта є одним з важливих льотних властивостей вертольоту і грає важливу роль в забезпеченні безпеки польотів. Особливе значення має прогнозування несучої спроможності несучого гвинта вертольоту на так званих граничних, чи критичних режимах, а саме режимах авторотації, що приводить до виникнення значних знакозмінних аеродинамічних сил при обтіканні окремих перетинів лопатей. Провести оцінку несучих властивостей несучого гвинта на режимі авторотації, як відомо, дають можливість математичні моделі, котрі описують фізичну суть процесу.

На теперішній час можливості теоретичних розробок в області авторотуючих несучих гвинтів не забезпечують в повній мірі аналітичного дослідження процесу авторотації, а використання теорії вертолїтного несучого гвинта є досить обмеженим. Наприклад в роботі [1] зазначено, що існує необхідність в розробці теорії спуску вертольоту на режимі авторотації, оскільки подібна теорія відсутня. Вперше розробкою теорії несучого гвинта в режимі авторотації почав займатись Г. Глауерт ще в 1925 р. В 1927 р. Глауертом була опублікована теорія, котра базувалась на рівняннях кількості руху. В 1928 р. її доповнив та розвинув К. Локк [2]. Отримані за такою теорією наближені аналітичні моделі авторотуючого несучого гвинта мають досить вузьку область застосування. Як показує практика, теорія Глауерта – Локка дає значні розбіжності при визначенні аеродинамічних характеристик несучого гвинта на ряді режимів його роботи. Використання даної теорії приводить до розбіжностей, які пов'язані з прийнятими в ній допущеннями [2]. Одним з найбільш істотних допущень є припущення про постійний розподіл індуктивних швидкостей по диску несучого гвинта, що приводить на певних режимах до значних розрахункових помилок [3].

Подальше удосконалення теорії, головним чином, відображено в роботах М.Л. Міля, Н.І. Камова, В.Г. Петруніна, В.Г. Табачникова, А.П. Проскурякова, И.П. Братухіна, А.Н. Михайлова, Дж. Б. Уїтлі, Ф. Дж. Бейлі, Дж. Х. Менлі, К. Віолетті з використанням як математичного апарату, так і результатів експериментального дослідження [3–7]. В зазначених роботах класична теорія несучого гвинта уточнювалась в наступних напрямках: врахування кінцевих втрат підйомної сили лопатей; дослідження впливу нерівномірного поля індуктивних швидкостей по диску несучого гвинта на характеристики махового руху та його аеродинамічні сили; визначення вищих гармонік махового руху та сил несучого гвинта; врахування нелінійного розподілу сили профільного опору; врахування зміни кута встановлення лопатей; дослідження коливання лопаті на вертикальних шарнірах; дослідження впливу за-

кручування лопаті на характеристики несучого гвинта; дослідження впливу криволінійного руху апарату в просторі на характеристики несучого гвинта; розробка методів розрахунку з допомогою графічного інтегрування компонент елементарних сил; оцінка впливу на характеристики несучого гвинта області оберненого обтікання; дослідження невстановленого руху несучого гвинта вертольоту і т.д.

Слід зауважити, що першочергово теорія авторотуючого несучого гвинта була розроблена для автожирів. Поява ж вертольотів привела до того, що в багатьох випадках дослідження обмежувались розглядом махового руху лопатей, в той час як питання авторотації не було першочерговим.

Розробка нових та удосконалення існуючих моделей аеродинамічного розрахунку авторотуючого несучого гвинта на режимах поступального польоту, з метою розширення меж застосування теоретичного аналізу аеродинаміки несучого гвинта, є актуальною науковою та практичною задачею світового рівня. Крім того така модель надасть можливість значно зменшити кількість льотних випробувань на стадії виконання дослідно-конструкторських робіт, що пов'язані з визначенням раціональних геометричних, кінематичних та динамічних параметрів несучих гвинтів вертольотів, що розробляються.

Класична теорія несучого гвинта є найбільш прийнятною для аеродинамічного розрахунку авторотуючого несучого гвинта, оскільки, саме вона дає більш точні результати розрахунку в порівнянні з іншими теоріями та може бути використана для розрахунку на всіх режимах роботи авторотуючого несучого гвинта. Саме ця теорія буде взята за основу в подальшому уточненні математичної моделі аеродинамічного розрахунку авторотуючого несучого гвинта на режимах поступального польоту.

Дану теорію розвинув та поширив на авторотуючий несучий гвинт в своїй роботі Полинцев О.Є. [8]. Розрахунок складових від повного аеродинамічного навантаження на несучий гвинт ведуть методом розрахунку сил по елементам лопатей, розглядаючи їх при цьому як елементи крила.

Розподіл індуктивних швидкостей по диску несучого гвинта задається в наступному вигляді

$$v_i = v \cdot \left[\sqrt{1.5 \cdot \bar{r}_i} \cdot f_1 + (1 + [a_v \cdot \cos(\varphi) + b_v \cdot \sin(\varphi)] \cdot \bar{r}_i) \cdot f_2 \right], \quad (1)$$

де f_1, f_2 - функції, що показують внесок відповідно симетричного розподілу, характерного для малих значень μ та розподіл в вигляді скосу потоку [9];

a_v - градієнт лінійного розподілу;

b_v - коефіцієнт, що враховує нерівномірний розподіл в поперечному напрямку;

v - середнє значення індуктивної швидкості, визначається в відповідності з виразом запропонованим Глауертом.

В подальших теоретичних дослідженнях було встановлено, що основний внесок в похибку розрахунку вносить модель, котра описує нерівномірний розподіл індуктивних швидкостей по диску авторотуючого несучого гвинта.

Нагадаємо, що градієнт лінійного розподілу a_v визначається за співвідношенням

$$a_v = 4/3(\mu/\lambda)/[\mu/\lambda - 1.2] \quad (2)$$

де μ - характеристика режиму роботи несучого гвинта;

λ - коефіцієнт протікання повітряного потоку через несучий гвинт.

Коефіцієнт, що враховує нерівномірний розподіл в поперечному напрямку визначається як $b_v = -2\mu$. Подальший аналіз моделі показав, що саме градієнт лінійного розподілу a_v вносить похибку в розрахунок аеродинамічних характеристик авторотуючого несучого гвинта на певних режимах роботи. За результатами теоретичних досліджень було визначено, що для усунення похибки розрахунку замість (2) слід використовувати вираз запропонований Дрізом [10]

$$a_v = \frac{4}{3} \left[(1 - 1,8\mu^2) \sqrt{1 + \left(\frac{\lambda}{\mu} \right)^2} - \frac{\lambda}{\mu} \right] \quad (3)$$

Поряд з цим для визначення меж застосування залежностей (2) та (3) запропоновано наступний критерій

$$K_v = \frac{c_T c_w}{\bar{T}_R} + \frac{1}{3} \quad (4)$$

де c_T - коефіцієнт сили тяги несучого гвинта ;

C_w - коефіцієнт нормованої кутової частоти обертання несучого гвинта;

$\bar{T}_R = T_R / G_a$ - тяга несучого гвинта віднесена до злітної ваги літального апарату.

На критерій (4) накладаються наступні умови:

- якщо $K_v \geq 1$, то градієнт лінійного розподілу a_v визначається за виразом (2);

- якщо $K_v < 1$, то градієнт лінійного розподілу a_v визначається за виразом (3).

Використання запропонованого підходу дає можливість розширити діапазон розрахунку аеродинамічних характеристик авторотуючого несучого гвинта при поступальному польоті.

В якості вихідних даних для проведення розрахункових досліджень використано параметри несучого гвинта автожиру А-002 розробки ОКБ ЛА НПК «Іркут» [8]. Проводиться порівняння між експериментальними даними отриманими в роботі [8], отриманою математичною моделлю, що враховує комплексний підхід до оцінки нерівномірного розподілу поля індуктивних швидкостей по диску авторотуючого несучого гвинта та теоретичною залежністю $T_R = f(w_H)$ отриманої за допомогою класичної теорії поширеної Полинцевим О.Є. на випадок авторотуючого несучого гвинта.

На рис. показано теоретичну залежність $T_R = f(w_H)$ отриману за результатами моделювання роботи авторотуючого несучого гвинта з допомогою класичної моделі (числового інтегрування), запропонованої моделі оцінки поля індуктивних швидкостей, а також експериментально отриманий довірительний інтервал генерального середнього (a_v, a_n) та толерантні межі (x_n, x_v) [8].

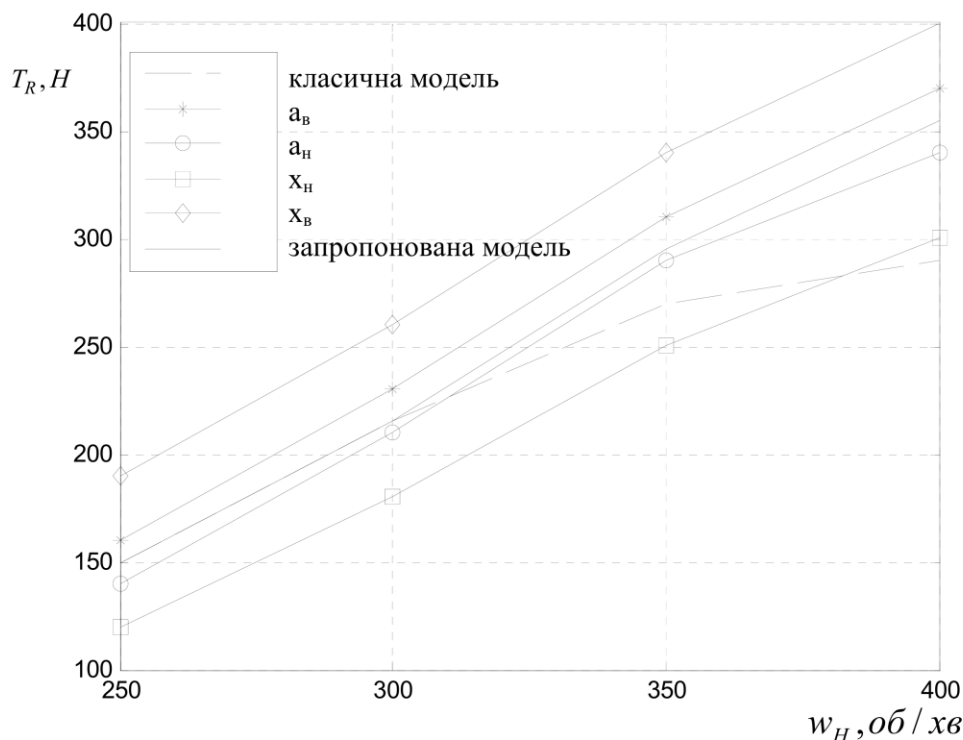


Рисунок. Залежність тяги ротора T_R від кутової частоти обертання w_H

З графічної залежності випливає, що при заданих параметрах довірливої ймовірності в діапазоні частоти обертання несучого гвинта, що розглядається в цілому, спостерігається хороше якісне та незначне кількісне сходження результатів розрахунку з експериментом за класичною моделлю несучого гвинта та повне сходження за запропонованою моделлю оцінки нерівномірного розподілу поля індуктивних швидкостей по диску авторотуючого несучого гвинта. Поряд з тим зі збільшення частоти обертання спостерігається випадання теоретичних значень з довірчого інтервалу для генерального середнього тяги несучого гвинта за класичною моделлю.

Висновки

1. Результати експериментального оцінювання виявили недосконалість існуючого математичного забезпечення, що полягає в неадекватному відображенні фізичної картини обтікання повітряним потоком несучого гвинта при встановленому режимі авторотації.
2. Усунення недоліків існуючого математичного забезпечення досягається шляхом застосування запропонованого комплексного підходу до оцінки індуктивних швидкостей, яке дозволяє розширити можливий діапазон аеродинамічних характеристик авторотуючого несучого гвинта та забезпечує проведення їх якісної і кількісної оцінки з більшою точністю в порівнянні з існуючими математичними моделями авторотуючого несучого гвинта.
3. За результатами тестових розрахунків з використанням запропонованого підходу до оцінки нерівномірного розподілу поля індуктивних швидкостей по диску несучого гвинта виявлено можливість розповсюдження розробленого підходу щодо розрахунку інших гвинтів таких як, тягнучий, штовхаючий, рульовий і т.ін.

Список літератури

1. Юрьев Б.Н. Аэродинамический расчет вертолетов / Б.Н. Юрьев. – М.: Государственное издательство оборонной промышленности. 1956. – 560 с.
2. Братухин И.П. Автожиры. Теория и расчет / И.П. Братухин. – М.: ГосМашМетИздат. 1934. – 111с.
3. Куролесова Е.И. Влияние закручивания лопасти на аэродинамические характеристики автожира / Е.И. Куролесова, М.П.Талимонова. // Труды ЦАГИ, вып. 396. – М.: ЦАГИ. 1939. – 33 с.
4. Миль М.Л. Аэродинамика несущего винта с шарнирным креплением лопастей при криволинейном движении / М.Л. Миль. // Труды ЦАГИ, вып. 465. – М.: ЦАГИ. 1940. – 60 с.
5. Уитлей Дж. Новое исследование в полете американского автожира / Дж. Уитлей. // Техника воздушного флота. 1935. – №1. с.59 – 65.
6. Володко А.М. Основы летной эксплуатации вертолетов. Аэродинамика / А.М. Володко. – М.: Транспорт. 1984. – 256 с.
7. Миль М.Л., Некрасов А.В., Браверман А.С., Гродко Л.Н., Лейканд М.А. Вертолеты. Расчет и проектирование/ М.Л. Миль, А.В. Некрасов, А.С. Браверман, Л.Н. Гродко, М.А. Лейканд: под ред. М.Л. Миль. – М.: Машиностроение. 1966. – Кн. 1, 454 с.
8. Полынцев О.Е. Динамика и прочность авторотирующего несущего винта: дис. ... канд. техн. наук: 05.07.03 / Полынцев Олег Евгеньевич. – М.: 2003. с. 165.
9. Браверман А.С., Вайнтруб А.П. Динамика вертолета. Предельные режимы полета/ А.С. Браверман, А.П. Вайнтруб. – М.: Машиностроение. 1988. – 280 с.
10. Drees, J. M. "A Theory of Airflow Through Rotors and Its Application to Some Helicopter Problems." Journal of the Helicopter Association of Great Britain, 3 : 2 (July-September 1949).