

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«ДНІПРОВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»



ОЛІЙНИЧЕНКО ЛЮБОВ СЕРГІЇВНА

УДК 62-752+62-755 : 621.634

ЗМЕНШЕННЯ ВІБРАЦІЙ ОСЬОВИХ ВЕНТИЛЯТОРІВ НИЗЬКОГО ТИСКУ
БАЛАНСУВАННЯМ ЗВИЧАЙНОЇ І АЕРОДИНАМІЧНОЇ
НЕЗРІВНОВАЖЕНОСТЕЙ

05.02.09 – Динаміка і міцність машин

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Дніпро – 2018

Дисертація є рукописом.

Робота виконана на кафедрі деталей машин та прикладної механіки Центральноукраїнського національного технічного університету (м. Кропивницький) Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор
Філімоніхін Геннадій Борисович,
завідувач кафедри деталей машин та прикладної механіки Центральноукраїнського національного технічного університету (м. Кропивницький) Міністерства освіти і науки України.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Бабенко Андрій Єлісейович,
професор кафедри динаміки і міцності машин та опору матеріалів, Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Міністерства освіти і науки України;

кандидат технічних наук
Гадяка Володимир Григорович,
технічний директор,
ТОВ «Екогазінжиніринг» (м. Суми).

Захист відбудеться “28” 11 2018 р. о 14:30 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради К 08.080.08 при Національному технічному університеті «Дніпровська політехніка» Міністерства освіти і науки України (49005, м. Дніпро, пр. Дмитра Яворницького, 19, т. (0562) 47-24-11

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Національного технічного університету «Дніпровська політехніка» за адресою:
49005, м. Дніпро, пр. Дмитра Яворницького, 19.

Автореферат розісланий “27” 10 2018 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради
кандидат технічних наук, доцент



К.А. Зіборов

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Осьові вентилятори низького тиску широко застосовуються як в промисловості, так і побуті. Основним джерелом вібрацій таких машин є звичайна і аеродинамічна незрівноваженість крильчатки. Як правило, їх балансують до початку експлуатації вентилятора. Для цього спочатку балансують аеродинамічну незрівноваженість правкою форми крильчатки, а потім – звичайну, балансуванням обертових частин вентилятора в зборі. При цьому процес правки форми крильчатки більш трудомісткий і менш розроблений і точний, ніж процес балансування ротора.

Незрівноваженість крильчатки під час експлуатації вентилятора постійно змінюється через налипання бруду, корозії, зношення під дією твердих абразивних частинок, деформації лопатей, під час їх чищення тощо. В результаті, балансування вентилятора постійно порушується і з'являється потреба автоматично добалансовувати крильчатку на ходу в процесі експлуатації вентилятора. Для балансування звичайної незрівноваженості знайшли застосування кульові автобалансири (АБ). Кулі в них з часом самі приходять у те положення, в якому балансують ротор і далі обертаються з ним як одне ціле, поки не почне змінюватися незрівноваженість, чи не з'являється збурення іншого походження. Відомо, що: якщо ротор короткий, то звичайну незрівноваженість можливо балансувати тільки статично одним пасивним АБ, розташованим як можна ближче до площини статичної незрівноваженості; якщо довгий – можливо балансувати, як описано вище, статично, або динамічно двома пасивними АБ, розташованими в двох різних площинах корекції. Але крильчатка – короткий ротор, що може бути насадженим на вал з ексцентриситетом і перекосом і тому статичного балансування може виявитися недостатньо.

Тому визначення впливу аеродинамічної незрівноваженості на динаміку вентилятора у порівнянні зі звичайною й встановлення залежностей сил незрівноваженості від кутової швидкості обертання ротора і густини повітря (газу), а також можливості балансування ротора коригуванням мас до початку й під час експлуатації пасивними АБ є **актуальною науковою задачею**.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Дисертаційна робота виконана в Центральноукраїнському національному технічному університеті відповідно до держбюджетних тем: “Зрівноваження і захист обертових тіл” держреєстрація № 0112U001108, період виконання 2012-2014 р.р. та “Динаміка механічних систем, до складу яких входить обертове несуче тіло із приєднаними тілами” держреєстрація № 0116U001486, період виконання 2016-2018 р.р. та “Конструкція та працездатність високопродуктивних і енергоефективних вібротомарин з віброзбудниками у вигляді пасивних автобалансирів” держреєстрація № 0117U003725, період виконання 2017-2021 р.р., і планам наукових робіт кафедри деталей машин та прикладної механіки.

Мета і задачі дослідження. Метою роботи є зменшення вібрацій осьових вентиляторів низького тиску статичним і динамічним балансуванням звичайної і аеродинамічної незрівноваженостей як до початку експлуатації – корегуванням мас, так і під час роботи вентилятора – пасивними АБ та розробка методики розрахунку аеродинамічної незрівноваженості.

Для реалізації цієї мети потрібно вирішити наступні завдання:

1) визначити аеродинамічні сили, що діють на крильчатку осьового вентилятора та незрівноваженість від них, порівняти звичайну та аеродинамічну незрівноваженості;

2) визначити, чи можливе балансування обох незрівноваженостей до початку експлуатації – коригуванням мас, та під час роботи вентилятора – пасивними АБ, розробити спосіб динамічного балансування двома АБ коротких роторів;

3) розробити методику розрахунку аеродинамічної незрівноваженості;

4) експериментально дослідити динаміку осьового вентилятора типу В 06-300 на натурному стенді з метою оцінки впливу АБ на вібрації вентилятора при розгоні і на вибігу, та оцінки точності статичного і динамічного балансування обертових частин в зборі при усталеному русі;

5) дослідити динаміку осьового вентилятора типу В 06-300, використовуючи 3D модель, з метою оцінки впливу АБ на вібраційний стан осьового вентилятора, впливу різних факторів на точність балансування та визначення раціональних параметрів АБ для динамічного балансування обертових частин вентилятора у зборі.

Ідея роботи – використовуючи аналогію між незрівноваженостями зменшувати вібрації осьового вентилятора низького тиску як до початку експлуатації, так і під час роботи вентилятора корегуванням мас.

Об'єктом дослідження є динамічні процеси в осьових вентиляторах низького тиску при наявності звичайної і аеродинамічної незрівноваженостей.

Предметом дослідження є залежність динаміки осьового вентилятора від аеродинамічної незрівноваженості, закономірності процесів звичайного і аеродинамічного балансування крильчатки осьового вентилятора корегуванням мас і пасивними АБ.

Методи дослідження. Для вирішення поставлених задач використовувалися методи теоретичної механіки, елементи дискової теорії повітряного гвинта та теорії повітряного гвинта Загордана, загальної теорії автобалансування. Результати підтверджуються розрахунками на ПК в програмах комп'ютерної алгебри MathCad_15 та статистичного аналізу Statistica_6, 3D моделюванням у комп'ютерній САПР SolidWorks із застосуванням модуля Cosmos Motion і натурними експериментами.

Наукова новизна одержаних результатів.

Наукові положення, які виносяться на захист:

1. Аеродинамічна і звичайна незрівноваженості приводяться до двох

площин корекції, сили від цих незрівноваженостей пропорційні квадрату кутової швидкості обертання ротора, але аеродинамічна – прямопропорційно залежить від густини повітря (газу).

2. Аеродинамічну незрівноваженість можна балансувати до початку експлуатації ротора коригуванням мас та під час експлуатації пасивними АБ, але точність балансування змінюється в залежності від густини повітря (газу).

Наукова новизна одержаних результатів полягає в тому що:

1. Вперше встановлено, що аеродинамічна незрівноваженість, яка породжена неточним насадженням крильчатки на вал ротора чи неточним виготовленням крильчатки, подібна до звичайної, бо обидві приводяться до двох площин корекції і сили від них пропорційні квадрату кутової швидкості обертання ротора, однак аеродинамічна – залежить від густини повітря (газу), причому прямопропорційно.

2. Вперше розроблено правило врахування аеродинамічної незрівноваженості в математичній моделі руху осьового вентилятора та встановлено, що ця незрівноваженість переважно динамічна і тому її доцільно балансувати в двох площинах корекції (динамічно).

3. Вперше доведена можливість балансування звичайної і аеродинамічної незрівноваженостей крильчатки осьового вентилятора до початку експлуатації вентилятора корегуванням мас і встановлено, що точність балансування буде змінюватися зі зміною густини повітря.

4. Вперше доведена можливість одночасного безперервного балансування на ходу звичайної і аеродинамічної незрівноваженостей крильчатки пасивними АБ, при цьому, якщо ротор:

- короткий, то можливо тільки статичне балансування одним АБ, розташованим як можна ближче до площини статичної незрівноваженості;
- довгий, то балансування можливе як статичне описаним вище способом, так і динамічне – двома АБ, розташованими в двох різних площинах корекції.

5. Доведена можливість динамічного балансування крильчатки осьового вентилятора у вигляді короткого ротора, двома пасивними АБ за умови розміщення крильчатки в масивному в'язко-пружно закріпленому корпусі з можливістю обертання навколо власної подовжньої осі.

Практичне значення одержаних результатів полягає в тому, що:

- 1) розроблено спосіб динамічного балансування коротких роторів двома пасивними АБ на ходу (патент України на корисну модель №74641);
- 2) розроблена інженерна методика з розрахунку аеродинамічної незрівноваженості крильчатки осьового вентилятора низького тиску;
- 3) результати дисертації увійшли до заключного звіту держбюджетної теми “Зрівноваження і віброзахист обертових тіл” держреєстрація № 0112U001108, та двох проміжних звітів за 2016 і 2017 рр. держбюджетної теми “Динаміка механічних систем, до складу яких входить обертове несуче тіло із приєднаними тілами” держреєстрація № 0116U001486;

4) результати досліджень впроваджені ТОВ «Компанія Арсенал», м. Кропивницький, для виготовлення вентиляторів зерносушарок ADAKURUTMA змішаного типу, та передані ПП «ГРАДВЕНТ» м. Харків де використовуються в конструкторському бюро при розробці осьових вентиляторів.

Особистий внесок здобувача. Дисертація є самостійною науковою працею, в якій викладено авторський підхід до вирішення актуального науково-практичного завдання щодо розробки способу динамічного балансування коротких роторів двома пасивними АБ на ходу та технічних рекомендацій з балансування аеродинамічної і звичайної незрівноваженостей крильчатки вентилятора. Всі наукові результати, викладені в дисертації, одержані автором особисто й опубліковані у наукових працях. Із наукових праць, опублікованих у співавторстві, в дисертації використані лише ті ідеї та положення, що є особистим внеском здобувача.

Апробація результатів дисертації. Основні результати дисертації обговорювалися на: X Міжнародній науково-технічній конференції "Вібрації в техніці та технологіях", 2011 р.; восьмій міжнародній науково-практичній конференції "Математичне та імітаційне моделювання систем МОДС 2013", Чернігів-Жукин, 2013 р.; дев'ятій міжнародній науково-практичній конференції "Математичне та імітаційне моделювання систем МОДС 2014", Київ-Жукин, 2014 р.; 12-ому міжнародному симпозиумі українських інженерів-механіків у Львові МСУІМЛ – 12, 2015 р.; XIV міжнародній науково-технічній конференції "Вібрації у техніці та технологіях" у Дніпропетровську, 2015 р.; XIX Міжнародній науково-технічній конференції "Прогресивна техніка, технологія та інженерна освіта" у Києві, 2018 р.

У повному обсязі дисертаційна робота доповідалася й обговорювалася на розширеному засіданні кафедри деталей машин та прикладної механіки ЦНТУ у листопаді 2015 р. і квітні 2018 р.

Публікації. Основні результати дисертації опубліковані в 14 наукових роботах, серед яких 8 статей у фахових виданнях (4 з них входять до міжнародної науково-метричної бази *SCOPUS*, а 3 – англomовні), 5 робіт в збірниках тез конференцій, 1 патент України на корисну модель.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи, сформульовано наукову задачу, мету, завдання, ідею роботи, об'єкт і предмет досліджень, вказано наукову новизну і практичне значення отриманих результатів, наведено характеристику роботи, відомості про особистий внесок автора і апробацію результатів.

Перший розділ присвячено огляду літератури з зазначеної теми. Оцінений стан питання, розглянуті проблеми у роботі осьових вентиляторів. Проведено огляд літератури з особливостей конструкції і принципу дії осьових

вентиляторів, джерел їх вібрацій, що виникають під час їх виготовлення та експлуатації, з визначення аеродинамічних сил, що діють на повітряні гвинти, обираються методи розрахунку цих сил. Проведено огляд літератури за методами зменшення вібрацій осьових вентиляторів, як до початку експлуатації, так і під час роботи, узагальнено наявні технічні рішення. Обґрунтована актуальність досліджень. Сформульовані та обґрунтовані мета та задачі досліджень. Обрані методи теоретичних, експериментальних і комп'ютерних досліджень процесу автобалансування. Наведено послідовність розв'язання ними поставлених задач досліджень. Докладніше це розкрито у описі результатів, одержаних в розділах. А також зроблений огляд робіт таких відомих вчених, як Александров В.Л., Бабенко А.Є., Белінський С.Ч., Білзор Р.Р., Брусиловський І.В., Бурков А.І., Гадяка В.Г., Горбенко А.Н., Горошко О.О., Гусаров А.А., Драч І.В., Дьяченко А.Ю., Загордан А.М., Зіборов К.А., Іванов А.Г., Ідельсон А.М., Корендій В.М., Кузьо І.В., Корнеєв Н.В., Нестеренко В.П., Павловський М.А., Радченко С.Г., Ройзман В.П., Філімоніхін Г.Б., Черкаський В.М., Чоловський Р.Г., Яценко В.А., Яцун В.В.

Другий розділ містить результати теоретичного дослідження можливості балансування звичайної і аеродинамічної незрівноваженостей крильчатки осьового вентилятора.

Розглянута крильчатка, що насаджена на жорсткий ротор або його вал (рис. 1). Центр крильчатки знаходиться в точці P . Ротор обертається навколо поздовжньої осі z з постійною кутовою швидкістю ω . Динамічна

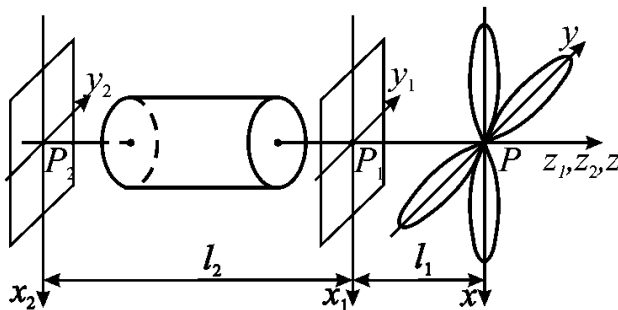


Рис. 1. Схема динамічного балансування складеного ротора

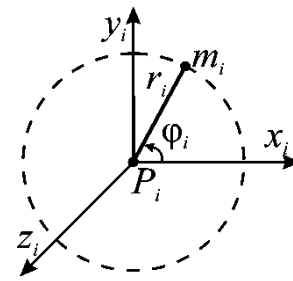


Рис. 2. Моделювання незрівноваженості в i -й площині корекції

незрівноваженість ротора змодельована двома точковими масами m_1, m_2 , на відстані r_i від поздовжньої осі ротора, що розташовані, відповідно, в двох площинах корекції – P_1, P_2 . Відстань між площинами – l_2 , відстань між першою площиною корекції і крильчаткою – l_1 . Радіус, проведений від осі обертання до точкової маси, утворює кут φ_i з віссю y_i (рис. 2).

Аеродинамічні сили і сили від незрівноважених мас приведені до двох площин корекції. Сили інерції від незрівноважених мас:

$$I_i = m_i r_i \omega^2, \quad I_{ix} = m_i r_i \omega^2 \cos \varphi_i, \quad I_{iy} = m_i r_i \omega^2 \sin \varphi_i. \quad (1)$$

Крильчатка має не менше 3 лопатей, розташованих з рівним кроком, вона виконана з дефектом, чи насаджена на вал з ексцентриситетом або перекосом. Тому головний вектор і головний момент аеродинамічних сил, приведених до точки P , мають поперечні відносно поздовжньої осі ротора складові R_x ,

R_y (рис. 3, а) і M_x, M_y (рис. 3, б). Ці складові утворюють аеродинамічну незрівноваженість. Проекції головного вектора і головного моменту на осі $Pxyz$ відповідно рівні R_x, R_y, R_z і M_x, M_y, M_z .

На рис. 4, а, б наведені сили $A_{1x}, A_{1y}, A_{2x}, A_{2y}$, що знаходяться в площинах корекції і статично еквівалентні аеродинамічним силам. З умов статичної еквівалентності знайдено:

$$\begin{aligned} A_{1x} &= [M_y + (l_1 + l_2)R_x] / l_2, & A_{1y} &= [-M_x + (l_1 + l_2)R_y] / l_2, \\ A_{2x} &= -(M_y + l_1 R_x) / l_2, & A_{2y} &= (M_x - l_1 R_y) / l_2. \end{aligned} \quad (2)$$

Поперечні аеродинамічні сили і моменти у випадку насадження

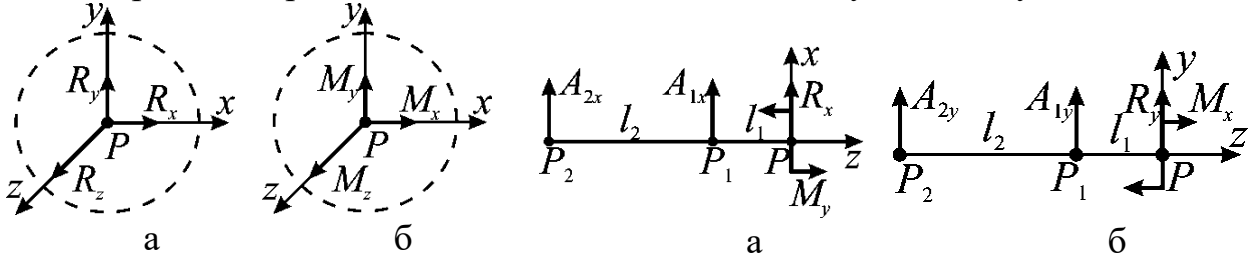


Рис. 3. Зведення аеродинамічних сил до:

- а – головного вектора;
- б – головного моменту

Рис. 4. Схема приведення аеродинамічних сил до двох площин корекції:

- а – площина xPz ; б – площина yPz

крильчатки на вал з ексцентриситетом і перекосом визначені за дисковою теорією повітряного гвинта. Відповідно до цієї теорії аеродинамічні сили, що діють на повітряний гвинт:

$$\begin{aligned} R_x &= c'_x B' \omega^2, & R_y &= c'_y B' \omega^2, & M_x &= m'_x B' R \omega^2, & M_y &= m'_y B' R \omega^2, \\ T = R_z &= c_T B' \omega^2, & M_{кр} = M_z &= m_{кр} B' R \omega^2, \end{aligned} \quad (3)$$

де: $B' = 0,5\rho(\pi R^2)R^2$; R – радіус диска повітряного гвинта; c'_x, c'_y, m'_x, m'_y – безрозмірні коефіцієнти, що залежать від неточності виготовлення крильчатки, чи від неточності її насадження на вал.

Припускається, що:

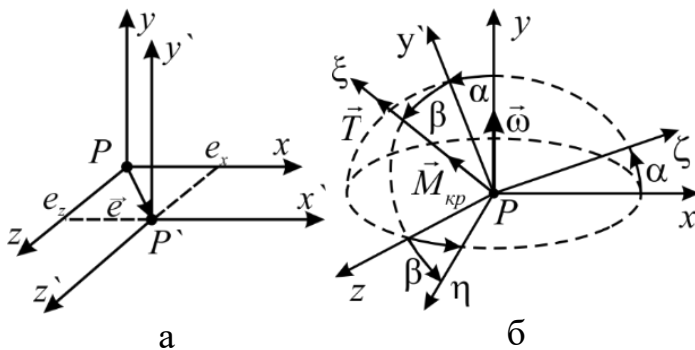


Рис. 5 – Насадження крильчатки з:
а – ексцентриситетом; б – перекосом

крутильного моменту $M_{кр}$;

- поступальні і обертальні відхилення подовжньої осі ротора від осі обертання малі і не впливають на аеродинамічні сили;
- ідеально виготовлена крильчатка насаджена на вал з ексцентриситетом і перекосом (рис. 5);
- ексцентриситет і перекіс незначні і тому не впливають на величини подовжньої сили T і

- ексцентриситет і перекиє більші за поступальні і обертальні відхилення повздовжньої осі ротора від осі обертання і тому останні не впливають на поперечні складові аеродинамічних сил і моментів.

За таких припущень аеродинамічні сили, що діють на крильчатку, зведуться до головних вектору T і моменту $M_{кр}$, які прикладені до центра крильчатки і направлені по повздовжній осі крильчатки. Тому (рис. 5) поперечні аеродинамічні сили створюються поперечними складовими сили \vec{T} , а поперечні моменти – як поперечними складовими вектор-моменту $\vec{M}_{кр}$, так і прикладеною з ексцентриситетом \vec{e} силою \vec{T} . З точністю до величин першого порядку малості включно, було знайдено, що:

$$R_x = (-c_T \alpha) B' \omega^2, \quad R_y = (c_T \beta) B' \omega^2,$$

$$M_x = (-c_T e_z - m_{кр} R \alpha) B' \omega^2, \quad M_y = (c_T e_x + m_{кр} R \beta) B' \omega^2, \quad (4)$$

$$\text{і } c'_x = -c_T \alpha, \quad c'_y = c_T \beta, \quad m'_x = -(c_T e_y + m_{кр} R \alpha), \quad m'_y = c_T e_x + m_{кр} R \beta. \quad (5)$$



Рис. 6 – Рівнодійна R_i аеродинамічних сил, діючих на i -лопать: а – дія на лопать; б – розташування в характерному перерізі лопаті

дорівнює 70% радіуса гвинта R (рис.6);

3) коефіцієнти аеродинамічних сил відповідають цьому перерізу лопаті.

Вважається, що повітря початково нерухоме і в ньому крильчатка обертається навколо нерухомої осі обертання. Підйомна сила і сила лобового опору, що діють на i -лопать:

$$L_i = 0,5\rho C_{zi} A_i r_i^2 \omega^2, \quad D_i = 0,5\rho C_{\eta i} A_i r_i^2 \omega^2, \quad (6)$$

де C_{zi} – коефіцієнт підйомної сили; $C_{\eta i}$ – коефіцієнт сили лобового опору; ρ – густина повітря; A_i – площа характерного поперечного перерізу лопаті; r_i – відстань від поздовжньої осі вентилятора до характерного поперечного перерізу лопаті.

Проекції головних вектора і моменту аеродинамічних сил на осі $Pxyz$:

$$R_x = \sum_{i=1}^n D_i \cdot \sin \theta_i, \quad R_y = \sum_{i=1}^n D_i \cdot \cos \theta_i, \quad R_z = \sum_{i=1}^n L_i,$$

$$M_x = \sum_{i=1}^n D_i \cdot r_i \cdot \sin \theta_i, \quad M_y = -\sum_{i=1}^n D_i \cdot r_i \cdot \cos \theta_i, \quad M_z = -\sum_{i=1}^n L_i \cdot r_i. \quad (7)$$

1) Якщо всі лопаті однакові, то аеродинамічна незрівноваженість відсутня і $R_z = nL = 0,5n\rho C_z Ar^2 \omega^2$, $M_z = -nDr = -0,5n\rho C_\eta Ar^3 \omega^2$.

2) Якщо тільки одна лопать j із всіх неточно виготовлена, то для неї

$$D_j = D + \Delta D, L_j = L + \Delta L,$$

де: ΔD – зміна підйомної сили, ΔL – зміна сили лобового опору, діючої на дефектну лопать, викликані зміною у цієї лопаті параметрів C_z , A , r . Тоді

$$\Delta L = 0,5\rho\Delta(C_z Ar^2)\omega^2, \Delta D = 0,5\rho\Delta(C_\eta Ar^2)\omega^2.$$

Проекції головного вектора і головного моменту аеродинамічних сил:

$$\begin{aligned} R_x &= c_x B \omega^2, R_y = c_y B \omega^2, R_z = c_z B \omega^2, \\ M_x &= m_x B r \omega^2, M_y = m_y B r \omega^2, M_z = m_z B r \omega^2, \end{aligned} \quad (8)$$

де коефіцієнти:

$$B = 0,5\rho Ar^2, c_x = [\Delta(C_\eta Ar^2) \sin \theta_j] / (Ar^2), c_y = -[\Delta(C_\eta Ar^2) \cos \theta_j] / (Ar^2),$$

$$m_x = [\Delta(C_y Ar^2) r \sin \theta_j] / (Ar^2), m_y = -[\Delta(C_y Ar^2) r \cos \theta_j] / (Ar^2),$$

$$c_z = nC_z + \sqrt{m_x^2 + m_y^2} / r, m_z = -(nC_\eta + \sqrt{c_x^2 + c_y^2}).$$

Порівняні звичайна і аеродинамічна незрівноваженості (табл. 1).

Таблиця 1 – Незрівноваженості ротора з крильчаткою

Незрівноваженість від		
сил інерції	аеродинамічних сил за теорією повітряного гвинта	
	дисковою	Загордана
$S_{1x}^{(3)} = m_1 r \cos \zeta_1$	$S_{1x}^{(a)} = -B'[m'_y R + c'_x(l_1 + l_2)] / l_2$	$S_{1x}^{(a)} = B[m_y r + c_x(l_1 + l_2)] / l_2$
$S_{1y}^{(3)} = m_1 r \sin \zeta_1$	$S_{1y}^{(a)} = B'[m'_x R - c'_y(l_1 + l_2)] / l_2$	$S_{1y}^{(a)} = -B[m_x r - c_y(l_1 + l_2)] / l_2$
$S_{2x}^{(3)} = m_2 r \cos \zeta_2$	$S_{2x}^{(a)} = -B'(m'_y R + c'_x l_1) / l_2$	$S_{2x}^{(a)} = -B(m_y r + c_x l_2) / l_2$
$S_{2y}^{(3)} = m_2 r \sin \zeta_2$	$S_{2y}^{(a)} = B'(m'_x R - c'_y l_1) / l_2$	$S_{2y}^{(a)} = B(m_x r - c_y l_2) / l_2$

Встановлено такі аналогії між ними:

- обидві незрівноваженості приводяться до двох площин корекції;
- сили від них пропорційні квадрату кутової швидкості обертання ротора.

Відмінність полягає в прямопропорційній залежності аеродинамічної незрівноваженості від густини повітря.

Сумарна незрівноваженість вентилятора визначається за формулами:

$$S_{1x} = S_{1x}^{(3)} + S_{1x}^{(a)}, S_{1y} = S_{1y}^{(3)} + S_{1y}^{(a)}, S_{2x} = S_{2x}^{(3)} + S_{2x}^{(a)}, S_{2y} = S_{2y}^{(3)} + S_{2y}^{(a)}. \quad (9)$$

Знайдені проекції приведених аеродинамічних сил на осі x , y коли кут атаки лопаті номер j відрізняється на кут χ від кутів атаки інших лопатей:

$$\begin{aligned} A_{1x}(\chi) &= (l_1 + l_2) \Delta D_j(\chi) / l_2, A_{1y}(\chi) = -r \Delta L_j(\chi) / l_2, \\ A_{2x}(\chi) &= -l_1 \Delta D_j(\chi) / l_2, A_{2y}(\chi) = r \Delta L_j(\chi) / l_2. \end{aligned} \quad (10)$$

Визначено, що аеродинамічні сили створюють динамічну незрівноваженість. Тому її можна збалансувати тільки динамічно – в двох

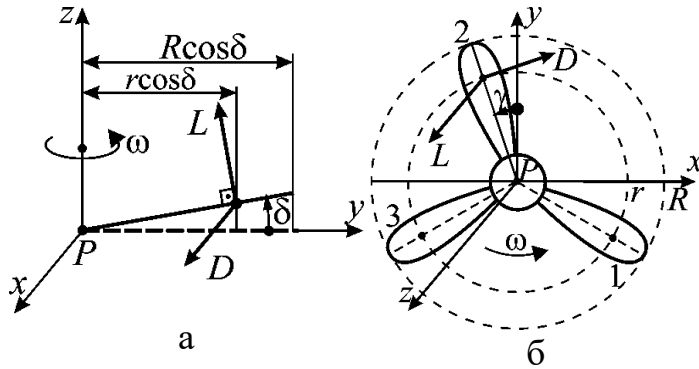
площинах корекції.

Знайдені проекції приведених аеродинамічних сил на осі x , y при порушенні перпендикулярності лопаті j до осі обертання (рис. 7, а):

$$A_{1x} = 0, A_{1y} = -(l_1 + l_2)L\delta / l_2, A_{2x} = 0, A_{2y} = l_1L\delta / l_2. \quad (11)$$

Встановлено, що виникає чисто статична незрівноваженість в площині крильчатки. Тому її треба балансувати статично у площині крильчатки.

Знайдені проекції приведених аеродинамічних сил на осі x , y коли лопать j



відхиляється на кут γ від свого кутового положення в крильчатці (рис. 7, б):

$$A_{1x} = Lr\gamma / l_2, A_{1y} = (l_1 + l_2)D\gamma / l_2, \\ A_{2x} = -Lr\gamma / l_2, A_{2y} = -l_1D\gamma / l_2. \quad (12)$$

Встановлено, що в даному випадку виникає динамічна незрівноваженість. Її моментна складова на порядок більша за статичну ($D \ll L$).

В загальному випадку, коли лопать виготовлена з усіма похибками, встановлено, що сумарна

аеродинамічна незрівноваженість є динамічною. Тому таку незрівноваженість доцільно балансувати динамічно – у двох площинах корекції.

Сформульовано правило врахування в диференціальних рівняннях руху вентилятора аеродинамічної незрівноваженості: складові аеродинамічної незрівноваженості додаються до відповідних складових звичайної незрівноваженості.

Оскільки крильчатка є коротким ротором, запропонований спосіб динамічного балансування коротких роторів. Він полягає в тому, щоб короткий ротор встановити в масивний корпус з можливістю обертання відносно корпусу навколо власної подовжньої осі ротора, а корпус – в'язко-пружно закріпити. Тоді утворюється умовний складений ротор і на процес автобалансування вже впливають його характеристики. Збільшуючи масу корпусу, завжди можна з короткого ротора створити довгий умовний складений ротор.

Зроблено наступні висновки про можливість балансування звичайної і аеродинамічної незрівноваженостей крильчатки осьового вентилятора:

1) обидві незрівноваженості можна балансувати до початку експлуатації ротора коригуванням мас, однак аеродинамічна незрівноваженість буде змінюватися в залежності від густини повітря (газу);

2) обидві незрівноваженості можна безперервно балансувати на ходу ротора пасивними АБ, при цьому якщо ротор:

- короткий, то можливе тільки статичне балансування одним АБ,

розташованим як можна ближче до площини статичної незрівноваженості;

- довгий, то можливе балансування як статичне описаним вище способом, так і динамічне - двома АБ, розташованими в двох різних площинах корекції.

Третій розділ містить результати експериментального дослідження процесу балансування пасивними АБ крильчаток осьових вентиляторів.

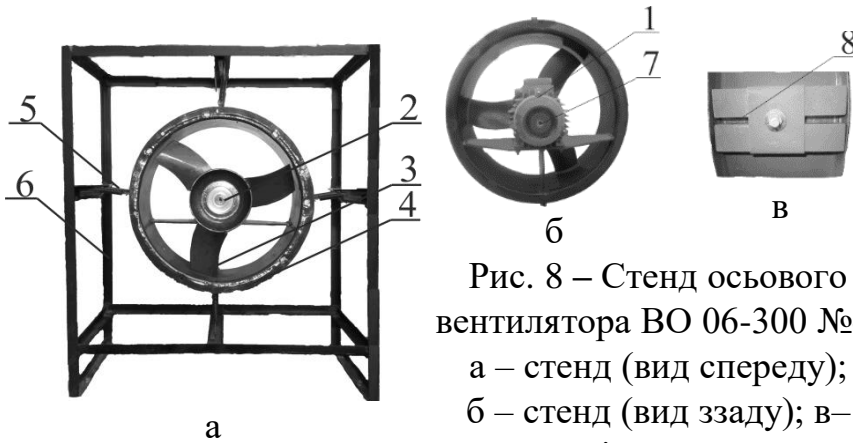


Рис. 8 – Стенд осьового вентилятора ВО 06-300 №4:

а – стенд (вид спереду);
б – стенд (вид ззаду); в – додаткові маси на кожусі

Для проведення експериментів був модернізований стенд, розроблений Яцуном В.В. (рис. 8). Для цього на хвостовик вала електродвигуна був насаджений другий АБ і була забезпечена можливість приєднання до

захисного кожуха вентилятора ВО 06-300 №4 додаткових мас для зміни масо-інерційних характеристик умовного складеного ротора. Стенд складається з асинхронного електродвигуна 1, на вал якого насаджений АБ 2 зі сторони крильчатки 3 і АБ 7 – зі сторони хвостовика вала, захисного кожуха крильчатки 4, пружинних податливих опор 5, рами 6 та додаткових мас 8, що кріпляться на кожусі з кроком в 90°.

Стенд має чотири конфігурації: 1 - без АБ; 2 - АБ у площині крильчатки; 3 - АБ у площині хвостовика; 4 – АБ у площинах крильчатки і хвостовика. Відсутність АБ забезпечується тим, що у відповідному АБ відсутні кулі. Експерименти за конфігураціями 1-4 проведені за відсутністю і наявністю додаткових мас, приєднаних до захисного кожуха, всього 8 експериментів. Усі експерименти проведені зі сталими незрівноваженостями, створеними у площинах крильчатки і хвостовика. Незрівноваженості були підібрані так, щоб збільшувати гранично допустимий рівень вібрацій на кожусі вентилятора не менше ніж у 2,5 рази за умови, що АБ не працюють і до кожуха не прикріплені додаткові маси. Крильчатка незрівноважена динамічно. Балансувальні ємності АБ із запасом 5% більші за відповідні незрівноваженості, створені у площинах крильчатки і хвостовика.

Вібраційний стан оцінено за віброшвидкостями, заміряними в 3-х контрольних точках (рис. 9). У точці 1 оцінена якість балансування складеного ротора першим АБ, в точці 2 – другим, у точці 3 оцінена якість динамічного балансування складеного ротора двома АБ. Вібрації оцінені відповідно до рекомендацій міжнародного стандарту ISO 21940-11.

Визначено, що єдиним джерелом вібрацій є обертання незрівноваженостей з частотою обертання вентилятора. Спектральний аналіз віброшвидкостей на номінальній частоті обертання ротора показав, що вібрації відбуваються з

однією частотою – 25 Гц (частотою обертання крильчатки). Це пояснюється тим, що основними джерелами вібрацій є звичайна і аеродинамічна незрівноваженості і вони подібні між собою. Тому обидві незрівноваженості породжують вібрації з частотою обертання ротора.

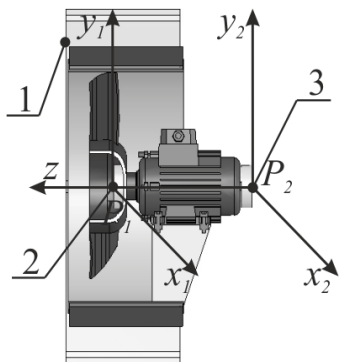


Рис. 9. Розташування контрольних точок вимірювання віброшвидкостей чи віброприскорень

1 – зі сторони крильчатки;
2 – зі сторони хвостовика;
3 – на захисному кожуху

Вивчення віброприскорень на вибігу ротора показало, що у крильчатки дві резонансні частоти. Це пояснюється тим, що крильчатка встановлена в масивний корпус і динамічно поводить як довгий ротор. Більша резонансна частота дорівнює $12,7 \text{ Гц}$. Тому робоча частота обертання крильчатки з запасом потрапляє в область настання балансування.

Оцінені перехідні процеси в різних конфігураціях стенду. При цьому вібродіаграми швидкостей (прискорень) діляться на наступні ділянки (рис. 10): спокою (ділянка 0, 0-3 с);

розгону (ділянка Ia, 3-4 с); крейсерського неусталеного руху (ділянка Ib, 4-8 с); крейсерського усталеного руху (ділянка II, 8-20 с); вибігу (ділянка III, 20-45 с).

Встановлено, що на вибігу АБ зменшують величини віброприскорень на двох піках, причому:

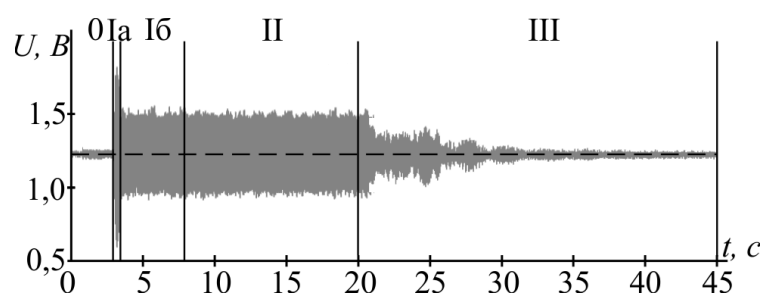


Рис. 10. Ділення вібродіаграми швидкостей (прискорень) на ділянки

а) один АБ з боку крильчатки зменшує величини віброприскорень, відповідно, на 20% і 73%, з боку хвостовика – на 20% і 43%;

б) два АБ зменшують величини віброприскорень – на 80% і 60%.

Останнє пояснюється тим, що в АБ на вибігу виникає застій куль, в результаті чого кулі затримуються в балансувальних положеннях майже до зупинки ротора.

Оцінена точність динамічного балансування в різних конфігураціях стенду. Встановлено, що як за відсутністю, так і за наявністю додаткових мас, прикріплених до захисного кожуха вентилятора:

- один АБ, встановлений у площині крильчатки, зменшує віброшвидкості у площині крильчатки на $54 \div 71\%$ і збільшує віброшвидкості у площині хвостовика валу електродвигуна на $18 \div 45\%$;

- один АБ, встановлений на хвостовику, майже не змінює віброшвидкості у площині крильчатки і зменшує віброшвидкості у власній площині на $30 \div 34\%$;

- два АБ, встановлені у площинах крильчатки і хвостовика, зменшують віброшвидкості як у площині крильчатки (на $46 \div 70\%$), так і у площині хвостовика (на $39 \div 42\%$).

Приєднання додаткових мас до захисного кожуха вентилятора при непрацюючих АБ знижує величини віброшвидкості. Але це не зменшує незрівноваженість крильчатки.

В цілому при статичному балансуванні віброшвидкості крильчатки зменшуються на 42% від максимально допустимої величини вібрацій (6,3 мм/с), а при динамічному – не менше, ніж на 54%.

Четвертий розділ містить результати комп'ютерного моделювання процесу балансування пасивними АБ крильчатки осьового вентилятора.

Для проведення обчислювальних експериментів була модернізована 3D модель осьового вентилятора ВО 06-300 №4 (розроблена В.В. Яцуном). До неї був доданий кульовий АБ, насаджений на хвостовик вала електродвигуна. Геометричні і масо-інерційні характеристики 3D моделі такі ж, як і у реального стенду. Це ж стосується конфігурацій стенду і поділу отриманих діаграм віброшвидкостей на характерні ділянки (рис. 10).

Встановлено, що загалом на всій ділянці I АБ зменшують величину середнього квадратичного значення віброшвидкості на 19%. При цьому в «ідеальних умовах» АБ покращують вібраційний стан вентилятора на ділянці I в 2,7 рази краще, ніж в умовах натурального експерименту.

Встановлено, що під час вибігу АБ зменшують величини віброшвидкостей на двох піках діаграми віброшвидкості, відповідно на 61% і 46%. При цьому в «ідеальних умовах» поліпшення в 1,5 рази краще, ніж в умовах натурального експерименту.

Оцінена точність балансування ротору на ділянці крейсерського руху. У цій частині 3D моделювання підтверджує результати натурального експерименту. При відсутності АБ віброшвидкості перевищують гранично допустимі значення 6,3 мм/с (ISO 21940-11) в 2,7 рази. При наявності АБ віброшвидкості знижуються по відношенню до випадку відсутності АБ не менше, ніж в 74 рази, а по відношенню до гранично допустимих значень - в 27 разів. При 3D моделюванні точність балансування ротора вище в 16 разів, ніж на натурному стенді.

Встановлено, що вплив сили тяжіння на точність балансування ротора швидко зменшується з ростом крейсерської швидкості обертання крильчатки. Сили тяжіння найбільш погіршують точність балансування ротора при відсутності або малій незрівноваженості ротора, при обертанні ротора в діапазоні швидкостей $15 \div 25$ об/с сили тяжіння обмежують точність балансування ротора класом точності G 1.

Встановлено, що збільшення сил в'язкого опору руху куль погіршує точність балансування, при обертанні ротора зі швидкістю 20 об/с сили тяжіння обмежують точність балансування ротора класом точності G 2,5. Погіршення

точності балансування пов'язано із застоєм куль, при великих силах в'язкого опору куль повільно дрейфують до автобалансувального положення.

Встановлено що, ексцентриситет бігової доріжки АБ погіршує точність балансування обертових частин із зростанням швидкості обертання ротора. Рекомендовано, щоб ексцентриситети бігових доріжок були меншими в 2,5 рази і більше за ексцентриситет, що відповідає гранично допустимим залишковим вібраціям ротора.

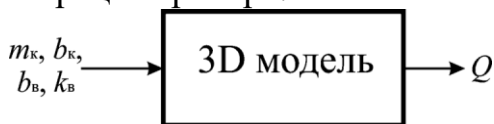


Рис. 11. Спрощена схема "чорної скрині"

Проведений багатofакторний експеримент. Виділені параметри вентилятора (рис. 11) і АБ, що можна змінювати без зміни конструкції вентилятора і АБ. Методом спроб встановлено такі межі змін цих параметрів, при

яких гарантовано настає автобалансування:

- маса однієї куль, $m_k=5...11$ г;
- коефіцієнт в'язкого опору руху куль, $b_k=0,4 \cdot 10^{-4}...1 \cdot 10^{-4}$ Н·с/мм;
- коефіцієнт жорсткості опор осевого вентилятора, $k_b=29...34$ Н/мм;
- коефіцієнт сили в'язкості опор осевого вентилятора, $b_b=5 \cdot 10^{-3}...25 \cdot 10^{-3}$ Н·с/мм.

За функціонал якості Q обраний час приходу куль в автобалансувальне положення в двох площинах корекції. Встановлений час симуляції 90 с, за який при будь-яких значеннях факторів куль встигають приходити в автобалансувальне положення.

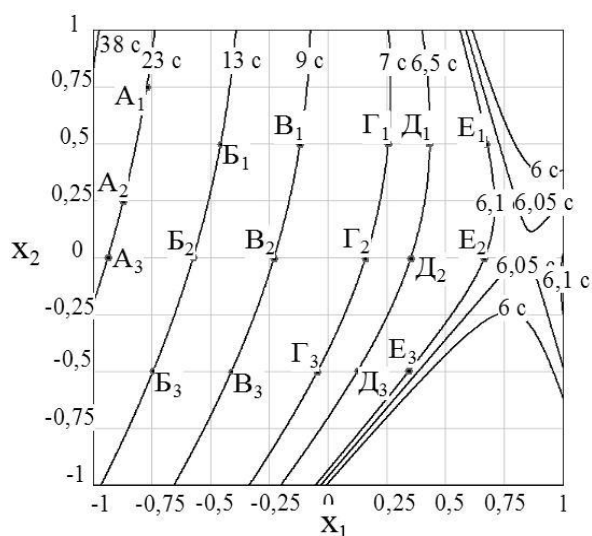


Рис. 12. Поділ площини параметрів $x_1 \times x_2$ на області, усередині яких час настання автобалансування не перевищує заданого значення (6 с, 6,05 с, 6,1 с, 6,5 с, 7 с тощо)

Час розгону (t_p) вентилятора дорівнює 3 с і завжди $Q > 3$ с. Функція відгуку знаходиться у неявному вигляді:

$$\phi(Q) = f(x_1, x_2, x_3, x_4), \quad (13)$$

де: $\phi(Q)$ – певна функція від Q ; x_1, x_2, x_3, x_4 – безрозмірні фактори, що відповідають розмірним факторам m_k, b_k, b_b, k_b , і змінюються в межах ± 1 ; $f(x_1, x_2, x_3, x_4)$ – певна функція від безрозмірних факторів.

Проведений трьохрівневий експеримент. Застосована спрощена схема планування Бокса – Бенкена. Використаний пакет програм для статистичного аналізу STATISTICA_6. Визначена найкраща функція регресії за допомогою критерію Стюдента (t -критерій) і критерію Фішера (F -критерій). Встановлено, що найбільший F -критерій у такій моделі регресії:

$$\ln(Q - t_p) = 1,895 - 0,633 \cdot x_1 + 0,238 \cdot x_2 + 0,038 \cdot x_3 - 0,583 \cdot x_4 + 0,601 \cdot x_1^2 - 0,140 \cdot x_2^2 - 0,089 \cdot x_3^2 + 0,309 \cdot x_4^2 - 2 \cdot 0,165 \cdot x_1 \cdot x_2 + 2 \cdot 0,060 \cdot x_1 \cdot x_3 -$$

$$-2 \cdot 0,123 \cdot x_1 \cdot x_4 - 2 \cdot 0,019 \cdot x_2 \cdot x_3 + 2 \cdot 0,011 \cdot x_2 \cdot x_4 - 2 \cdot 0,018 \cdot x_3 \cdot x_4. \quad (14)$$

Встановлено, що функція $\ln(Q - t_p)$ змінюється монотонно за параметрами x_3 , x_4 в області зміни факторів і приймає мінімальне значення при $x_3 = -1$, $x_4 = 1$. У площині факторів $x_1 \times x_2$ побудовано області (рис. 12), усередині яких час настання автобалансування не перевищує: 6; 6,05; 6,1; 6,5; 7 тощо секунд.

Зроблені наступні висновки:

- 1) при динамічному балансуванні крильчатки осьового вентилятора двома пасивними АБ доцільно оптимізувати масу кулі, коефіцієнт сили в'язкого опору, що на неї діють при русі відносно корпусу АБ, коефіцієнти жорсткості і в'язкості опор вентилятора
- 2) у обраному діапазоні зміни параметрів, що оптимізуються, автобалансування найшвидше настає при найменшій жорсткості і найбільшій в'язкості опор осьового вентилятора, а зменшення маси кулі в цілому збільшує час настання автобалансування;
- 3) належним вибором параметрів АБ і опор вентилятора можна забезпечити настання автобалансування за $6 \div 7$ с, а без оптимізації параметрів цей час може перевищувати 75 с.

ВИСНОВКИ

Дисертація є завершеною науково-дослідною роботою, в якій на основі результатів теоретичних та експериментальних досліджень **вирішена актуальна наукова задача**, що полягає у визначенні впливу аеродинамічної незрівноваженості на динаміку вентилятора у порівнянні зі звичайною й встановлення залежностей сил незрівноваженості від кутової швидкості обертання ротора і густини повітря (газу), а також можливості балансування ротора коригуванням мас до початку й під час експлуатації пасивними АБ.

1. Вперше встановлено, що аеродинамічна незрівноваженість, яка породжена неточним насадженням крильчатки на вал ротора чи неточним виготовленням крильчатки, подібна до звичайної незрівноваженості: обидві незрівноваженості приводяться до двох площин корекції і сили він них пропорційні квадрату кутової швидкості обертання ротора. Знайдена відмінність, що полягає у (прямопропорційній) залежності аеродинамічної незрівноваженості від густини повітря (газу).

2. Встановлено, що аеродинамічну і звичайну незрівноваженості можна балансувати до початку експлуатації ротора корегуванням мас, але через залежність аеродинамічної незрівноваженості від густини повітря, точність балансування буде змінюватись.

3. Доведена можливість безперервного балансування в процесі роботи ротора звичайної і аеродинамічної незрівноваженостей пасивними АБ, як статично у випадку короткого і довгого ротора, одним АБ (в площині крильчатки), так і динамічно у випадку довгого ротора – двома АБ (в площині крильчатки і в площині хвостовика валу).

4. Запропоновано спосіб динамічного балансування двома АБ короткого

ротора, яким є крильчатка осьового вентилятора, що полягає в тому, щоб помістити крильчатку в масивний корпус, а корпус в'язко-пружно закріпити.

5. Натурним експериментом, проведеним для промислового вентилятора ВО 06-300 №4 встановлено, що використання двох АБ зменшує вібрації в 1,6 раз по відношенню до гранично допустимих значень (6,3 мм/с) і в 5,5 раз по відношенню до випадку відсутності АБ. Також встановлено що при статичному балансуванні віброшвидкості крильчатки зменшуються на 42% від максимально допустимої величини вібрацій, а при динамічному – не менше, ніж на 54%.

6. Комп'ютерне моделювання динаміки вентилятора при відсутності і наявності АБ підтвердило якісні результати раніше проведеного натурального експерименту. Так, наявність АБ:

- зменшує середньоквадратичне значення віброшвидкості на ділянці від пуску ротора до настання автобалансування (на 19% при 3D моделюванні, на 7% в натурному експерименті);
- зменшує значення віброшвидкостей на двох піках при вибігу ротора (на 61% і 46% при 3D моделюванні, на 39% і 30% в натурному експерименті);
- зменшує піки віброшвидкостей на ділянці настання автобалансування (в 74 рази при 3D моделюванні, в 5,4 рази на натурному експерименті).

7. Багатофакторним віртуальним експериментом, проведеним у комп'ютерній САПР SolidWorks визначено оптимальні параметри АБ і опор вентилятора ВО 06-300 №4, при яких можна забезпечити настання автобалансування за 6 – 7 с (при найменшій жорсткості і найбільшій в'язкості опор, та найбільшій масі кулі), а без оптимізації параметрів цей час може перевищувати 75 с.

8. За результатами досліджень рекомендується спочатку крильчатку балансувати аеродинамічно – усунути похибки встановлення лопатей. Потім балансувати коригуванням мас з метою одночасного зменшення звичайної і залишкової аеродинамічної незрівноваженостей. Балансування треба проводити при такій густині повітря (газу), при якому вентилятор планується експлуатувати. З метою подальшого зменшення вібрацій, рекомендується неперервно добалансовувати звичайну і аеродинамічну незрівноваженості статично одним АБ, чи динамічно двома АБ.

9. Розроблені при виконанні дисертації інженерна методика і технічні рекомендації зі зменшення вібрацій осьових вентиляторів низького тиску балансуванням звичайної і аеродинамічної незрівноваженостей пасивними АБ, були передані ПП «ГРАДВЕНТ» м. Харків і ТОВ "Компанія Арсенал" м. Кропивницький для використання в конструкторському бюро при розробці осьових вентиляторів.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Філімоніхін Г.Б. Експериментальне визначення ефективності динамічного зрівноваження кульовими автобалансирами крильчатки осьового вентилятора / Г.Б. Філімоніхін, Л.С. Олійніченко // Український міжвідомчий н.-т. Збірник "Автоматизація виробничих процесів у машинобудуванні та приладобудуванні", Львів: НУ "Львівська політехніка", 2011. Вип. №45, С. 496-503.
2. Філімоніхін Г.Б. Комп'ютерна модель процесу автоматичного динамічного зрівноваження двома автобалансирами крильчатки осьового вентилятора / Г.Б. Філімоніхін, Л.С. Олійніченко // Загальнодержавний міжвідомчий н.-т. збірник "Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин", 2013. Вип. 43, частина I. – С. 103-108.
3. Філімоніхін Г.Б. Оптимізація параметрів автобалансирів для динамічного зрівноваження крильчатки осьового вентилятора 3D-моделюванням / Г.Б. Філімоніхін, Л.С. Олійніченко // Східно-Європейський журнал передових технологій. – 2014. – Т. 6, №7(72). – С. 12-17.
4. Філімоніхін Г.Б. Зрівноваження пасивними автобалансирами звичайного і аеродинамічного дисбалансів крильчатки осьового вентилятора / Г.Б. Філімоніхін, Л.С. Олійніченко // Всеукраїнський науково-технічний журнал "Вібрації у техніці та технологіях". Випуск 4. м. Вінниця. 2015. С. 184-190.
5. Филимоныхин Г.Б. Исследование возможности уравнивания аэродинамического дисбаланса крыльчатки осевого вентилятора корректировкой масс / Г.Б. Филимоныхин, Л.С. Олійніченко // Восточно-Европейский журнал передовых технологий, г. Харьков. 2015. Выпуск 5/7 (77). С. 30-35. *(Внесено до міжнародної наукометричної бази Scopus)*.
6. Olijnichenko, L. Experimental study of the process of the static and dynamic balancing of the axial fan impeller by ball auto-balancers / L. Olijnichenko, V. Goncharov, V. Sidei, O. Horpynchenko // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2017. – Vol. 2, N 1 (86). - P. 42-50. *(Внесено до міжнародної наукометричної бази Scopus)*.
7. Olijnichenko, L. On the limited accuracy of balancing the axial fan impeller by automatic ball balancers / L. Olijnichenko, V. Hruban, M. Lichuk, V. Pirogov // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2018. – Vol. 1, – N 1 (91). – P. 27–35. *(Внесено до міжнародної наукометричної бази Scopus)*.
8. Olijnichenko, L. Patterns in change and balancing of aerodynamic imbalance of the low-pressure axial fan impeller / L. Olijnichenko, G. Filimonikhin, A. Nevdakha, V. Pirogov // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2018. – Vol. 3, – N 7 (93). – P. 71–81. *(Внесено до міжнародної наукометричної бази Scopus)*.
9. Пат. 74641 України на корисну модель, МПК G01M 1/32 (2006.01), F04D 29/66 (2006.01), Спосіб динамічного балансування жорсткого ротора пасивними

автобалансирами / Філімоніхін Г.Б., Гончаров В.В., Олійніченко Л.С.; заявник та патентовласник Кіровоградський нац. техн. університет. – № u201203307; заявл. 20.03.2012; опубл. 12.11.2012, Бюл. №21.

10. Філімоніхін Г.Б. Комп'ютерне моделювання процесу динамічного зрівноваження автобалансирами крильчаток осьових вентиляторів / Г.Б. Філімоніхін, Л.С. Олійніченко // Восьма міжнародна науково-практична конференція "Математичне та імітаційне моделювання систем МОДС 2013". Тези доповідей. Чернігів-Жукин. 24-28 червня 2013, С.133 – 137.

11. Олійніченко Л.С. Оптимізація параметрів автобалансирів для динамічного зрівноваження крильчатки осьового вентилятора 3D моделюванням / Л.С. Олійніченко, Г.Б. Філімоніхін // Дев'ята міжнародна науково-практична конференція "Математичне та імітаційне моделювання систем МОДС 2014". Тези доповідей. Чернігів-Жукин. 23-27 червня 2014, С.214 – 217.

12. Філімоніхін Г.Б. Про зрівноваження пасивними автобалансирами аеродинамічного дисбалансу крильчатки осьового вентилятора / Г.Б.Філімоніхін, Л.С. Олійніченко // 12-й міжнародний симпозиум українських інженерів-механіків у Львові". Тези доповідей. Львів. 28-29 травня 2015.

13. Філімоніхін Г.Б. Зрівноваження пасивними автобалансирами звичайного і аеродинамічного дисбалансів крильчатки осьового вентилятора / Г.Б. Філімоніхін, Л.С. Олійніченко // XIV Міжнародна науково-технічна конференція "Вібрації в техніці та технологіях". Тези доповідей. Дніпропетровськ. 21-25 вересня 2015., С. 19-20.

14. Олійніченко Л.С. Дослідження процесу динамічного балансування кульовими автобалансирами крильчатки осьового вентилятора / Л.С. Олійніченко, Г.Б. Філімоніхін // XIX Міжнародна науково-технічна конференція "Прогресивна техніка, технологія та інженерна освіта". Тези доповідей. Київ. 19-22 червня 2018, С. 57-59.

Особистий внесок здобувача в роботи, опубліковані в співавторстві:

[1] – експериментально визначена ефективність динамічного балансування крильчатки осьового вентилятора; [2, 10] – в САПР SolidWorks модернізована комп'ютерна модель осьового вентилятора, та проведено її тестування; [3, 11] – проведено багатофакторний експеримент, визначені оптимальні параметри АБ для динамічного балансування; [4, 12] – встановлена можливість балансування крильчатки у випадку, коли вона насаджена на вал з перекосом і ексцентриситетом; [5, 13] – встановлена можливість балансування крильчатки у випадку, коли лопаті крильчатки осьового вентилятора неточно виготовлені; [6] – експериментально досліджено процес статичного і динамічного балансування кульовими АБ крильчатки осьового вентилятора; [7, 14] – в САПР SolidWorks досліджений процес динамічного балансування кульовими АБ крильчатки осьового вентилятора; [8] – оцінена величина аеродинамічної незрівноваженості у випадках, коли лопаті крильчатки осьового вентилятора неточно виготовлені.

АНОТАЦІЯ

Олійніченко Л.С. Зменшення вібрацій осьових вентиляторів балансуванням звичайної і аеродинамічної незрівноваженостей. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.02.09 – Динаміка і міцність машин. – Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», м. Дніпро, 2018.

Доведена можливість статичного і динамічного балансування звичайної і аеродинамічної незрівноваженостей крильчатки осьового вентилятора, як до початку експлуатації – коригуванням мас, так і під час роботи вентилятора – пасивними АБ. Розроблена методика розрахунку аеродинамічної незрівноваженості. Вироблені рекомендації з балансування незрівноваженостей осьового вентилятора коригуванням мас і пасивними АБ.

Натурним експериментом встановлено, що при статичному балансуванні віброшвидкості в площині крильчатки зменшуються не менше, ніж на 42 % від максимально допустимої величини, а при динамічному – не менше, ніж на 54 %. Встановлено, що при динамічному балансуванні на вибігу при переході ротора через резонансні швидкості величина віброшвидкостей зменшується не менше, ніж на 80%. Встановлено, що приєднання додаткових мас до захисного кожуха вентилятора зменшує його вібрації, але не знижує навантаження на підшипники

Комп'ютерне моделювання динаміки вентилятора підтвердило якісні результати раніше проведеного натурального експерименту. Багатофакторним віртуальним експериментом підібрані оптимальні параметри вентилятора і АБ для динамічного балансування крильчатки з ротором електродвигуна.

Ключові слова: осьовий вентилятор, крильчатка, автобалансир, незрівноваженість, аеродинамічна незрівноваженість, автобалансування.

АННОТАЦИЯ

Олейниченко Л.С. Уменьшение вибраций осевых вентиляторов балансировкой обычной и аэродинамической неуравновешенностей. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.02.09 – Динамика и прочность машин. – Национальный технический университет «Днепропетровская политехника», Днепр, 2018.

Исследуется возможность статической и динамической балансировки обычной и аэродинамической неуравновешенностей крыльчатки осевого вентилятора, как до начала эксплуатации – корректировкой масс, так и во время работы – пассивными АБ. Предполагается, что крыльчатка неточно изготовлена и (или) насажена на вал с эксцентриситетом и перекосом.

Найдены главные вектор и момент аэродинамических сил, действующие на вращающуюся в первоначально неподвижном воздухе (газе) крыльчатку осевого вентилятора в случаях: насадки крыльчатки на вал с эксцентриситетом и перекосом – с использованием дисковой теории воздушного винта; неточного изготовления крыльчатки – с использованием теории воздушного винта Загордана. Найдена соответствующая им аэродинамическая неуравновешенность. Установлена ее аналогия с неуравновешенностью от неуравновешенных масс – возможность приведения к двум плоскостям коррекции, зависимость величины аэродинамической силы от квадрата угловой скорости вращения крыльчатки. Также найдено ее отличие, заключающееся в прямопропорциональной зависимости от плотности воздуха (газа). Сделан вывод о возможности балансировки обычной и аэродинамической неуравновешенностей корректировкой масс до начала эксплуатации вентилятора, и по возможности статической или динамической добалансировки этих неуравновешенностей пассивными АБ во время работы вентилятора.

В компьютерной САПР SolidWorks модернизирована 3D модель осевого вентилятора ВО 06-300 №4 с шаровым АБ в обтекателе, установкой второго шарового АБ на хвостовик вала электродвигателя. С использованием модуля Cosmos Motion проведена обработка, отладка и тестирование модели. Проведен многофакторный виртуальный эксперимент, по результатам которого подобраны оптимальные параметры упруго-вязких опор вентилятора и двухшаровых АБ для динамической балансировки крыльчатки. Установлено, что после оптимизации время наступления автобалансировки не превышает 7 с, а без оптимизации может превышать 75 с.

Натурным экспериментом, проведенным для промышленного вентилятора ВО 06-300 №4, установлено, что при статической балансировке обычной и аэродинамической неуравновешенности крыльчатки в целом виброскорости вентилятора уменьшаются не менее, чем на 42% от максимально допустимой величины (6,3 мм/с), а при динамической – не менее, чем на 54%.

Ключевые слова: осевой вентилятор, крыльчатка, автобалансир, неуравновешенность, аэродинамическая неуравновешенность, автобалансировка.

ABSTRACT

Olijnichenko L.S. Reducing of vibrations of low pressure axial fans by balancing of ordinary and aerodynamic imbalances. – As a manuscript.

Thesis for the degree of the Candidate of Technical Sciences (PhD) in specialty 05.02.09 – “Dynamics and strength of machines”. National Technical University “Dnipro Polytechnic”, Dnipro, 2018.

Investigate the possibility of automatic balancing by passive auto-balancers of ordinary and aerodynamic imbalances of the impeller of the axial fan. It is assumed that the impeller is made inaccurate or planted on the shaft eccentricity and

misalignment. Using the disc theory of impeller were found the resultant vector and the resultant moment of the aerodynamic forces acting on rotating in the initial still air (gas) axial fan impeller. Find the corresponding their aerodynamic imbalance. It established its analogy with the imbalance of the unbalanced mass. Also, found its difference consisting in dependence of the aerodynamic imbalance on the density of air (gas). Was concluded about the possibility of balancing aerodynamic imbalance by corrective of mass before operating the fan. Was concluded about the possibility of static or dynamic balancing by passive auto-balancers of conventional and aerodynamic imbalances during fan operation.

Is determined the efficiency of the dynamic balancing by the ball type auto-balancers of the impellers of the axial fan. For this purpose are compared vibro-accelerations on the protective sheepskin coat of the fan in the process of his work in different configurations: with and without ball type auto-balancers; after a presence and absence of additional masses which are fastened on a protective sheepskin coat.

Keywords: axial fan, impeller, auto-balancer, imbalance, aerodynamic imbalance, automatic balancing.

Олійніченко Любов Сергіївна

ЗМЕНШЕННЯ ВІБРАЦІЙ ОСЬОВИХ ВЕНТИЛЯТОРІВ НИЗЬКОГО ТИСКУ
БАЛАНСУВАННЯМ ЗВИЧАЙНОЇ І АЕРОДИНАМІЧНОЇ
НЕЗРІВНОВАЖЕНОСТЕЙ

(Автореферат)

Підписано до друку 22.10.2018 Формат 60x84 1/16.
Папір офсет. Ризографія. Ум. друк. арк.. 1,38.
Ум. фарбо-відб. арк.. 1,32. Тираж 100 прим. Зам. № 325

Віддруковано в Поліграфічному центрі “КОД”
Свідоцтво про державну реєстрацію
25006, м. Кропивницький, вул. Архангельська, 88,
тел. (0522) 322-326