

Філімоніхін Г.Б.,
Яцун В.В.
Кіровоградський
національний технічний
університет

УДК 62-752+62-755

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ЗРІВНОВАЖЕННЯ КУЛЬОВИМИ АВТОБАЛАНСИРАМИ КРИЛЬЧАТКИ ОСЬОВОГО ВЕНТИЛЯТОРА

Исследована работа различных типов шаровых автобалансиров при уравнивании крыльчатки осевого вентилятора. Разработаны методика динамического уравнивания крыльчатки до начала эксплуатации вентилятора и методика определения чувствительности автобалансиров к дисбалансу, использующие двухшаровой автобалансир.

Is investigated works of various types of ball-type autobalancers at a balancing of an impeller of the axial-flow fan. Are developed a technique of a dynamic balancing of an impeller prior to the beginning of operation of the fan and a technique of definition of sensitivity of autobalancers to the unbalance, using the two balls autobalancer.

Вступ. В процесі роботи осьового вентилятора напрямок і величина дисбалансу крильчатки змінюється, внаслідок чого її балансування до початку експлуатації недостатньо. Тому в роботі [1] запропоновано зрівнювати крильчатки на ходу кульовими автобалансирами (АБ) різних типів. В роботі була розроблена схема зрівноваження крильчатки, алгоритми визначення основних параметрів різних типів АБ, описаний стенд, створений на базі осьового вентилятора ВО 06-300 №4 та дослідна модель кульового АБ, запропонований процес зборки вентилятора з АБ із перевіркою параметрів якості.

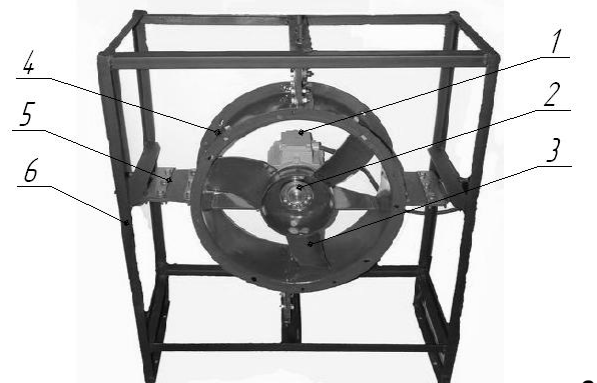
В даній статті досліджується робота різних типів АБ, на різних режимах роботи вентилятора, оцінюється ефективність зрівноваження АБ дисбалансу, зокрема їх чутливість до нього.

§1. Загальний опис стенду.

Стенд складається з таких елементів (рис.1.1, а): асинхронного електродвигуна 1, АБ 2, насадженого на вал електродвигуна, крильчатки 3, захисного кожуха крильчатки 4, гумових або пружинних податливих опор 5 змінної жорсткості (рис.1.1, б, в) і рами 6.

Установка дозволяє [1] змінювати дисбаланс крильчатки, її частоту обертання, спостерігати за відносним рухом куль, замірювати рівень вібрації системи, спостерігати за рухом вала за

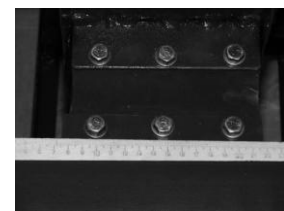
допомогою лазерного променя, спрямованого по осі вала тощо.



а



б



в

а - стенд; б - податлива пружинна опора;
в - податлива гумова опора

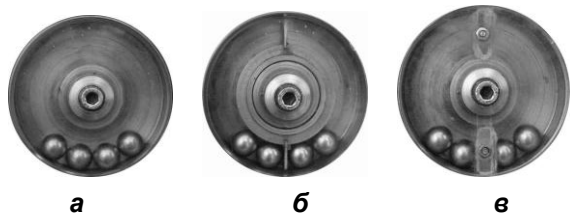
Рисунок 1.1 – Стенд осьового
вентилятора з АБ

Дослідна модель АБ, завдяки своїй конструкції може бути використана в трьох різних конструктивних варіантах (рис. 1.2):

1) як звичайний однорядний кульовий АБ (рис. 1.2, а);

2) як АБ з рухомими перегородками [1], завдяки встановленню втулки, до якої прикріплені перегородки (рис.1.2, б);

3) як АБ з нерухомими перегородками [2], завдяки встановленню кришки з оргскла, в яку вмонтовані перегородки (рис.1.2, в).



а - звичайний АБ; **б** - АБ з рухомими перегородками;
в - АБ з нерухомими перегородками

Рисунок 1.2 – Варіанти дослідної моделі кульового АБ

§2. Налаштування стенду.

Методики перевірки якості виготовлення і встановлення АБ, та правки форми бігової доріжки розглянуті у роботі [1].

Методика визначення і усунення дисбалансу крильчатки вентилятора. Методика полягає в тому, що за серією повторних пусків крильчатка з АБ, в якому дві кулі, можна визначити і усунути її статичний, а потім і моментний дисбаланси. Наявність дисбалансів визначається за положеннями куль відносно АБ). Дисбаланс усувається коригувальними масами, величина яких і місце розташування на колекторі визначаються за відносним положенням куль. Для визначення відносного положення куль використовується цифрова фотозйомка у темряві із спалахом.

Мета статичного зрівноваження: встановленням на колекторі у площині корекції АБ коригувальних мас (КМ) домогтися того, щоб кулі після розгону ротора знаходились одна навпроти одної (рис.2.1).

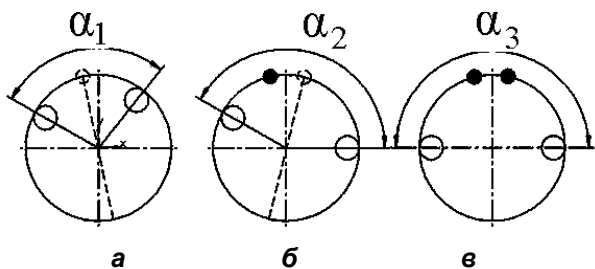


Рисунок 2.1 – Статичне зрівноваження крильчатка за положеннями двох куль

Алгоритм 2.1 - статичного зрівноваження крильчатка.

1. Вводимо розрахункові дані: m - маса кулі; R - відстань від центра кулі до повздовжньої осі ротора; L - відстань від центра ротора до поверхні колектора.

2. Запускаємо крильчатку і визначаємо кут α між кулями. Якщо $\alpha = 180^\circ$, то зупиняємось, інакше виконуємо п. 3.

3. За положеннями куль визначаємо статичний дисбаланс крильчатка

$$S_k = 2 \cdot m \cdot R \cdot \cos(\alpha/2). \quad (2.1)$$

4. Визначаємо величину КМ

$$m_k = S_k / L. \quad (2.2)$$

5. Встановлюємо КМ на колекторі у площині корекції АБ симетрично між кулями (рис. 2.1). Переходимо до п. 2.

На рис. 2.1 показана реалізація алгоритму. Після першого запуску вентилятора кулі зайняли положення, вказане на рис. 2.1, а. Потрібне місце розташування КМ вказано білою крапкою. Після другого пуску вентилятора кулі зайняли місце, показане на рис. 2.1, б. На рисунку перша КМ (вже встановлена) зображена чорною крапкою, а потрібне місце розташування другої - білою. Після третього запуску вентилятора кулі зайняли положення, зображене на рис. 2.1, в, на якому встановлені КМ зображені чорними крапками.

Якщо після статичного зрівноваження при будь-якому невеликому статичному дисбалансі кулі займають одне і теж положення, то в даній крильчатці присутній моментний дисбаланс, викликаний перекосом крильчатка (рис.2.2). При моментному дисбалансі збурна сила завжди намагається змістити кулі до осі перекосу.

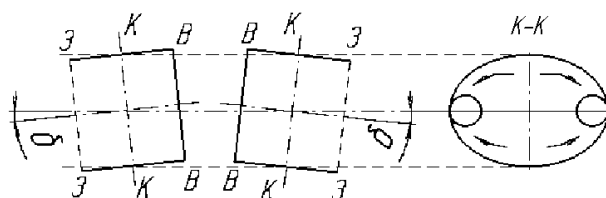


Рисунок 2.2 – Моментний дисбаланс крильчатка

З-З - зовнішня, В-В - внутрішня площина колектора; К-К – площина корекції

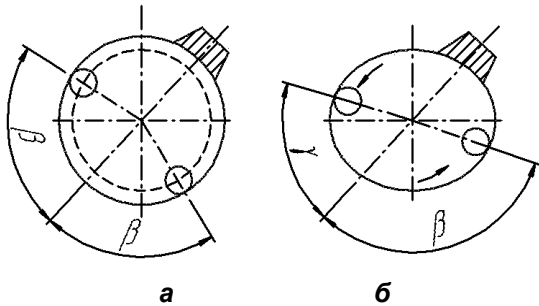
Алгоритм 2.2 - моментного зрівноваження крильчатка.

1. Встановити пробний дисбаланс під кутом 45° до лінії, вздовж якої вибудувалися кулі (рис. 2.3).

2. Запустити крильчатку і визначити положення куль. Якщо кулі займають симетричне положення по відношенню до вантажу, що створює пробний дисбаланс (рис.2.3, а), то

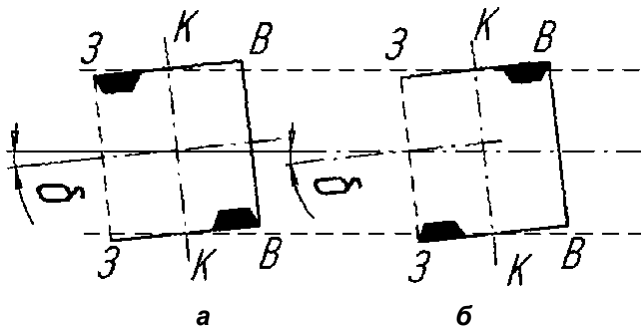
зупиняємось, інакше (рис.2.3, б) переходимо до п. 3.

3. Встановлюємо дві однакові КМ у площині, яка перпендикулярна до осі перекосу: першу – в зовнішній площині колектора, а другу - напроти першої у внутрішній площині колектора (рис.2.4, а).



а - динамічний дисбаланс відсутній;
б - динамічний дисбаланс присутній

Рисунок 2.3 – Реакція куль на пробний дисбаланс



а - вірне; б - невірне

Рисунок 2.4 – Встановлення КМ для усунення моментного дисбалансу

4. Визначаємо положення куль. Якщо кулі займають положення, близьке до симетричного, по відношенню до вантажу, то переходимо до пункту 5, інакше першу КМ встановлюємо в внутрішній площині колектора, а другу - в зовнішній (рис.2.4, б) і повторюємо п. 4.

5. Збільшуємо величину КМ.

6. Визначаємо положення куль, якщо вони займають симетричне положення по відношенню до вантажу, то зупиняємось, інакше переходимо до п.5.

§3. Визначення чутливості АБ до дисбалансу.

Метод повторних перезапусків для оцінки точності зрівноваження статичного дисбалансу. Метод полягає в тому, що за серією повторних пусків крильчатки з одним і тим же дисбалансом визначаються відповідні положення куль щодо крильчатки, а за

розкидом цих положень оцінюється точність зрівноваження АБ дисбалансу крильчатки. Для проведення експерименту необхідно встановити в АБ дві кулі, а в колектор крильчатки - постійний дисбаланс і не змінювати його впродовж всіх пусків. Після кожного пуску визначати кути α_i, β_i , які визначають положення куль (рис.3.1). Дані кути визначатимемо відносно осі X, яка проходить перпендикулярно до осі Y, що проходить через центр колектора і масу, що створює дисбаланс.

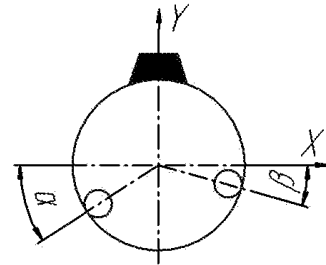


Рисунок 3.1 – Визначення положення куль

Алгоритм 3.1 – визначення чутливості АБ до дисбалансу.

1. Введення розрахункових даних: n - кількість запусків, $i = 1$ - номер першого запуску, m - маса кулі, R - відстань від центра мас кулі до повздожньої осі вентилятора.

2. Пуск № i .

3. Заміряємо кути α_i та β_i , які відповідають пуску i .

4. Проектуємо геометричні центри куль на осі X, Y

$$X_i^{(1)} = R \cdot \cos(\alpha_i) \quad X_i^{(2)} = -R \cdot \cos(\beta_i)$$

$$Y_i^{(1)} = -R \cdot \sin(\alpha_i) \quad Y_i^{(2)} = -R \cdot \sin(\beta_i). \quad (3.1)$$

5. Визначаємо дисбаланс куль відносно осей X і Y

$$S_{xi} = m \cdot (X_i^{(1)} + X_i^{(2)}) \quad S_{yi} = m \cdot (Y_i^{(1)} + Y_i^{(2)}). \quad (3.2)$$

6. Визначаємо сумарний дисбаланс

$$S_i = \sqrt{S_{xi}^2 + S_{yi}^2}. \quad (3.3)$$

7. Якщо $i < n$, то $i = i + 1$, повертаємось до п. 2, інакше продовжуємо розрахунки.

8. Визначаємо середній дисбаланс куль відносно осі X і Y

$$S_{xc} = \sum_{i=1}^n S_{xi} / n \quad S_{yc} = \sum_{i=1}^n S_{yi} / n. \quad (3.4)$$

9. Визначаємо середній сумарний дисбаланс

$$S_c = \sum_{i=1}^n S_i / n. \quad (3.5)$$

10. Визначаємо відхилення дисбалансу від середнього по осі X і Y

$$\Delta S_{xi} = |S_{xi} - S_{xc}| \quad \Delta S_{yi} = |S_{yi} - S_{yc}|. \quad (3.6)$$

11. Визначаємо повне відхилення

$$\Delta S_i = \sqrt{\Delta S_{xi}^2 + \Delta S_{yi}^2}. \quad (3.7)$$

12. Визначаємо середнє значення повних відхилень

$$\Delta S = \sum_{i=1}^n \Delta S_i / n. \quad (3.8)$$

13. Визначаємо середню чутливість АБ

$$\eta_{c\%} = (\Delta S / S_c) \cdot 100. \quad (3.9)$$

14. Визначаємо максимальний залишковий дисбаланс у %

$$\eta_{c\%} = (\Delta S_{\max} / S_c) \cdot 100, \quad (3.10)$$

де S_{\max} - найбільше серед S_i значення відхилень.

Розрахунок чутливості АБ був проведений з використанням даного алгоритму в пакеті програм "Mathcad Professional 2000". Середня чутливість склала 13,1%, а найгірша 16,2%, приблизно 1/6 від балансувальної ємності АБ.

Метод ділення дисбалансу навпіл.

Алгоритм 3.2 – визначення чутливості АБ до дисбаланса.

1. Вводимо розрахункові дані: m - маса кулі, z, R - відстань від центра мас кулі до повздовжньої осі вентилятора, mm , r - радіус кулі, mm , L – радіус колектора, mm , $i=1$ - номер запуску ротора, $m_n = 0$ - початкова величина пробної маси, на яку не реагують кулі, z, N - точність визначення чутливості, яка дорівнює відношенню максимальної маси, що відповідає ємності АБ, до мінімальної маси, на яку АБ гарантовано не реагує.

2. Обчислюємо допоміжний кут

$$\alpha = 2 \arcsin(r / R). \quad (3.11)$$

3. Обчислюємо максимальну балансувальну ємність двокульового АБ

$$S_{\max} = 2mR \cos \alpha. \quad (3.12)$$

4. Обчислюємо початкову величину пробної маси, на яку кулі реагують, та максимальну масу, що відповідає ємності АБ

$$m_p = m_{\max} = S_{\max} / L. \quad (3.13)$$

5. Обчислюємо величину пробної маси

$$m_{np} = (m_p + m_n) / 2. \quad (3.14)$$

6. Встановлюємо пробну масу m_{np} в колектор у площині корекції АБ.

7. Запускаємо крильчатку і перевіряємо, чи реагують кулі на дисбаланс. Якщо реагують, то $m_p = m_{np}$, якщо ні, то $m_n = m_{np}$ і переходимо до п.8.

8. Якщо $m_{\max} / (m_p - m_n) < N$ то переходимо до п. 5, інакше – до п. 9.

9. Обчислюємо чутливість АБ

$$\eta_{c\%} = (m_p / m_{\max}) \cdot 100. \quad (3.15)$$

Чутливість автобалансира склала 15,7%, приблизно 1/6 від балансувальної ємності АБ.

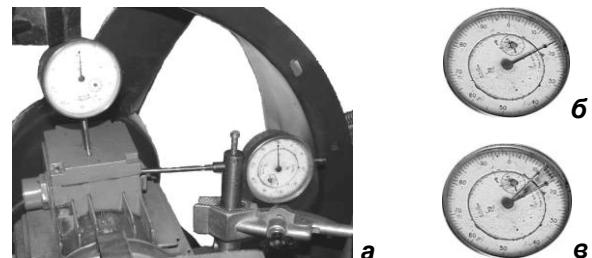
§4. Визначення критичних швидкостей.

Відповідно до загальної теорії пасивних автобалансирів АБ працюють на закритичних швидкостях обертання ротора [4]. З конструкції стенда випливає, що у ротора два головних напрямки коливань – горизонтальний і вертикальний. Для кожного із двох напрямків є дві критичні швидкості, тому всього їх чотири. АБ працюватиме на швидкостях, що перевищують найбільшу критичну швидкість.

При переході критичних швидкостей збільшується амплітуда коливань ротора, що можна побачити, використовуючи різні пристрої, а саме: багатообертовий індикатор переміщень, лазерний ліхтарик чи датчики вібрацій. Для заміру критичних швидкостей використовуємо цифровий тахометр ЦАТ-3М.

Порядок використання багатообертового індикатора переміщень.

1. Встановлюємо індикатори на штативи у напрямку X та Y і підводимо до корпусу електродвигуна (рис.4.1, а).



а – встановлення індикаторів;
б - робоча частота обертання електродвигуна; в - перехід критичної швидкості

Рисунок 4.1 – Визначення критичних швидкостей за допомогою багатообертових індикаторів переміщень

2. Запускаємо електродвигун до робочої частоти обертання 1480 об/хв. (рис.4.1, б), зупиняємо його і спостерігаємо за рухом стрілок індикаторів на вибігу ротора.

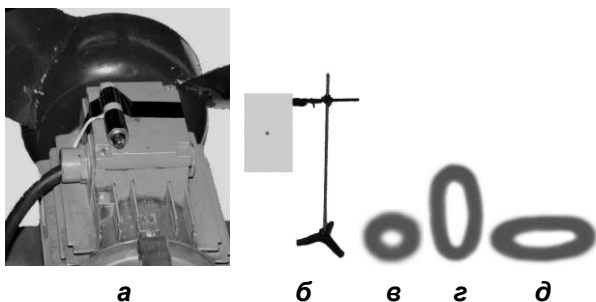
3. В моменти різкого збільшення руху стрілки індикатора записуємо показання тахометра (рис.4.1, в), фіксуючи напрям коливань.

Порядок використання лазерного променя.

1. Встановлюємо лазерний ліхтарик на корпус двигуна (рис 4.2, а), а навпроти ліхтарика встановлюємо білий вертикальний екран (рис.4.2, б).

2. Вмикаємо ліхтарик, запускаємо електродвигун до робочої частоти обертання 1480 об/хв і зупиняємо його. На вибігу ротора спостерігаємо на екрані невелике коло (рис.4.2, в), утворене лазерним променем.

3. В моменти різкого збільшення відхилення лазерного променя (рис.4.2 г, д) записуємо показання тахометра і напрям коливаль.

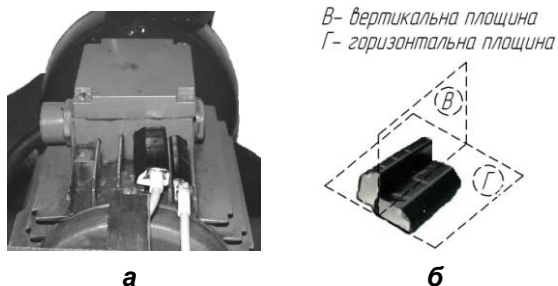


а – закріплення ліхтарика;
б – встановлення планшету;
в – робоча частота обертання електродвигуна; **г** – перехід критичної швидкості у вертикальній,
д – горизонтальній площині

Рисунок 4.2 – Визначення критичних швидкостей за допомогою лазерного ліхтарика

Порядок використання датчиків віброприскорень.

1. Встановлюємо на корпус вентилятора два датчики ADXL150 у площинах *ZOX* і *ZOY* та приєднуємо їх до персонального комп'ютера через аналогово-цифрову плату ADXL202EB-232A з USB інтерфейсом (рис. 4.3).



а - встановлення датчиків; **б** - площини вимірювання вібрацій

Рисунок 4.3 – Визначення критичних швидкостей за допомогою датчиків віброприскорень.

2. Запускаємо електродвигун до робочої частоти обертання 1480 об/хв, зупиняємо його живлення і на вибігу ротора спостерігаємо за діаграмою віброприскорень на моніторі комп'ютера (рис. 4.4).

3. При збільшені амплітуди віброприскорень ротора у певному напрямі (рис.4.4) записуємо показання тахометра.

За допомогою трьох способів було визначено середнє значення критичних швидкостей. Для напрямку *X* перша критична

швидкість становила 572 об/хв, а друга 736 об/хв. Для напрямку *Y* перша критична швидкість становила 562 об/хв, а друга 729 об/хв. Таким чином АБ працюватиме на швидкостях, більших за 736 об/хв.



Рисунок 4.4 – Діаграма віброприскорень

Перевагою використання багатообертового індикатора переміщень є висока точність визначення критичних швидкостей, а недоліком найменша наочність. Дещо більша наочність у лазерного ліхтарика. Але ним важко визначити критичні швидкості, якщо амплітуда коливаль ротора у різних напрямках значно відрізняється. Датчики вібрацій дозволяють найточніше визначити критичні швидкості і мають найбільшу наочність, бо дозволяють спостерігати перехід критичних швидкостей в різних площинах одночасно і зберігають на комп'ютері діаграму віброприскорень.

§5. Експериментальне дослідження роботи різних типів АБ.

1. Звичайний кульовий АБ.

Режим пуску. Без змазки бігової доріжки кулі розігнати не можливо. Вони весь час щільно притиснуті одна до одної і знаходяться у нижній частині корпусу АБ. Для розгону куль необхідно змазати бігову доріжку консистентною змазкою, на зразок солідолу чи мінерального мастила. Проте використання змазки дозволило розігнати не більше 4 куль. До пуску ротора кулі знаходяться в нижній частині АБ (рис. 5.1, а). Під час розгону, на докритичних швидкостях обертання ротора кулі зібрані разом і рухаються по біговій доріжці в сторону, протилежну обертанню ротора (рис.5.1, б). Під час розгону, на закритичних швидкостях обертання ротора кулі займають довільне положення щодо ротора (рис. 5.1, в), доки згонять його, після чого настає автобалансування, тобто кулі самі приходять у те положення, у якому зрівноважують дисбаланс (рис.5.1, г).

Недоліком звичайного АБ є те, що під час пуску кулі збираються разом чим вносять

значний дисбаланс до системи. Розгін куль відбувається досить повільно, близько 10-11 секунд.

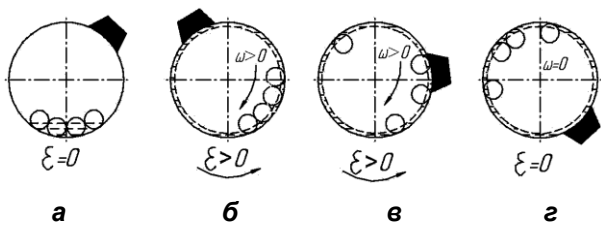
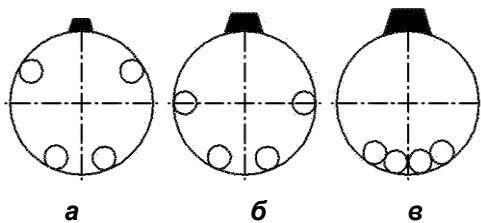


Рисунок 5.1 – Пуск звичайного кульового АБ

Крейсерський режим. На робочій частоті обертання ротора відбувається автобалансування не залежно від кількості куль в АБ. Роботу АБ розглянемо у випадку чотирьох куль. При мінімальному дисбалансі кулі частково переходять в сторону, протилежну дисбалансу (рис.5.2, а), при середньому дисбалансу майже повністю переходять в протилежну сторону (рис.5.2, б) і при максимальному – збираються до купи точно навпроти дисбалансу (рис.5.2, в).



а - мінімальний дисбаланс; б - середній дисбаланс; в - максимальний дисбаланс.

Рисунок 5.2 – Зрівноваження різних дисбалансів

При відсутності дисбалансу кулі займають нейтральне положення щодо ротора, утворюючи пряму лінію для двох куль (рис.5.3, а), рівнобічний трикутник – для трьох (рис.5.3, б), і прямокутник – для чотирьох (рис.5.3, в).

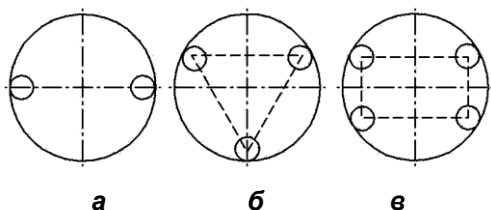


Рисунок 5.3 – Положення куль при відсутності дисбалансу

Одним з недоліків в роботі звичайного АБ є наявність консистентної змазки. Мала в'язкість змазки не забезпечує розбіг куль, а велика – призводить до збільшення зони застою куль, і як наслідок – до зменшення точності зрівноваження ротора.

Режим вибігу. Під час вибігу ротора кулі під дією тангенціальних сил рухаються по біговій доріжці, доки не зупиняться разом з ротором. Аналогічно, як і під час пуску, кулі збираються разом, чим вносять значний дисбаланс до системи.

2. Кульовий АБ з фіксованими перегородками

Режим пуску. До початку пуску ротора кулі, як правило, знаходяться у нижній частині корпуса АБ (рис. 5.4, а). Під час пуску ротора перша половина куль притискається до нижньої перегородки і починає рухатися, в той час як друга – майже не рухається (рис. 5.4, б). Потім друга перегородка торкається другої половини куль і починає її розганяти (рис. 5.4, в). Далі кулі розганяються у симетричному щодо ротора положенні синхронно з ротором до робочої частоти обертання ротора, після чого настає автобалансування (рис. 5.4, г). Таким чином АБ з нерухомими перегородками не вносить під час пуску ротора додаткового дисбалансу до системи, завдяки чому відбувається спокійний розгін ротора.

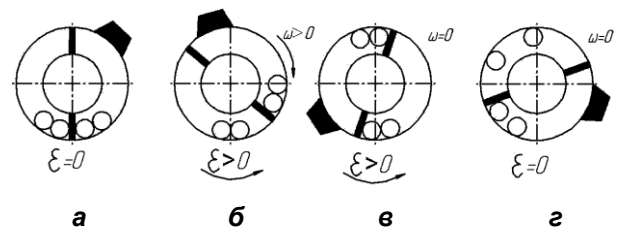
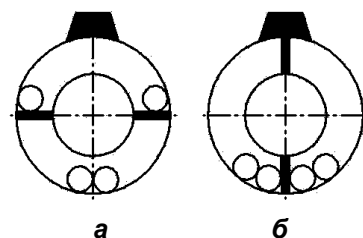


Рисунок 5.4 – Пуск АБ з фіксованими перегородками

Наявність перегородок забезпечує синхронний розгін куль з ротором, який триває близько 5 секунд. Розгін куль і автобалансування відбуваються і без змазки бігової доріжки.

Крейсерський режим. При досягненні ротором робочої частоти обертання настає автобалансування. АБ з перегородками в цілому зрівноважує ротор так саме, як і звичай АБ. Недоліком даного АБ є несиметрія балансувальної ємності, тобто в різних напрямках вона різна (рис.5.5).



а – мінімальна, б – максимальна балансувальна ємність АБ

Рисунок 5.5 – Асиметрія балансувальної ємності АБ з фіксованими перегородками

Перевагою – є найбільша швидкість розгону куль і настання автобалансування.

Режим вибігу. При гальмуванні ротора кулі по інерції рухаються по біговій доріжці, доки не досягають обмежувачів, і далі залишаються у такому відносному положенні майже до повної зупинки ротора. Завдяки цьому відбувається спокійний вибіг ротора.

3. Дослідження роботи кульового АБ з рухомими перегородками

Режим пуску. До початку пуску ротора кулі знаходяться у нижній частині корпусу АБ (рис. 5.6, а). Під час розгону ротора втулка із перегородками починає рухатися раніше за кулі (рис. 5.6, б). У наслідок цього кулі виходять на перегородки (рис. 5.6, в), після чого вони розганяються синхронно з втулкою, і дещо відстають від ротора (рис. 5.6, г).

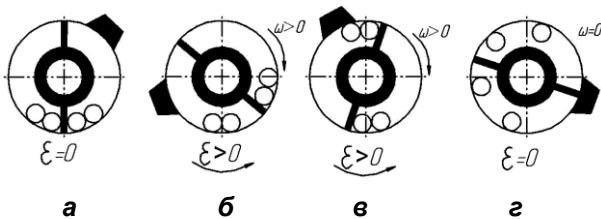


Рис. 5.6 – Пуск АБ з рухомими перегородками

Наявність рухомих перегородок забезпечує спокійний розгін куль як при наявності, так і при відсутності змазки бігової доріжки. Тривалість розгону куль більша, ніж у АБ з фіксованими перегородками за рахунок проковзування втулки і становить 6-7 секунд.

Крейсерський режим. При досягненні ротором робочої частоти обертання настає автобалансування. АБ з рухомими перегородками в цілому зрівноважує ротор так саме, як і звичай АБ. Завдяки тому, що перегородки з'єднані з рухомою втулкою, забезпечується симетрія балансувальної ємності АБ в різних напрямках.

Режим вибігу. При гальмуванні ротора кулі по інерції рухаються по біговій доріжці, доки не досягнуть обмежувачів. Далі вони знаходяться у такому положенні майже до повної зупинки ротора, завдяки чому відбувається спокійний вибіг ротора.

АБ із рухомими перегородками зберігає переваги АБ із нерухомими перегородками, але має симетрію балансувальної ємності.

Висновки

1. Зрівноваження крильчатки осьового вентилятора на ходу у процесі експлуатації пасивними АБ призводить до гарантованого зменшення максимального дисбалансу у 6 разів.

2. Для зрівноваження крильчатки можна використовувати різні типи кульових АБ, а саме – звичайні, з нерухомими і рухомими перегородками.

3. Перед використанням АБ необхідно перевірити якість його виготовлення, встановлення, попереднього балансування корпусу, а при необхідності виправити форму бігової доріжки куль і попередньо зрівноважити корпус АБ.

4. У порівнянні з іншими найбільші переваги має кульовий АБ з рухомими перегородками.

5. Рекомендується використовувати АБ для зрівноваження крильчаток осьових вентиляторів, які розбалансовуються під час експлуатації не більше як на два класи точності за ГОСТом 22061-76 [5].

Список літератури

1. Філімоніхін Г.Б. Яцун В.В. Зрівноваження крильчаток осьових вентиляторів пасивними автобалансирами// Збірник наукових праць КНТУ, 2007, випуск 18

2. Автобалансуючий пристрій: Пат. № 75189 Україна, МКІ G01M 1/38 / Г. Б. Філімоніхін, В. С. Майоров

3. Філімоніхін Г.Б. Яцун В.В. Автобалансуючий пристрій з уловлювачами для зрівноваження роторів із похилою віссю обертання// Загальнодержавний міжвідомчий науково-технічний збірник. Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин // КНТУ, 2006, випуск 36, -С. 127-132.

4. Філімоніхін Г.Б. Зрівноваження і віброзахист роторів автобалансирами з твердими коригувальними вантажами: Монографія (за спеціальністю 05.02.09 - динаміка та міцність машин). - Кіровоград: КНТУ, 2004. - 352 с.

5. ГОСТ 22061-76. Машины и технологическое оборудование. Система классов точности и балансировки. - М.: Изд-во стандартов, 1984. - 134 с.