

Метод чотирьох пробних пусків для визначення масової і аеродинамічної незрівноваженості повітряного гвинта

Центральноукраїнський національний технічний університет

Анотація

Показано, що чотирьох пробних пусків повітряного гвинта достатньо для окремого визначення його масової і аеродинамічної незрівноваженості. Розроблені відповідні алгоритми розрахунків.

Ключові слова: пропелер, балансування, балансувальний прилад, метод коефіцієнтів впливу, незрівноваженість, жорсткий ротор.

Вступ

Балансувальні прилади призначені для визначення масової незрівноваженості ротора в одній чи декількох площинах корекції. Основні методи визначення масової незрівноваженості побудовані для лінійних систем [1]. Найменшу кількість пусків ротора для цього забезпечує метод коефіцієнтів впливу [2]. Так, відповідно до методу, для визначення динамічної незрівноваженості (незрівноваженості у двох площинах корекції) жорсткого ротора достатньо провести три пробних пуски (тому цей метод називають ще методом трьох пробних пусків).

Основним джерелом вібрацій в машинах з повітряними гвинтами є масові і аеродинамічні незрівноваженості гвинтів. Масова складова майже не змінюється під час роботи гвинта, а аеродинамічна зазнає значних змін. Тому існує загальна проблема з виділення із динамічної незрівноваженості масової і аеродинамічної складових [3–5]. У рамках загальної проблеми існує задача з визначення зазначених складових оптимальним способом. Це потрібне для зменшення трудомісткості і вартості цього процесу.

Метою роботи є розробка методу чотирьох пробних пусків повітряного гвинта для окремого визначення його масової і аеродинамічної незрівноваженості.

Результати дослідження

Модернізований метод трьох пусків для визначення динамічної незрівноваженості повітряного гвинта. Відповідно до модернізованого методу гвинт встановлюють на вал балансувального стенду і три рази визначають амплітуди і фази коливань гвинта у площинах двох датчиків вібрацій (рознесених по подовжній осі валу) при обертанні валу із сталою кутовою швидкістю. Перший раз гвинт обертають без додавання пробних мас і визначають V_0 , V_0 . Другий раз до гвинта приєднують пробну масу P_1 у першій площині корекції і визначають V_1 , V_1 . Третій раз до гвинта приєднують пробну масу P_2 у другій площині корекції і визначають V_2 , V_2 . При цьому кожна пара комплексних чисел визначає амплітуду і фазу коливань у першій і другій площині корекції відповідно. Після цього розраховуються відносні величини і відносне розташування незрівноважених мас у вигляді

$$\delta_1 = (V_0 V_2 - V_0 V_2) / D, \quad \delta_2 = -(V_0 V_1 - V_0 V_1) / D, \quad (1)$$

де

$$D = V_0 V_1 - V_0 V_1 - V_0 V_2 + V_0 V_2 + V_1 V_2 - V_1 V_2. \quad (2)$$

В (1) комплексні числа δ_1 , δ_2 у експоненціальній формі мають вигляд:

$$\delta_j = \delta_j e^{i w_j}, \quad / j = 1, 2/, \quad (3)$$

де \mathbf{i} – уявна одиниця. Вони визначають, що незрівноважена маса Q_1 (Q_2) більше відповідної пробної маси P_1 , (P_2) у δ_1 (δ_2) разів, а кут ψ_1 (ψ_2) задає на роторі положення незрівноваженої маси Q_1 (Q_2) і відраховується від пробної маси P_1 (P_2) до незрівноваженої маси Q_1 (Q_2) у напрямку обертання ротора. При цьому кути ψ_1, ψ_2 приймають значення від 0 до 2π . Незрівноважені маси розміщені на роторі на тому ж радіусі, що і пробні.

Модернізований метод використовує в розрахунках тільки інформацію про заміряні вібрації у двох площинах корекції. У явному вигляді не розраховуються коефіцієнти впливу, не враховуються величини і місця розташування пробних мас. Це зменшує похибки обчислень.

Незрівноважені маси Q_1 , Q_2 (подані у комплексному вигляді) є сумою складових від незрівноваженості мас $Q_1^{(m)}$, $Q_2^{(m)}$, і аеродинамічної незрівноваженості $Q_1^{(a)}$, $Q_2^{(a)}$:

$$Q_j = Q_j^{(m)} + Q_j^{(a)}, \quad / j = 1, 2 / . \quad (4)$$

З метою окремого визначення як незрівноваженості мас, так і аеродинамічної незрівноваженості, пропонується аналогічним чином визначати амплітуди і фази коливань V_{3_1} , V_{3_2} гвинта у площинах двох датчиків вібрацій при змінених умовах роботи гвинта. У змінених умовах змінюється за відомим законом тільки аеродинамічна незрівноваженість гвинта (і не зазнають змін коефіцієнти впливу):

$$\tilde{Q}_j^{(a)} = kQ_j^{(a)}, \quad / j = 1, 2 / , \quad (5)$$

де k – деякий відомий коефіцієнт.

Тоді незрівноважені маси гвинта при нормальних умовах роботи розраховуються за допомогою таких коефіцієнтів, подібних до коефіцієнтів з (3):

– від незрівноваженості мас

$$\delta_1^{(m)} = \frac{(\mathbf{V}0_1 \mathbf{V}2_2 - \mathbf{V}0_2 \mathbf{V}2_1)k - \mathbf{V}0_1 \mathbf{V}3_2 + \mathbf{V}0_2 \mathbf{V}3_1 + \mathbf{V}2_1 \mathbf{V}3_2 - \mathbf{V}2_2 \mathbf{V}3_1}{(k-1)\mathbf{D}},$$

$$\delta_2^{(m)} = -\frac{(\mathbf{V}0_1 \mathbf{V}1_2 - \mathbf{V}0_2 \mathbf{V}1_1)k - \mathbf{V}0_1 \mathbf{V}3_2 + \mathbf{V}0_2 \mathbf{V}3_1 + \mathbf{V}1_1 \mathbf{V}3_2 - \mathbf{V}1_2 \mathbf{V}3_1}{(k-1)\mathbf{D}}, \quad (6)$$

– від аеродинамічної незрівноваженості

$$\delta_1^{(a)} = -\frac{\mathbf{V}0_1 \mathbf{V}2_2 - \mathbf{V}0_2 \mathbf{V}2_1 - \mathbf{V}0_1 \mathbf{V}3_2 + \mathbf{V}0_2 \mathbf{V}3_1 + \mathbf{V}2_1 \mathbf{V}3_2 - \mathbf{V}2_2 \mathbf{V}3_1}{(k-1)\mathbf{D}},$$

$$\delta_2^{(a)} = \frac{\mathbf{V}0_1 \mathbf{V}1_2 - \mathbf{V}0_2 \mathbf{V}1_1 - \mathbf{V}0_1 \mathbf{V}3_2 + \mathbf{V}0_2 \mathbf{V}3_1 + \mathbf{V}1_1 \mathbf{V}3_2 - \mathbf{V}1_2 \mathbf{V}3_1}{(k-1)\mathbf{D}}. \quad (7)$$

Розроблений метод чотирьох пробних пучків оцінює аеродинамічну незрівноваженість через еквівалентну масову незрівноваженість на заданому режимі роботи гвинта. Сама ж незрівноваженість викликана геометричною неточністю виготовлення гвинта і істотно змінюється із зміною умов роботи гвинта. Метод застосовний для повітряних гвинтів зі сталим кроком – крильчаток осьових вентиляторів, пропелерів, повітряних гвинтів вітрогенераторів тощо. Його можна застосовувати і для визначення масової і гідродинамічної незрівноваженості гребних гвинтів із сталим кроком.

Для визначення амплітуди і фази коливань гвинта у двох площинах корекції можна використовувати балансувальні прилади, акселерометри з цифровими осцилографами чи платами АЦП тощо [6]. Для підвищення точності визначення складових динамічної незрівноваженості гвинта рекомендується змінювати умови роботи гвинта так, щоб аеродинамічна незрівноваженість змінилася не менше ніж на 30% [1].

В подальшому планується експериментально перевірити ефективність методу чотирьох пробних пусків на спеціально створеному стенді [5]. Вимірювати вібрації, визначати амплітуди і фази коливань тощо планується з використанням віртуальних приладів, алгоритмів розрахунків, програмного забезпечення, розроблених в [6].

Висновки

Аеродинамічну незрівноваженість повітряного гвинта можна визначити по чотирьом пробним пускам, причому така кількість пусків є мінімальною. Перший раз гвинт обертають без додавання пробних мас. Другий раз до гвинта приєднують пробну масу P_1 у першій площині корекції. Третій раз до гвинта приєднують пробну масу P_2 у другий площині корекції. Четвертий раз гвинт обертають при змінених умовах роботи, при яких змінюється за заданим законом аеродинамічна незрівноваженість, але при цьому істотно не змінюються коефіцієнти впливу.

Аеродинамічна незрівноваженість оцінюється через еквівалентну масову незрівноваженість на заданому режимі роботи гвинта.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. 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>
2. Everett L.J. (1997). Optimal Two-Plane Balance of Rigid Rotors. *Journal of Sound and Vibration*, 208 (4), 656–663. <https://doi.org/10.1006/jsvi.1997.1211>
3. Olijnichenko, L., Filimonikhin, G., Nevdakha, 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>
4. 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>
5. 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>
6. Filimonikhin, G., Yatsun, V., Matsui, A., Olijnichenko, L., & Pukalov, V. (2022). Determining experimentally the patterns of the manifestation of the Sommerfeld effect in a ball auto-balancer. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 5(7 (119)), 96–104. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.265578>

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

Сокальська Юлія Олександрівна — аспірантка кафедри деталей машин та прикладної механіки, Центральноукраїнський національний технічний університет, Кропивницький, e-mail: julija_8383@ukr.net

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

Method of Four Trial Runs for Determining Mass and Aerodynamic Unbalance of the Propeller

Abstract

It is shown that four trial runs of a propeller are sufficient for the separate determination of its mass and aerodynamic unbalance. Corresponding calculation algorithms are developed.

Keywords: propeller, balancing, balancing device, influence coefficient method, unbalance, rigid rotor.

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

Sokalska Yuliia O. — graduate student of the Department of Machine Parts and Applied Mechanics, Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, email : julija_8383@ukr.net

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