

ПРАКТИЧНІ СПОСОБИ ВИЗНАЧЕННЯ МАСОВОЇ І АЕРОДИНАМІЧНОЇ (ГІДРОДИНАМІЧНОЇ) НЕЗРІВНОВАЖЕНОСТІ ЛОПАТЕВОГО ГВИНТА

Центральноукраїнський національний технічний університет

Анотація

Теоретично обґрунтовані нові практичні способи визначення масової і аеродинамічної (гідродинамічної) незрівноваженості лопатевого гвинта, що ґрунтуються на зміні щільності повітря, газу (рідини), використанні реверсу, ефекту землі.

Ключові слова: пропелер, балансування, безпілотний апарат, пілотований апарат, балансувальний прилад, ефект землі.

Вступ

Основним джерелом вібрацій в машинах з лопатевими гвинтами є масова і аеродинамічна (гідродинамічна) незрівноваженість гвинтів. Тому існує загальна проблема з балансування лопатевих гвинтів [1,2]. При одиничному чи дрібносерійному виготовленні лопатевих гвинтів аеродинамічне (гідродинамічне) балансування забезпечується правкою геометричної форми гвинта. Незрівноваженість мас балансується на балансувальному верстаті чи з використанням балансувального приладу [3]. З появою малих безпілотних і пілотованих апаратів виробництво лопатевих гвинтів стало масовим. В таких умовах традиційні методи незастосовні, бо трудомісткі. Для виготовлених гвинтів актуальною стає більш часткова проблема з виділення із динамічної незрівноваженості масової і аеродинамічної (гідродинамічної) складових [4–6]. Це потрібне для розробки подальших методів балансування лопатевих гвинтів, перевірки якості виготовлення і збалансованості гвинтів, відбракування тощо.

Метою роботи є теоретичне обґрунтування практичних способів визначення масової і аеродинамічної (гідродинамічної) незрівноваженостей лопатевого гвинта.

Результати дослідження

Для окремого визначення масової і аеродинамічної (гідродинамічної) незрівноваженостей лопатевого гвинта запропоновано двічі визначати динамічну незрівноваженість гвинта. Перший раз – при нормальних умовах, а другий раз – при змінених, при яких змінюється тільки аеродинамічна (гідродинамічна) незрівноваженість гвинта за відомим законом. Запропоновані способи, що ґрунтуються на: зміні щільності повітря, газу чи рідини; використанні реверсного обертання гвинта; використанні ефекту землі (екрану, що встановлюється за чи перед гвинтом). Зокрема, для зміни щільності повітря чи газу, або рідини запропоновано: замінювати їх на інший газ чи рідину з іншою щільністю; змінювати температуру повітря (газу); змінювати тиск повітря (газу).

В теоретичному обґрунтуванні використовуються властивості аеродинамічної (гідродинамічної) незрівноваженості: прямо пропорційна залежність від щільності повітря, газу чи рідини; зміна напрямку на протилежний при реверсному обертанні лопатевого гвинта з тією ж швидкістю; збільшення величини при встановленні екрану перед гвинтом.

Запропоновані способи оцінюють аеродинамічну (гідродинамічну) незрівноваженість через еквівалентну масову незрівноваженість, заміряну балансувальним приладом на конкретному режимі роботи гвинта. Тип приладу, як і датчиків вібрацій немає значення. Динамічна незрівноваженість характеризується двома комплексними числами, які визначають напрям і величину незрівноваженості у першій і другій площині корекції [3].

Нехай при звичайній роботі лопатевого гвинта виміряна динамічна незрівноваженість:

$$U0_j = U0_j^{(m)} + U0_j^{(a)}, \quad / j = 1, 2 / . \quad (1)$$

Нехай динамічна незрівноваженість виміряна при змінених умовах:

$$U1_j = U0_j^{(m)} + U1_j^{(a)}, \quad / j = 1, 2 / . \quad (2)$$

В (1), (2) ліворуч стоять виміряні (відомі) величини, а праворуч – невідомі величини, причому індекс “*m*” має масова незрівноваженість, а індекс “*a*” – аеродинамічна (гідродинамічна).

Для підвищення точності визначення складових динамічної незрівноваженості гвинта рекомендується змінювати умови роботи гвинта так, щоб аеродинамічна (гідродинамічна) незрівноваженість змінилася не менше ніж на 30% [3].

Запропонована теоретична залежність між аеродинамічною (гідродинамічною) незрівноваженістю, виміряною в змінених і звичайних умовах роботи гвинта:

$$U1_j^{(a)} = k_p k_e k_\omega U0_j^{(a)}, \quad / j = 1, 2 / , \quad (3)$$

де: $k_p = \rho1 / \rho0$ – відношення щільності повітря, газу (рідини) при змінених умовах, до щільності при нормальних умовах роботи гвинта; $k_e = F1 / F0 > 1$ – відношення осьової аеродинамічної сили, заміряної при змінених умовах роботи до цієї сили, заміряної при нормальних умовах роботи гвинта, враховується тільки при встановленні екрану, інакше $k_e = 1$;

$$k_\omega = \text{sign}(\omega1 / \omega0), \quad (4)$$

де $\omega0$ – кутова швидкість обертання гвинта при нормальних, а $\omega1$ – змінених умовах.

Формула (3) визначає масовий еквівалент аеродинамічної (гідродинамічної) незрівноваженості при змінених умовах роботи гвинта. Вона одночасно враховує зміну аеродинамічної незрівноваженості від: зміни питомої ваги повітря, газу чи рідини; реверсу; ефекту землі. Формула (3) показує істотну відміну аеродинамічної (гідродинамічної) незрівноваженості від масової. Може використовуватися для моделювання руху машин і апаратів з лопатевими гвинтами.

З (1) – (3) знаходимо незрівноваженості, що відповідають нормальним умовам роботи гвинта:

$$U0_j^{(a)} = \frac{U1_j - U0_j}{k_p k_e k_\omega - 1}, \quad U0_j^{(m)} = U0_j - \frac{U1_j - U0_j}{k_p k_e k_\omega - 1}, \quad / j = 1, 2 / . \quad (5)$$

При змінених умовах масова незрівноваженість не зміниться, а аеродинамічна (гідродинамічна) незрівноваженість буде визначатися за формулою (3).

Теоретично встановлено, що найбільшу точність визначення масової і аеродинамічної (гідродинамічної) незрівноваженостей лопатевого гвинта потенційно забезпечують способи, засновані на заміні повітря, газу чи рідини на газ чи рідину з іншою щільністю. При цьому у випадку повітряного гвинта спосіб, заснований на зміні температури повітря чи газу важкий у реалізації через потребу у забезпеченні значної (більше 70 С) зміни температури.

Реверсне обертання лопатевого гвинта змінює напрями векторів аеродинамічної чи гідродинамічної незрівноваженостей на протилежний з деякою похибкою. Ця похибка менша для плоских, симетричних лопатей. Тому цей спосіб може давати додаткові похибки.

Спосіб, заснований на встановленні екрану перед чи за лопатевим гвинтом не тільки змінює величину, але дещо змінює і напрямок аеродинамічної (гідродинамічної) незрівноваженості. Це може вносити похибки у визначення цих незрівноваженостей.

Результати досліджень застосовні до лопатевих гвинтів, лопаті яких обтикаються ламінарним потоком повітря, газу чи рідини. У випадку гребного гвинта кавітація знижує точність способів.

Розроблені способи потребують як мінімум 6 запусків повітряного гвинта [3]: три пробних пуска для визначення динамічної незрівноваженості при нормальній роботі лопатевого гвинта; три пробних пуска для визначення динамічної незрівноваженості при змінених умовах роботи лопатевого гвинта. Така кількість пусків може бути надмірною. Проте швидкість обертання гвинта при другому визначенні динамічної незрівноваженості може відрізнятись від швидкості обертання гвинта при першому визначенні динамічної незрівноваженості. Це розширює області

застосування розроблених способів, бо не завжди можна обернути гвинт з однією сталою швидкістю у нормальних і змінених умовах.

В подальшому планується експериментально перевірити і порівняти запропоновані способи на спеціально створеному стенді [6].

Висновки

Для визначення масової і аеродинамічної (гідродинамічної) незрівноваженостей лопатевого гвинта достатньо визначити динамічну незрівноваженість гвинта балансувальним приладом два рази. Перший раз – при нормальних умовах роботи гвинта, а другий – при змінених, що змінюють за відомим законом аеродинамічну (гідродинамічно) незрівноваженість і не змінюють незрівноваженість мас. При цьому визначається масовий еквівалент аеродинамічної (гідродинамічної) незрівноваженості. Останній істотно змінюється із зміною умов роботи гвинта. Цим аеродинамічна (гідродинамічна) незрівноваженість відрізняється від незрівноваженості мас.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Best, S. (1945). Propeller Balancing Problems. SAE Transactions, 53, 648–659. <http://www.jstor.org/stable/44467824>
2. Majumder, P., Maity, S. (2022). A critical review of different works on marine propellers over the last three decades. Ships and Offshore Structures, 18(3), 391–413. <https://doi.org/10.1080/17445302.2022.2058767>
3. Li, L., Cao, S., Li, J., Nie, R., Hou L. (2021). Review of Rotor Balancing Methods. Machines, 9(5): 89. <https://doi.org/10.3390/machines9050089>
4. Olijnichenko, L., Filimonikhin, G., Nevdakh, A., Pirogov, V. (2018). Patterns in change and balancing of aerodynamic imbalance of the low-pressure axial fan impeller. Eastern-European Journal Of Enterprise Technologies, 3(7(93)), 71–81. <http://dx.doi.org/10.15587/1729-4061.2018.133105>
5. Filimonikhin, G., Filimonikhina, I., Bilyk, Y., Krivoblotsky, L., & Machok, Y. (2021). Theoretical study into the aerodynamic imbalance of a propeller blade and the correcting masses to balance it. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 4(7(112)), 60–66. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.238289>
6. Г.Б. Філімоніхін, Ю.О. Білик, Л.С. Олійніченко. Стенд для дослідження звичайної і аеродинамічної незрівноваженостей повітряного гвинта. Тези доповідей. II Міжнародна науково-технічна конференція «Перспективи розвитку машинобудування та транспорту», Вінниця, 13-15 травня 2021 року: — 2021. С.57-59. <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/prmt/pmrt2021/paper/view/13296>

Філімоніхін Геннадій Борисович — доктор. техн. наук, професор, зав. кафедри деталей машин та прикладної механіки, Центральноукраїнський національний технічний університет, Кропивницький, e-mail: filimonikhin@ukr.net

Останчук Юлія Олександрівна — аспірантка кафедри деталей машин та прикладної механіки, Центральноукраїнський національний технічний університет, Кропивницький, e-mail: juli.biluk97@gmail.com

Олійніченко Любов Сергіївна — канд. техн. наук, доцент кафедри деталей машин та прикладної механіки, Центральноукраїнський національний технічний університет, Кропивницький, e-mail: loga_lubov@ukr.net

Practical Methods for Determining Mass and Aerodynamic (Hydrodynamic) Unbalance of a Propeller

Abstract

New practical methods for determining of the mass and aerodynamic (hydrodynamic) unbalance of a propeller, based on changing the density of air, gas (liquid), applying reverse, ground effect, are theoretically substantiated.

Keywords: propeller, balancing, unmanned vehicle, manned vehicle, balancing device, ground effect.

Filimonikhin Gennadiy B. — Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Machine Parts and Applied Mechanics, Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, email : filimonikhin@ukr.net

Ostapchuk Yuliya O. — graduate student of the Department of Machine Parts and Applied Mechanics, Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, email : juli.biluk97@gmail.com

Olijnichenko Lubov S. — Cand. Sc. (Eng), Assistant Professor of the Department of Machine Parts and Applied Mechanics, Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, email : loga_lubov@ukr.net