

Г. Б. Філімоніхін, проф., д-р техн. наук, **І. І. Філімоніхіна**, доц., канд. фіз.-матем. наук, **Л. С. Олійніченко**, доц., канд. техн. наук, **Ю. О. Сокальська**, **Ю. О. Остапчук**
Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна
e-mail: filimonikhin@ukr.net

Метод чотирьох пробних пусків для визначення масової і аерогідродинамічної незрівноваженості лопатевого гвинта

Теоретично обґрунтовується метод чотирьох пробних пусків для визначення масової і аерогідродинамічної незрівноваженості лопатевого гвинта. Лопатевим гвинтом може бути повітряний чи гребний гвинт з постійним кроком. Розробляється оптимальний метод, що потребує мінімальну кількість пусків лопатевого гвинта для визначення зазначених незрівноваженостей. Аерогідродинамічна незрівноваженість оцінюється масовим еквівалентом і визначається для робочого режиму роботи лопатевого гвинта. Розроблений метод застосовний на етапах виготовлення чи ремонту лопатевих гвинтів для балансування чи відбракування.

гвинт, балансування, літальний апарат, плавальний апарат, балансувальний пристрій, екранний ефект

Постановка проблеми. Основні методи визначення масової незрівноваженості роторів побудовані для лінійних роторних систем. Найменшу кількість пусків ротора для цього потребує метод коефіцієнтів впливу. Так, відповідно до методу, для визначення динамічної незрівноваженості (незрівноваженості у двох площинах корекції) жорсткого ротора достатньо провести три пробних пуска ротора, через що цей метод називають ще методом трьох пробних пусків.

Основним джерелом вібрацій в машинах з лопатевими гвинтами є масові і аерогідродинамічні незрівноваженості гвинтів. Масова складова майже не змінюється під час роботи гвинта, а аерогідродинамічна зазнає значних змін. Тому існує загальна проблема з виділення із динамічної незрівноваженості масової і аерогідродинамічної складових. У рамках загальної проблеми існує задача з визначення зазначених складових оптимальним способом, тобто мінімальною кількістю пробних пусків гвинта. Це потрібне для зменшення трудомісткості і вартості цього процесу.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Основні етапи розвитку балансувальної техніки і відповідної теорії найбільш повно відображені в роботах [1-4]. При динамічному балансуванні жорстких роторів незрівноваженість мас ротора визначається у двох площинах корекції. Оптимальним з точки зору трудомісткості методом динамічного балансування жорстких роторів є метод трьох пробних пусків [5]. Цей метод найбільш точний для лінійних роторних систем, потребує найменшу кількість пусків ротора і ґрунтується на методі коефіцієнтів впливу [6]. Так, відповідно до методу, для визначення динамічної незрівноваженості жорсткого ротора достатньо провести три пробних пуска. В [7] модернізований метод коефіцієнтів впливу для визначення динамічної незрівноваженості ротора. 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. Також в обчисленнях використовується апарат комплексних чисел, що робить алгоритми розрахунків компактними.

Основним джерелом вібрацій в машинах з лопатевими гвинтами є масова і аерогідродинамічна незрівноваженість гвинтів. Тому існує загальна проблема з балансування лопатевих гвинтів [8, 9]. При одиничному чи дрібносерійному виготовленні лопатевих гвинтів аерогідродинамічне балансування забезпечується правкою геометричної форми гвинта. Незрівноваженість мас балансується на балансувальному верстаті чи з використанням балансувального приладу. В [10] встановлена аналогія між аеродинамічною і масовою незрівноваженостями повітряного гвинта. Доведена можливість балансування аеродинамічної незрівноваженості крильчатки осьового вентилятора корегуванням мас. Сама по собі аеродинамічна незрівноваженість характеризується неточністю форми лопатей крильчатки, насадженням її на вал з ексцентриситетом і перекосом. В [11] показано, що ці геометричні неточності мають масовий еквівалент.

З появою малих безпілотних і пілотованих апаратів виробництво лопатевих гвинтів стало масовим. В таких умовах традиційні методи балансування незастосовні, бо трудомісткі. При виготовленні чи ремонті гвинтів актуальною стає більш часткова проблема з виділення із динамічної незрівноваженості масової і аерогідродинамічної складових [12, 13]. В [13] показано, що для визначення масової і аерогідродинамічної 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 аерогідродинамічну незрівноваженість і не змінюють незрівноваженість мас. При цьому визначається масовий еквівалент аерогідродинамічної незрівноваженості. Для зміни умов роботи повітряних гвинтів запропоновано використовувати зміну температури повітря чи газу [14], зміну тиску [15], заміну повітря чи газу на газ іншої щільності [16]. У випадку повітряних і гребних гвинтів запропоновано використовувати: реверсний режим обертання гвинта [17, 18]; екранний ефект [19].

Розроблені способи [13-19] потребують шість пробних пусків гвинта: три для визначення динамічної незрівноваженості гвинта при нормальних умовах роботи; три – при змінених умовах роботи гвинта. Але така кількість пусків гвинта може бути надмірною.

Постановка завдання. Мета роботи – розробити метод чотирьох пробних пусків повітряного (гребного) гвинта для окремого визначення його масової і аеродинамічної (гідродинамічної) незрівноваженості.

Завдання досліджень. Для досягнення мети необхідно розв'язати наступні завдання:

- 1) розробити оптимальний з точки зору кількості пусків лопатевого гвинта метод визначення його масової і аерогідродинамічної незрівноваженості;
- 2) розробити конструкцію універсального стенду для реалізації методу у випадку гребних і повітряних гвинтів.

Виклад основного матеріалу.

1. Метод чотирьох пробних пусків лопатевого гвинта для визначення його масової і аерогідродинамічної незрівноваженості.

1.1. Алгоритм розрахунку динамічної незрівноваженості гвинта.

Розмітка ротора, місця встановлення датчиків вібрацій, їх тип, датчик обертів, тип сигналів, що знімаються з датчиків тощо обговорені в роботі [7]. Сигнал з будь-якого датчика вібрацій обробляється балансувальним приладом. В результаті визначається характеристика вібрацій у вигляді комплексного числа

$$\mathbf{V} = A e^{i\varphi}, \quad (1)$$

де A – модуль; φ – фаза вібрацій у напрямку датчику вібрацій; i – уявна одиниця.

Гвинт встановлюють на вал балансувального верстату для динамічного балансування і три рази визначають амплітуди і фази коливань валу у площині першого і другого датчику вібрацій, рознесених по подовжній осі валу при обертанні гвинта з однією і тією ж сталою кутовою швидкістю.

Перший раз гвинт обертають без додавання пробних мас і визначають $A_{01}, \varphi_{01}, A_{02}, \varphi_{02}$. По цим амплітудам і фазам визначаються відповідні комплексні числа $\mathbf{V}_{0j} = A_{0j} e^{i\varphi_{0j}}$, $j=1,2$, що характеризують вібрації. Відповідно до методу коефіцієнтів впливу вібрації датчиків, викликані невідомими незрівноваженими масами $\mathbf{Q}_1, \mathbf{Q}_2$, записаними у комплексному вигляді, визначаються таким чином

$$\mathbf{V}_{0j} = \mathbf{a}_{j1} \mathbf{Q}_1 + \mathbf{a}_{j2} \mathbf{Q}_2, \quad j=1,2, \quad (2)$$

де $\mathbf{a}_{11}, \mathbf{a}_{12}, \mathbf{a}_{21}, \mathbf{a}_{22}$ – невідомі комплексні коефіцієнти впливу.

Другий раз до гвинта приєднують пробну масу P_1 у першій площині корекції і визначають $A_{11}, \varphi_{11}, A_{12}, \varphi_{12}$. По цим амплітудам і фазам визначаються відповідні комплексні числа $\mathbf{V}_{1j} = A_{1j} e^{i\varphi_{1j}}$, $j=1,2$, що характеризують вібрації. Вібрації валу викликані незрівноваженими масами $\mathbf{Q}_1 + \mathbf{P}_1, \mathbf{Q}_2$, записаними у комплексному вигляді, визначаються таким чином

$$\mathbf{V}_{1j} = \mathbf{a}_{j1} (\mathbf{Q}_1 + \mathbf{P}_1) + \mathbf{a}_{j2} \mathbf{Q}_2, \quad j=1,2. \quad (3)$$

Третій раз до гвинта приєднують пробну масу P_2 у другій площині корекції і визначають $A_{21}, \varphi_{21}, A_{22}, \varphi_{22}$. По цим амплітудам і фазам визначаються відповідні комплексні числа $\mathbf{V}_{2j} = A_{2j} e^{i\varphi_{2j}}$, $j=1,2$, що характеризують вібрації. Вібрації валу викликані невідомими незрівноваженими масами $\mathbf{Q}_1, \mathbf{Q}_2 + \mathbf{P}_2$, записаними у комплексному вигляді, визначаються таким чином

$$\mathbf{V}_{2j} = \mathbf{a}_{j1} \mathbf{Q}_1 + \mathbf{a}_{j2} (\mathbf{Q}_2 + \mathbf{P}_2), \quad j=1,2. \quad (4)$$

Невідомі незрівноважені маси $\mathbf{Q}_1, \mathbf{Q}_2$ пов'язані з пробними масами наступним чином

$$\mathbf{Q}_j = \mathbf{P}_j \mathbf{d}_j, \quad j=1,2. \quad (5)$$

Комплексні числа $\mathbf{d}_1, \mathbf{d}_2$, подані у експоненціальній формі

$$\mathbf{d}_1 = d_1 e^{i\psi_1}, \quad \mathbf{d}_2 = d_2 e^{i\psi_2}, \quad (6)$$

визначають, що модуль незрівноваженої маси Q_1 (Q_2) більше відповідної пробної маси P_1 (P_2) у d_1 (d_2) разів, а кут ψ_1 (ψ_2) задає у першій (другій) площині корекції положення незрівноваженої маси Q_1 (Q_2) і відраховується у першій (другій) площині корекції від пробної маси P_1 (P_2) до незрівноваженої маси Q_1 (Q_2) проти ходу стрілки годинника.

Отже, одержані 8 рівнянь з (2)-(5) для визначення 8 невідомих $\mathbf{a}_{11}, \mathbf{a}_{12}, \mathbf{a}_{21}, \mathbf{a}_{22}, \mathbf{Q}_1, \mathbf{Q}_2, \mathbf{d}_1, \mathbf{d}_2$.

З рівнянь (2)-(5) одержуються такі рівняння для визначення $\mathbf{d}_1, \mathbf{d}_2$.

$$\mathbf{d}_1 = (\mathbf{V}_{01}\mathbf{V}_{22} - \mathbf{V}_{02}\mathbf{V}_{21}) / \mathbf{D}, \quad \mathbf{d}_2 = -(\mathbf{V}_{01}\mathbf{V}_{12} - \mathbf{V}_{02}\mathbf{V}_{11}) / \mathbf{D}, \quad (7)$$

де

$$\mathbf{D} = \mathbf{V}_{01}\mathbf{V}_{12} - \mathbf{V}_{02}\mathbf{V}_{11} - \mathbf{V}_{01}\mathbf{V}_{22} + \mathbf{V}_{02}\mathbf{V}_{21} + \mathbf{V}_{11}\mathbf{V}_{22} - \mathbf{V}_{12}\mathbf{V}_{21}. \quad (8)$$

Отже, три пробних пуски гвинта при нормальних умовах роботи необхідні для визначення динамічної незрівноваженості гвинта при цих умовах.

1.2. Визначення окремих складових динамічної незрівноваженості.

Незрівноважені маси $\mathbf{Q}_1, \mathbf{Q}_2$ мають складові $\mathbf{Q}_1^{(m)}, \mathbf{Q}_2^{(m)}$ від незрівноваженості мас і складові $\mathbf{Q}_1^{(a)}, \mathbf{Q}_2^{(a)}$ від аерогідродинамічної незрівноваженості:

$$\mathbf{Q}_1 = \mathbf{Q}_1^{(m)} + \mathbf{Q}_1^{(a)}, \quad \mathbf{Q}_2 = \mathbf{Q}_2^{(m)} + \mathbf{Q}_2^{(a)}, \quad (9)$$

де незрівноважені маси $\mathbf{Q}_1, \mathbf{Q}_1^{(m)}, \mathbf{Q}_1^{(a)}, \mathbf{Q}_2, \mathbf{Q}_2^{(m)}, \mathbf{Q}_2^{(a)}$ подані у комплексному вигляді.

З метою окремого визначення як незрівноваженості мас, так і аерогідродинамічної незрівноваженості, пропонується визначати амплітуди і фази коливань $A_{3_1}, \varphi_{3_1}, A_{3_2}, \varphi_{3_2}$ гвинта у площинах двох датчиків вібрацій при змінених умовах роботи гвинта. У змінених умовах змінюється за відомим законом тільки аерогідродинамічна незрівноваженість гвинта (і не зазнають змін масова незрівноваженість, коефіцієнти впливу, модуль швидкості обертання гвинта):

$$\tilde{\mathbf{Q}}_j^{(a)} = k\mathbf{Q}_j^{(a)}, \quad / j = 1, 2 /, \quad (10)$$

де k – коефіцієнт, який характеризує змінні умови роботи гвинта.

Відповідно до результатів роботи [13]

$$k = k_\rho k_e k_\omega, \quad (11)$$

причому: $k_\rho = \rho_1 / \rho_0$ – відношення питомої ваги ρ_1 повітря, газу (рідини) при змінених умовах, до питомої ваги ρ_0 при нормальних умовах роботи гвинта; $k_e = F_1 / F_0 > 1$ – відношення осьової аеродинамічної сили F_1 , заміряної при змінених умовах роботи до цієї сили F_0 , заміряної при нормальних умовах роботи гвинта, враховується тільки при встановленні екрану, інакше $k_e = 1$;

$$k_\omega = \begin{cases} 1 - \text{при прямому обертанні гвинта;} \\ -1 - \text{при реверсному обертанні гвинта.} \end{cases} \quad (12)$$

Зауважимо, що у випадку повітряного гвинта питому вагу повітря чи газу можна змінювати зміною температури, тиску повітря чи газу, або заміною повітря чи газу на інший газ з іншою питомою вагою [13].

По амплітудам і фазам $A_{3_1}, \varphi_{3_1}, A_{3_2}, \varphi_{3_2}$ визначаються відповідні комплексні числа $\mathbf{V}_{3_j} = A_{3_j} e^{i\varphi_{3_j}}, / j = 1, 2 /$, що характеризують вібрації.

У змінених умовах роботи гвинта його незрівноважені маси зміняться таким чином:

$$\tilde{\mathbf{Q}}_j = \mathbf{Q}_j^{(m)} + k_\rho \mathbf{Q}_j^{(a)} = \mathbf{Q}_j^{(m)} + \mathbf{Q}_j^{(a)} + (k - 1)\mathbf{Q}_j^{(a)} = \mathbf{Q}_j + (k - 1)\mathbf{Q}_j^{(a)}, \quad / j = 1, 2 / . \quad (13)$$

Тут враховано, що незрівноважені маси $\mathbf{Q}_1^{(m)}, \mathbf{Q}_2^{(m)}$ при зміні умов роботи гвинта не зміняться.

Вібрації валу викликані невідомими незрівноваженими масами (13), записаними у комплексному вигляді, визначаються таким чином

$$\mathbf{V}_{3_j} = \mathbf{a}_{j1} \tilde{\mathbf{Q}}_1 + \mathbf{a}_{j2} \tilde{\mathbf{Q}}_2 = \mathbf{a}_{j1} [\mathbf{Q}_1 + (k - 1)\mathbf{Q}_1^{(a)}] + \mathbf{a}_{j2} [\mathbf{Q}_2 + (k - 1)\mathbf{Q}_2^{(a)}], \quad / j = 1, 2 / . \quad (14)$$

Подамо (14) у вигляді

$$\mathbf{V}3_j = \mathbf{a}_{j1}\mathbf{Q}_1 + \mathbf{a}_{j2}\mathbf{Q}_2 + (k-1)(\mathbf{a}_{j1}\mathbf{Q}_1^{(a)} + \mathbf{a}_{j2}\mathbf{Q}_2^{(a)}), \quad / j=1,2/. \quad (15)$$

З (15), з врахуванням (2), одержуємо

$$\mathbf{V}3_j = \mathbf{V}0_j + (k-1)(\mathbf{a}_{j1}\mathbf{Q}_1^{(a)} + \mathbf{a}_{j2}\mathbf{Q}_2^{(a)}), \quad / j=1,2/.$$

Звідки знаходимо

$$\mathbf{a}_{j1}\mathbf{Q}_1^{(a)} + \mathbf{a}_{j2}\mathbf{Q}_2^{(a)} = \frac{\mathbf{V}3_j - \mathbf{V}0_j}{k-1}, \quad / j=1,2/. \quad (16)$$

Невідомі незрівноважені маси $\mathbf{Q}_1^{(a)}, \mathbf{Q}_2^{(a)}$ пов'язані з пробними масами наступним чином

$$\mathbf{Q}_j^{(a)} = \mathbf{P}_j\mathbf{d}_j^{(a)}, \quad / j=1,2/, \quad (17)$$

де комплексні коефіцієнти $\mathbf{d}_1^{(a)}, \mathbf{d}_2^{(a)}$ подібні до коефіцієнтів $\mathbf{d}_1, \mathbf{d}_2$, але визначають незрівноважені маси від аерогідродинамічної незрівноваженості гвинта при нормальних умовах роботи гвинта.

З рівнянь (2)-(5) і (16), (17) знаходимо такі рівняння для визначення двох мас від аерогідродинамічної незрівноваженості гвинта:

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

$$\mathbf{d}_2^{(a)} = \frac{\mathbf{V}0_1\mathbf{V}1_2 - \mathbf{V}0_2\mathbf{V}1_1 - \mathbf{V}0_1\mathbf{V}3_2 + \mathbf{V}0_2\mathbf{V}3_1 + \mathbf{V}1_1\mathbf{V}3_2 - \mathbf{V}1_2\mathbf{V}3_1}{(k_p - 1)\mathbf{D}}. \quad (18)$$

Невідомі незрівноважені маси $\mathbf{Q}_1^{(m)}, \mathbf{Q}_2^{(m)}$ пов'язані з пробними масами наступним чином

$$\mathbf{Q}_j^{(m)} = \mathbf{P}_j\mathbf{d}_j^{(m)}, \quad / j=1,2/. \quad (19)$$

де комплексні коефіцієнти $\mathbf{d}_1^{(m)}, \mathbf{d}_2^{(m)}$ подібні до коефіцієнтів $\mathbf{d}_1, \mathbf{d}_2$, але визначають незрівноважені маси від масової незрівноваженості гвинта.

Оскільки при нормальних умовах роботи гвинта

$$\mathbf{d}_j = \mathbf{d}_j^{(m)} + \mathbf{d}_j^{(a)}, \quad / j=1,2/. \quad (20)$$

то

$$\mathbf{d}_j^{(m)} = \mathbf{d}_j - \mathbf{d}_j^{(a)}, \quad / j=1,2/. \quad (21)$$

Це коефіцієнти для визначення двох мас від масової незрівноваженості гвинта.

2. Універсальний стенд для визначення незрівноваженостей лопатевого гвинта.

На рис. 1 показана схема універсального стенду для визначення масової і аерогідродинамічної незрівноваженості лопатевого гвинта – як гребного, так і повітряного.

Лопатевий гвинт 1 має дві площини корекції 2, 3, у яких визначаються незрівноваженості гвинта. Лопатевий гвинт встановлюється на стенд 4. Стенд має вал 5, на який насаджується гвинт. Вал обертається у прямому чи реверсному напрямку електродвигуном 6. Електродвигун підтримує пружна пластина 7, що може повертатися навколо шарніра 8. Двигун відносно шарніра зрівноважує протизвага 9. Пружна пластина утримується у вертикальному положенні опорою 10, суміщеною з динамометром. Для створення ефекту Землі використовується екран 11, який розміщується перед лопатевим гвинтом. На двигун встановлені два датчика вібрацій 12,

13. Початок нового оберту валу фіксує датчик обертів 14. Балансувальний прилад 15 приймає і обробляє сигнали з датчиків вібрацій і обертів, розраховує амплітуди і фази обертових складових вібрацій у двох поперечних площинах датчиків вібрацій. Осьова сила, створена гвинтом, вимірюється динамометром 10.

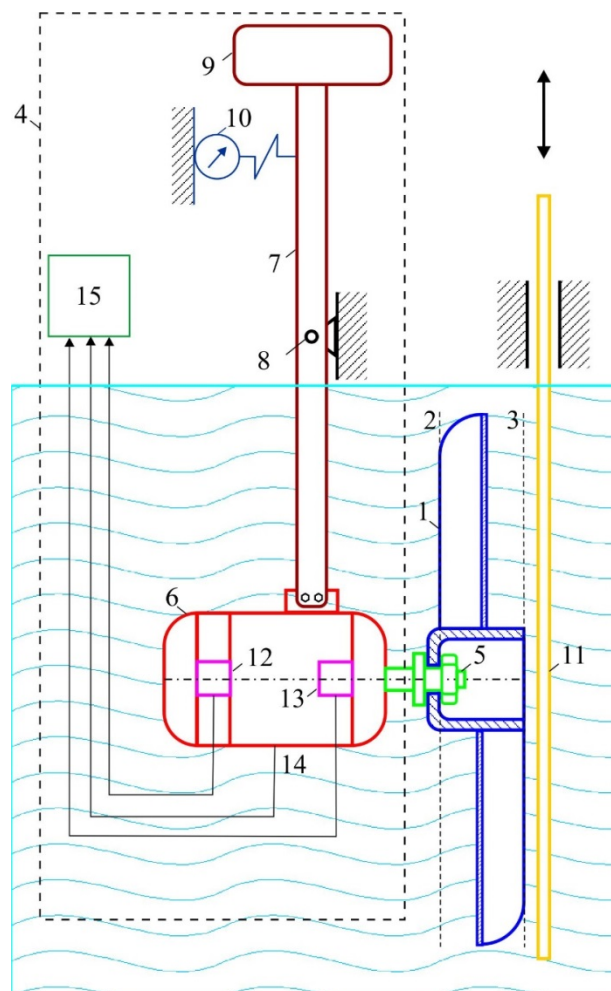


Рисунок – Універсальний стенд для визначення масової і аерогідродинамічної незрівноваженості лопатевого гвинта

Джерело: розроблено авторами

Зауважимо, що датчиками вібрацій можуть бути акселерометри, датчики віброшвидкостей чи вібропереміщень [7]. Не принципово за яким алгоритмом обробляються сигнали з датчиків. Балансувальний прилад повинен після кожного пробного запуску визначати амплітуди і фази вібрацій у площинах двох датчиків вібрацій.

У випадку гребного гвинта він знаходиться у воді чи рідині. Змінені умови роботи гребного гвинта забезпечуються [13]: заміною води на рідину іншої питомої ваги; реверсним обертанням; встановленням екрану.

У випадку повітряного гвинта він знаходиться у повітрі. Змінені умови роботи повітряного гвинта забезпечуються [13]: заміною повітря на газ іншої питомої ваги; зміною температури повітря; зміною тиску; реверсним обертанням; встановленням екрану.

Висновки.

1. Аерогідродинамічну незрівноваженість лопатевого 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 у першій площині корекції. Третій раз до гвинта приєднують пробну масу у другий площині корекції. Четвертий раз гвинт обертають при змінених умовах роботи, при яких змінюється за заданим законом тільки аерогідродинамічна незрівноваженість, але при цьому істотно не змінюються коефіцієнти впливу.

Аеродинамічна (гідродинамічна) незрівноваженість оцінюється масовим еквівалентом і визначається для робочого режиму роботи гвинта.

2. Конструктивно можна реалізувати універсальний стенд для визначення масової і аерогідродинамічної незрівноваженості лопатевого гвинта – як гребного, так і повітряного.

У випадку гребного гвинта він знаходиться у воді чи рідині. Змінені умови роботи гребного гвинта забезпечуються: заміною води на рідину іншої питомої ваги; реверсним обертанням; встановленням екрану.

У випадку повітряного гвинта він знаходиться у повітрі. Змінені умови роботи повітряного гвинта забезпечуються: заміною повітря на газ іншої питомої ваги; зміною температури повітря; зміною тиску; реверсним обертанням; встановленням екрану.

Список літератури

1. Darlow, M.S. Review of Literature on Rotor Balancing. In: Balancing of High-Speed Machinery. Mechanical Engineering Series. Springer, New York, NY. 1989, pp. 39-52. https://doi.org/10.1007/978-1-4612-3656-6_3
2. Foiles, W.C., Allaire, P. E., Gunter, E. J., Review: Rotor Balancing. Shock and Vibration. 1998, Vol. 5. Issue 5-6, 648518, pp. 325-336. <https://doi.org/10.1155/1998/648518>
3. Ibraheem, A., Ghazaly, N., Abd el- Jaber, G. (2019). Review of Rotor Balancing Techniques. American Journal of Industrial Engineering, Vol. 6, Issue 1, pp. 19–25. URL: <https://www.sciepub.com/ajie/abstract/11311>
4. Li, L., Cao, S., Li, J., Nie, R., Hou L. Review of Rotor Balancing Methods. Machines, 2021. Vol. 9, Issue 5: 89. <https://doi.org/10.3390/machines9050089>
5. Everett L.J. (1997). Optimal Two-Plane Balance of Rigid Rotors. Journal of Sound and Vibration, 1997. Vol. 208, Issue 4, pp. 656–663. <https://doi.org/10.1006/jsvi.1997.1211>
6. Xu, X. and Fan, P. Rigid Rotor Dynamic Balancing by Two-Plane Correction with the Influence Coefficient Method Applied Mechanics & Materials, 2013, Vols. 365-366, pp. 211-215 <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.365-366.211>
7. Філімоніхін Г.Б., Сокальська Ю.О., Остапчук Ю.О. Модернізація методу коефіцієнтів впливу для визначення динамічної незрівноваженості жорсткого двохопороного ротора. Центральнорукраїнський науковий вісник. Технічні науки. 2025. Вип. 12(43), ч. I, С. 126-132. DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.12\(43\).1.126-132](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.12(43).1.126-132)
8. Best, S. (1945). Propeller Balancing Problems. SAE Transactions, 53, 648–659. <http://www.jstor.org/stable/44467824>
9. 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>
10. Філімоніхін, Г. Б., & Олійніченко, Л. С. (2015). Дослідження можливості зрівноваження аеродинамічного дисбалансу крильчатки осьового вентилятора корегуванням мас. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 5(7(77)), 30–35. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2015.51195>
11. Filimonikhin, G., Filimonikhina, I., Bilyk, Y., Krivoblotsky, L., & Machok, Y. (2021). Theoretical study into the aerodynamic unbalance of a propeller blade and the correcting masses this balance it. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 4(7(112)), 60–66. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.238289>
12. Bertelè, M., & Bottasso, CL (2022). Automatic detection and correction of aerodynamic and inertial rotor unbalances in wind turbine rotors. Journal of Physics: Conference Series, 2265. DOI <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2265/3/032100>

13. Filimonikhin G., Ostapchuk Y., Sokalska Y., Olijnichenko L., Pirogov V. Justification of Methods for Determining Mass and Aerodynamic (Hydrodynamic) Unbalances of a Propeller. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки.* 2025. Вип. 12(43), ч. II. pp. 87-101. [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.12\(43\).2.87-101](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.12(43).2.87-101)
14. Спосіб визначення незрівноваженостей повітряного гвинта : патент на корисну модель 161332 Україна : МПК G01M 1/12, G01M 1/22 (2006.01). № u202500165 ; заявл. 14.01.2025 ; опубл. 26.11.2025, Бюл. № 48/2025.
15. Спосіб визначення незрівноваженостей повітряного гвинта : патент на корисну модель 159842 Україна : МПК G01M 1/12, G01M1/22 (2006.01). № u202500166 ; заявл. 14.01.2025 ; опубл. 09.07.2025, Бюл. № 28/2025.
16. Спосіб визначення незрівноваженостей повітряного гвинта : патент на корисну модель 159843 Україна : МПК G01M 1/12, G01M 1/22 (2006.01). № u202500167 ; заявл. 14.01.2025 ; опубл. 09.07.2025, Бюл. № 28/2025.
17. Спосіб визначення незрівноваженостей повітряного гвинта : патент на корисну модель 159914 Україна : МПК G01M 1/12, G01M 1/22 (2006.01). № u202500164 ; заявл. 14.01.2025 ; опубл. 16.07.2025, Бюл. № 29/2025.
18. Спосіб визначення незрівноваженостей повітряного гвинта : патент на корисну модель 159841 Україна : МПК G01M 1/12, G01M 1/22 (2006.01). № u202500163 ; заявл. 14.01.2025 ; опубл. 09.07.2025, Бюл. № 28/2025.
19. Спосіб визначення незрівноваженостей гребного гвинта: патент на корисну модель 162030 Україна : МПК G01M 1/12, G01M 1/22 (2006.01). № u202503872; заявл. 11.08.2025 ; опубл. 04.02.2026, Бюл. № 5/2026.

References

1. Darlow, M.S. Review of Literature on Rotor Balancing. In: *Balancing of High-Speed Machinery.* Mechanical Engineering Series. Springer, New York, NY, 1989, pp. 39-52. https://doi.org/10.1007/978-1-4612-3656-6_3
2. Foiles, W.C., Allaire, P. E., Gunter, E. J., Review: Rotor Balancing. *Shock and Vibration.* 1998, Vol. 5. Issue 5-6, 648518, pp. 325-336. <https://doi.org/10.1155/1998/648518>
3. Ibraheem, A., Ghazaly, N., Abd el- Jaber, G. (2019). Review of Rotor Balancing Techniques. *American Journal of Industrial Engineering,* Vol. 6, Issue 1, pp. 19–25. URL: <https://www.sciepub.com/ajie/abstract/11311>
4. Li, L., Cao, S., Li, J., Nie, R., Hou L. Review of Rotor Balancing Methods. *Machines,* 2021. Vol. 9, Issue 5: 89. <https://doi.org/10.3390/machines9050089>
5. Everett L.J. (1997). Optimal Two-Plane Balance of Rigid Rotors. *Journal of Sound and Vibration,* 1997. Vol. 208, Issue 4, pp. 656–663. <https://doi.org/10.1006/jsvi.1997.1211>
6. Xu, X. and Fan, P. Rigid Rotor Dynamic Balancing by Two-Plane Correction with the Influence Coefficient Method Applied *Mechanics & Materials,* 2013, Vols. 365-366, pp. 211-215 <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.365-366.211>
7. Filimonikhin G., Ostapchuk Y., Sokalska Y. Modernization of the Influence Coefficient Method for Determining the Dynamic Unbalance of a Rigid Two-support Rotor. *Central Ukrainian Scientific Bulletin. Technical Sciences.* 2025. Issue 12(43), Part I, 126-132. [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.12\(43\).1.126-132](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.12(43).1.126-132) [in Ukrainian].
8. Best, S. (1945). Propeller Balancing Problems. *SAE Transactions,* 53, 648–659. <http://www.jstor.org/stable/44467824>
9. 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>
10. Filimonikhin, G., Olijnichenko, L. (2015). Investigation of the possibility of balancing aerodynamic unbalance of the impeller of the axial fan by correction of masses. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies,* 5(7(77)), 30–35. <http://dx.doi.org/10.15587/1729-4061.2015.51195> [in Ukrainian].
11. Filimonikhin, G., Filimonikhina, I., Bilyk, Y., Krivoblotsky, L., & Machok, Y. (2021). Theoretical study into the aerodynamic unbalance of a propeller blade and the correcting masses this balance it. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies,* 4(7(112)), 60–66. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.238289>
12. Bertelè, M., & Bottasso, CL (2022). Automatic detection and correction of aerodynamic and inertial rotor unbalances in wind turbine rotors. *Journal of Physics: Conference Series,* 2265. DOI <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2265/3/032100>

13. Filimonikhin G., Ostapchuk Y., Sokalska Y., Olijnichenko L., Pirogov V. Justification of Methods for Determining Mass and Aerodynamic (Hydrodynamic) Unbalances of a Propeller. Central Ukrainian Scientific Bulletin. Technical Sciences. 2025. Issue 12(43), Part II, 87-101. [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.12\(43\).2.87-101](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.12(43).2.87-101)
14. Method for determining propeller imbalances: utility model patent 161332 Ukraine: IPC G01M 1/12, G01M 1/22 (2006.01). No. u202500165; appl. 14.01.2025; publ. 26.11.2025, Bull. No. 48/2025 [in Ukrainian].
15. Method for determining propeller imbalances: utility model patent 159842 Ukraine: IPC G01M 1/12, G01M1/22 (2006.01). No. u202500166; appl. 14.01.2025; publ. 09.07.2025, Bull. No. 28/2025 [in Ukrainian].
16. Method for determining propeller imbalances: utility model patent 159843 Ukraine: IPC G01M 1/12, G01M 1/22 (2006.01). No. u202500167; appl. 14.01.2025; publ. 09.07.2025, Bull. No. 28/2025 [in Ukrainian].
17. Method for determining propeller imbalances: utility model patent 159914 Ukraine: IPC G01M 1/12, G01M 1/22 (2006.01). No. u202500164; appl. 14.01.2025; publ. 16.07.2025, Bull. No. 29/2025 [in Ukrainian].
18. Method for determining propeller imbalances: utility model patent 159841 Ukraine: IPC G01M 1/12, G01M 1/22 (2006.01). No. u202500163; appl. 14.01.2025; publ. 09.07.2025, Bull. No. 28/2025 [in Ukrainian].
19. Method for determining propeller imbalances: utility model patent 162030 Ukraine: IPC G01M 1/12, G01M 1/22 (2006.01). No. u202503872; appl. 11.08.2025; publ. 04.02.2026, Bull. No. 5/2026 [in Ukrainian].

Gennady Filimonikhin, Prof., Dr. Tech. Sci., **Irina Filimonikhina**, Assoc. Prof., PhD phys. and math. sci., **Lyubov Olijnichenko**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Yulia Sokalska**, **Yulia Ostapchuk**
Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine

Four-run Test Methods for Determining the Mass and Aerohydrodynamic Imbalance of a Propeller

A new optimal method for separately determining the mass and aerohydrodynamic unbalance of a fixed-pitch propeller is theoretically substantiated. For this purpose, it is proposed to start the propeller four times: the first three times under normal propeller operating conditions, as in the three-trial run method; the fourth time - under changed conditions, under which only the aerohydrodynamic component of the propeller unbalance changes. A propeller can be an air or marine propeller. An air propeller has an aerodynamic component of unbalance, and a marine propeller has a hydrodynamic component.

The changed operating conditions of the propeller are provided by: changing the density of air, gas or liquid; using reverse rotation of the propeller; using the ground effect. In particular, the change in density is achieved by replacing the working medium with a medium with a different density or by changing its temperature or pressure.

The aerohydrodynamic unbalance of the propeller is estimated by the mass equivalent and is determined for the operating mode of the propeller.

The developed method is optimal because it requires a minimum number of propellers starts to determine the specified imbalances. The developed method is applicable at the stages of manufacturing or repairing bladed propellers for balancing or rejection.

propeller, balancing, aircraft, swimming apparatus, balancing device, ground effect

Одержано (Received) 26.02.2026

Прорецензовано (Reviewed) 05.03.2026

Прийнято до друку (Approved) 12.03.2026