

У випадку, коли лопаті крильчатки осевого вентилятора неточно виготовлені, встановлено аналогію між аеродинамічним дисбалансом і дисбалансом від незрівноважених мас. Зроблено висновок про можливість зрівноважування звичайного і аеродинамічного дисбалансів корегуванням мас до початку експлуатації вентилятора, і про можливість статичного чи динамічного зрівноважування цих дисбалансів пасивними автобалансирами під час роботи вентилятора

Ключові слова: осевий вентилятор, крильчатка, аеродинамічні сили, динамічний дисбаланс, аеродинамічний дисбаланс, автобалансир

В случае, когда лопасти крыльчатки осевого вентилятора неточно изготовлены, установлена аналогия между аэродинамическим дисбалансом и дисбалансом от неуравновешенных масс. Сделан вывод о возможности уравновешивания обычного и аэродинамического дисбалансов корректировкой масс до начала эксплуатации вентилятора, и о возможности статического или динамического уравновешивания этих дисбалансов пассивными автобалансирами во время работы вентилятора

Ключевые слова: осевой вентилятор, крыльчатка, аэродинамические силы, динамический дисбаланс, аэродинамический дисбаланс, автобалансир

УДК 62-752+62-755 : 621.634

DOI: 10.15587/1729-4061.2015.51195

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ УРАВНОВЕШИВАНИЯ АЭРОДИНАМИЧЕСКОГО ДИСБАЛАНСА КРЫЛЬЧАТКИ ОСЕВОГО ВЕНТИЛЯТОРА КОРРЕКТИРОВКОЙ МАСС

Г. Б. Филимонихин

Доктор технических наук, профессор*

E-mail: filimonikhin@yandex.ua

Л. С. Олійниченко

Аспирант**

E-mail: loga_lubov@ukr.net

*Кафедра деталей машин и прикладной механики***

Кафедра ремонта и эксплуатации машин*

***Кировоградский национальный

технический университет

пр. Университетский, 8, г. Кировоград, Украина, 25006

1. Введение

Осевые вентиляторы широко используются в промышленности и быту [1]. Основным источником вибраций таких машин является обычный и аэродинамический дисбалансы [2–6]. Традиционно до начала эксплуатации вентилятора сначала уменьшают аэродинамический дисбаланс правкой формы лопастей, а затем – обычный дисбаланс корректировкой масс [7, 8]. Также обычный дисбаланс можно уменьшать в процессе работы вентилятора пассивными автобалансирами [9–13]. Следует отметить, что процесс правки формы крыльчатки осевого вентилятора более трудоемкий и менее разработан, чем процесс балансировки. Поэтому актуально исследовать возможность одновременного уравновешивания обычного и аэродинамического дисбалансов крыльчатки осевого вентилятора указанными выше методами балансировки вращающихся масс.

2. Анализ литературных данных и постановка проблемы

В работе [2] показано, что источниками вибраций осевых вентиляторов являются: обычный дисбаланс

(статический и динамический) вращающихся частей; тепловой дисбаланс, вызванный деформациями вращающихся частей из-за изменения температуры (подобен обычному дисбалансу, но меняется от температуры); технологический дисбаланс, вызванный, в том числе, аэродинамическими силами из-за несимметрии крыльчаток. В работе [3] до указанных источников вибраций добавлены вибрации, вызванные несоосной установкой нескольких вращающихся валов, подшипниковых опор и т. п. В работах [4–6] изучается аэродинамический дисбаланс, возникающий из-за неточности изготовления и насадки крыльчатки на вал. При этом рассматриваются вентиляторы, в которых на единственный вращающийся вал насажены крыльчатка и ротор. В работе [4] рассмотрены основные подходы в области прогнозирования аэродинамического дисбаланса турбоагрегатов, построены модели и разработаны алгоритмы его вероятностного прогнозирования. В работе [5] приведен расчет аэродинамического дисбаланса ротора турбокомпрессора двигателя внутреннего сгорания. В работе [6] показано, что наибольший вклад в вибрации рассматриваемых вентиляторов вносят обычный и аэродинамический дисбалансы.

В работах [7, 8] предлагается уменьшать аэродинамический и обычный дисбалансы до нача-

ла эксплуатации вентилятора. Для этого сначала уменьшается аэродинамический дисбаланс правкой формы крыльчатки, а затем – обычный дисбаланс балансировкой вращающихся частей вентилятора в сборе. При этом процесс правки формы крыльчатки более трудоемкий и менее разработанный, чем процесс балансировки ротора. В связи с этим актуально определить, есть ли аналогия между обычным и аэродинамическим дисбалансами крыльчатки и можно ли эти два дисбаланса уравнивать одной только корректировкой масс до начала эксплуатации вентилятора.

Также крыльчатки вентиляторов во время эксплуатации изнашиваются, деформируются, на них налипают пыль и грязь и т. д. [1], от чего постоянно нарушается балансировка, появляются переменные во времени обычные и аэродинамические дисбалансы [2–6]. Для уравнивания переменных обычных дисбалансов применяют пассивные автобалансиры [9, 10]. В них корректирующие грузы при определенных условиях сами приходят в то положение, в котором уравнивают обычный дисбаланс.

В работе [11] установлено, что если составной ротор, образованный вращающимися частями:

- короткий, то обычный дисбаланс возможно уравнивать только статически одним пассивным автобалансиrom, расположенным в плоскости статического дисбаланса;

- длинный, то обычный дисбаланс возможно уравнивать как статически одним пассивным автобалансиrom, расположенным в плоскости статического дисбаланса, так и динамически, – двумя пассивными автобалансирами, расположенными в двух разных плоскостях коррекции.

Так же авторами статьи доказана эффективность уравнивания обычного дисбаланса крыльчатки осевого вентилятора двумя шаровыми автобалансирами экспериментально [12] и 3D моделированием [13]. В связи с этим актуально также определить, можно ли одними только пассивными автобалансирами уравнивать на ходу обычный и аэродинамический дисбалансы крыльчатки осевого вентилятора.

3. Цель работы и задачи исследований

Целью работы является исследование возможности уравнивания корректировкой масс обычного и аэродинамического дисбалансов крыльчатки осевого вентилятора как до начала эксплуатации, так и во время работы вентилятора.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- определить аэродинамические силы и создаваемый ими дисбаланс и сравнить обычный и аэродинамический дисбалансы;

- дать заключение о возможности уравнивания этих двух дисбалансов корректировкой масс до начала эксплуатации вентилятора;

- дать заключение о возможности уравнивания двух дисбалансов пассивными автобалансирами – на ходу, во время эксплуатации вентилятора.

4. Методы исследований аэродинамического дисбаланса и возможности его уравнивания корректировкой масс

В соответствии с общей теорией балансировки [9], дисбаланс ротора моделируется двумя точечными массами, расположенными в двух плоскостях коррекции. Главный вектор и главный момент аэродинамических сил, действующих на крыльчатку, определяются с использованием элементов аэродинамики воздушного винта [14–17], теории воздушного винта Загордана [17]. Заключение о возможности уравнивания двух дисбалансов делается с учетом результатов теории балансировки [9] и теории пассивных автобалансиров [10, 11].

5. Результаты исследований аэродинамического дисбаланса и возможности его уравнивания корректировкой масс

5. 1. Описание системы

Крыльчатка насажена на жесткий ротор или его вал (рис. 1). Центр крыльчатки находится в точке O . Ротор вращается вокруг продольной оси с постоянной угловой скоростью вращения ω .

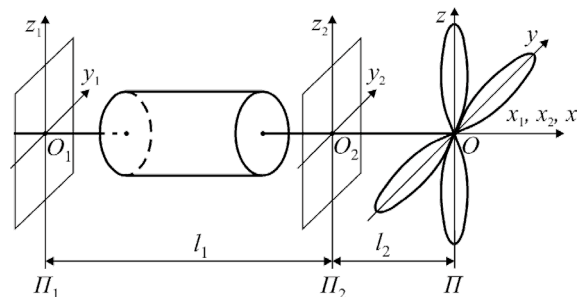


Рис. 1. Общая схема ротора с крыльчаткой

Согласно общей теории автобалансировки динамический дисбаланс ротора моделируем двумя точечными массами m_1, m_2 , расположенными, соответственно, в двух плоскостях коррекции – Π_1, Π_2 . Расстояние между плоскостями – l_1 .

С началом в центре крыльчатки проводим оси $Oxuz$, причем ось x направляем вдоль продольной оси ротора. Аналогично в первой и во второй плоскостях коррекции проводим оси $O_1x_1y_1z_1$ и $O_2x_2y_2z_2$.

Дисбаланс в i -ой плоскости коррекции находится на расстоянии r_i от продольной оси ротора и радиус, проведенный от оси вращения до точечной массы, образует угол ϕ_i с осью y_i (рис. 2).

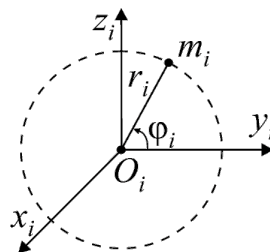


Рис. 2. Моделирование (обычного) дисбаланса в i -ой плоскости коррекции

5. 2. Приведение аэродинамических сил к главному вектору и моменту

Крыльчатка имеет не менее 3 лопастей, расположенных с равным шагом. Одна из лопастей выполнена с дефектом. Поэтому главный вектор \vec{R} и главный момент \vec{M}_O аэродинамических сил, приведенных к точке O , имеют поперечные относительно продольной оси ротора составляющие R_y, R_z и M_y, M_z (рис. 3, а, б). Эти составляющие образуют аэродинамический дисбаланс и могут отклонять продольную ось ротора от оси вращения как поступательно, так и вращательно.

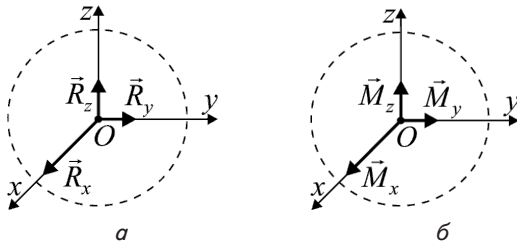


Рис. 3. Сведение аэродинамических сил до: а – главного вектора; б – главного момента

Проекции главного вектора и главного момента на оси $Oxuz$ соответственно равны R_x, R_y, R_z и M_x, M_y, M_z .

5. 3. Приведение аэродинамических сил к двум плоскостям коррекции

На рис. 4, а, б показаны силы $\vec{F}_{1y}^{(a)}, \vec{F}_{1z}^{(a)}, \vec{F}_{2y}^{(a)}, \vec{F}_{2z}^{(a)}$, находящиеся в плоскостях коррекции и статически эквивалентные аэродинамическим силам.

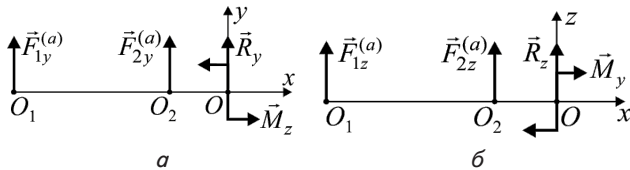


Рис. 4. Схема приведения аэродинамических сил к двум плоскостям коррекции: а – плоскость yOx ; б – плоскость zOx

В соответствии с условием статической эквивалентности, силы $\vec{F}_{1y}^{(a)}, \vec{F}_{1z}^{(a)}, \vec{F}_{2y}^{(a)}, \vec{F}_{2z}^{(a)}$ и аэродинамические силы R_y, R_z и M_y, M_z создают одинаковые моменты относительно центров O_1, O_2 :

$$\begin{aligned} \sum M_{O_1}(F_{iy}) : F_{2y}^{(a)} \cdot |O_1O_2| &= M_z + R_y \cdot |O_1O|, \\ \sum M_{O_1}(F_{iz}) : F_{2z}^{(a)} \cdot |O_1O_2| &= -M_y + R_z \cdot |O_1O|, \\ \sum M_{O_2}(F_{iy}) : -F_{1y}^{(a)} \cdot |O_1O_2| &= M_z + R_y \cdot |O_2O|, \\ \sum M_{O_2}(F_{iz}) : -F_{1z}^{(a)} \cdot |O_1O_2| &= -M_y + R_z \cdot |O_2O|. \end{aligned} \quad (1)$$

Из этих условий находим такие проекции сведенных аэродинамических сил:

$$\begin{aligned} F_{1y}^{(a)} &= -(M_z + R_y l_2) / l_1, \quad F_{1z}^{(a)} = (M_y - R_z l_2) / l_1, \\ F_{2y}^{(a)} &= [M_z + R_y (l_1 + l_2)] / l_1, \quad F_{2z}^{(a)} = -[M_y - R_z (l_1 + l_2)] / l_1. \end{aligned} \quad (2)$$

Заметим, что эти силы не уравновешивают аэродинамические силы, а являются статически эквивалентными им.

5. 4. Определение аэродинамических сил по теории воздушного винта Загордана

Используя основные законы аэрогидродинамики [14–17] и теорию воздушного винта Загордана [17], определяем главный вектор и главный момент аэродинамических сил, действующих на крыльчатку в целом, при этом каждую лопасть рассматриваем отдельно как несущее крыло.

Используем следующие упрощающие предположения теории воздушного винта Загордана:

- каждая лопасть крыльчатки рассматривается как крыло конечного размаха, обтекаемое собственным прямолинейным воздушным потоком;
- равнодействующая элементарных аэродинамических сил, действующих на элементы лопасти, приложена в сечении крыла, удаленном от оси вращения на расстояние, примерно равное 70 % радиуса винта (рис. 5);
- коэффициенты аэродинамических сил меняют свою величину для разных сечений лопасти из-за изменения угла атаки вдоль лопасти, однако их значения принимаются равными этим величинам в указанном выше сечении.

Фактически в таком подходе свойства каждой лопасти определяют ее характеристики в сечении. Этими характеристиками являются аэродинамические характеристики элементарного профиля в этом сечении, скорость и направление набегающего на этот профиль воздуха.

Указанных предположений достаточно для вычисления аэродинамических сил, действующих на отдельные лопасти винта при любом движении крыльчатки в воздухе. Будем предполагать, что воздух первоначально неподвижен и в нем крыльчатка вращается вокруг неподвижной оси вращения.

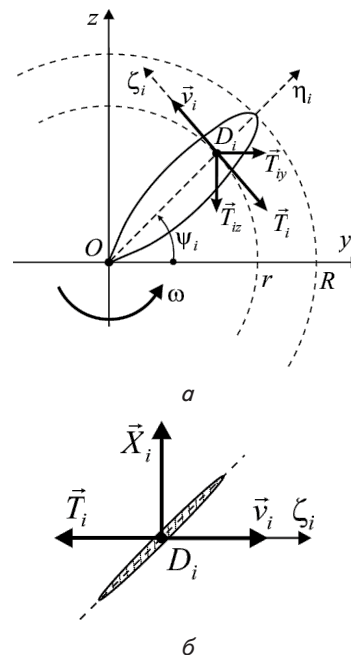


Рис. 5. Аэродинамические силы, действующие на лопасть крыльчатки: а – вид лопасти со стороны продольной оси вентилятора; б – вид характерного сечения лопасти со стороны оси η_i

В соответствии с основным законом аэродинамики, подъемная сила, действующая на лопасть номер i :

$$X_i = \frac{1}{2} \rho C_{xi} A_i r_i^2 \omega^2, \quad /i = \overline{1, n}/, \quad (3)$$

где C_{xi} – коэффициент подъёмной силы; ρ – плотность воздуха; A_i – площадь характерного поперечного сечения лопасти; r_i – расстояние от продольной оси вентилятора до характерного поперечного сечения лопасти (приблизительно равняется 70 % радиуса крыльчатки); ω – частота вращения крыльчатки.

Сила лобового сопротивления, действующая на лопасть номер i :

$$T_i = \frac{1}{2} \rho C_{vi} A_i r_i^2 \omega^2, \quad /i = \overline{1, n}/, \quad (4)$$

где C_{vi} – коэффициент силы лобового сопротивления. Проекция этой силы на оси y, z :

$$T_{iy} = T_i \cdot \sin \psi_i, \quad T_{iz} = -T_i \cdot \cos \psi_i, \quad /i = \overline{1, n}/. \quad (5)$$

Проекция главного вектора и главного момента аэродинамических сил на оси $Oxyz$:

$$R_x = \sum_{i=1}^n X_i, \quad R_y = \sum_{i=1}^n T_i \sin \psi_i, \quad R_z = -\sum_{i=1}^n T_i \cos \psi_i, \\ M_x = -\sum_{i=1}^n T_i r_i, \quad M_y = \sum_{i=1}^n X_i r_i \sin \psi_i, \quad M_z = -\sum_{i=1}^n X_i r_i \cos \psi_i. \quad (6)$$

Подъёмные силы образуют суммарную осевую аэродинамическую силу R_x . Ее создает воздух при перемещении его лопастями вдоль продольной оси крыльчатки.

Силы лобового сопротивления образуют относительно продольной оси крыльчатки момент M_x . Он преодолевается за счет крутящего момента от двигателя вентилятора.

Аэродинамический дисбаланс создают составляющие R_y, R_z, M_y, M_z .

1) Пусть все лопасти одинаковые. Тогда аэродинамические силы, приложенные к лопастям по модулю равны между собой:

$$T_i = T = \frac{1}{2} \rho C_v A r^2 \omega^2, \quad X_i = X = \frac{1}{2} \rho C_x A r^2 \omega^2, \quad /i = \overline{1, n}/. \quad (7)$$

В этом случае:

$$\sum_{i=1}^n T_i \cos \psi_i = T \sum_{i=1}^n \cos \psi_i = 0, \quad \sum_{i=1}^n T_i \sin \psi_i = T \sum_{i=1}^n \sin \psi_i = 0.$$

Тогда проекции главного вектора и главного момента аэродинамических сил на оси $Oxyz$:

$$R_x = nX = \frac{1}{2} n \rho C_x A r^2 \omega^2, \quad R_y = 0, \quad R_z = 0, \\ M_x = -nTr = -\frac{1}{2} n \rho C_v A r^3 \omega^2, \quad M_y = 0, \quad M_z = 0. \quad (8)$$

2) Пусть только одна лопасть номер j из всех не точно изготовлена и для нее

$$T_j = T + \Delta T, \quad X_j = X + \Delta X, \quad (9)$$

где ΔX – изменение подъёмной силы, действующей на дефектную лопасть; ΔT – изменение силы лобового сопротивления, действующей на дефектную лопасть.

С использованием уравнений (6) определяем проекции главного вектора и главного момента аэродинамических сил на оси $Oxyz$:

$$R_x = nX + \Delta X,$$

$$R_y = \sum_{i=1}^n T_i \sin \psi_i = T \sum_{i=1}^n \sin \psi_i + \Delta T \cdot \sin \psi_j = \Delta T \cdot \sin \psi_j,$$

$$R_z = -\sum_{i=1}^n T_i \cos \psi_i = -T \sum_{i=1}^n \cos \psi_i - \\ -\Delta T \cdot \cos \psi_j = -\Delta T \cdot \cos \psi_j,$$

$$M_x = -r \cdot nT - r \cdot \Delta T,$$

$$M_y = r(X \sum_{i=1}^n \sin \psi_i + \Delta X \cdot \sin \psi_j) = r \Delta X \cdot \sin \psi_j,$$

$$M_z = -r(X \sum_{i=1}^n \cos \psi_i + \Delta X \cdot \cos \psi_j) = -r \Delta X \cdot \cos \psi_j. \quad (10)$$

Изменение подъёмной силы и силы лобового сопротивления, действующих на дефектную лопасть, вызвано изменением у этой лопасти параметров C_x, A, r , поэтому:

$$\Delta X = \frac{1}{2} \rho \Delta(C_x A r^2) \omega^2, \quad \Delta T = \frac{1}{2} \rho \Delta(C_v A r^2) \omega^2. \quad (11)$$

Подъёмные силы и силы лобового сопротивления, действующие на дефектную лопасть:

$$T_j = \frac{1}{2} \rho \omega^2 [C_v A r^2 + \Delta(C_v A r^2)],$$

$$X_j = \frac{1}{2} \rho \omega^2 [C_x A r^2 + \Delta(C_x A r^2)]. \quad (12)$$

Тогда проекции главного вектора и главного момента аэродинамических сил на оси $Oxyz$:

$$R_x = \frac{1}{2} n \rho C_x A r^2 \omega^2 + \frac{1}{2} \rho \Delta(C_x A r^2) \omega^2 =$$

$$= \frac{1}{2} \rho A r^2 \left[n C_x + \frac{\Delta(C_x A r^2)}{A r^2} \right] \omega^2,$$

$$R_y = \frac{1}{2} \rho \Delta(C_v A r^2) \omega^2 \sin \psi_j, \quad R_z = -\frac{1}{2} \rho \Delta(C_v A r^2) \omega^2 \cos \psi_j,$$

$$M_x = -\frac{1}{2} \rho \omega^2 r [n C_v A r^2 + \Delta(C_v A r^2)] =$$

$$= -\frac{1}{2} \rho A r^2 \omega^2 r \left[n C_v + \frac{\Delta(C_v A r^2)}{A r^2} \right],$$

$$M_y = \frac{1}{2} \rho \Delta(C_x A r^2) \omega^2 r \sin \psi_j,$$

$$M_z = -\frac{1}{2} \rho \Delta(C_x A r^2) \omega^2 r \cos \psi_j. \quad (13)$$

Введем коэффициенты:

$$B = \frac{1}{2} \rho A r^2, \quad c_y = \frac{\Delta(C_v A r^2)}{A r^2} \sin \psi_j, \quad c_z = -\frac{\Delta(C_v A r^2)}{A r^2} \cos \psi_j,$$

$$m_y = \frac{\Delta(C_x A r^2)}{A r^2} r \sin \psi_j, \quad m_z = -\frac{\Delta(C_x A r^2)}{A r^2} r \cos \psi_j,$$

$$c_x = n C_x + \frac{\sqrt{m_y^2 + m_z^2}}{r}, \quad m_x = -(n C_v + \sqrt{c_y^2 + c_z^2}). \quad (14)$$

Тогда, проекции главного вектора и главного момента аэродинамических сил (13) примут вид:

$$R_x = c_x B \omega^2, \quad R_y = c_y B \omega^2, \quad R_z = c_z B \omega^2,$$

$$M_x = m_x B \omega^2, M_y = m_y B \omega^2, M_z = m_z B \omega^2. \tag{15}$$

Подставляя полученные проекции (15) в уравнения (2), получим проекции сведенных аэродинамических сил, действующих на ротор. Эти проекции занесены в табл. 1. Также в табл. 1 занесены центробежные силы от точечных неуравновешенных масс.

Таблица 1

Силы, действующие на ротор с крыльчаткой, образованные дисбалансами

n/p	Силы, действующие на ротор	
	Силы инерции	Аэродинамические силы
1	$I_{1y} = m_1 r_1 \omega^2 \cos \phi_1$	$F_{1y}^{(a)} = -B(m_z r + c_y l_2) \omega^2 / l_1$
2	$I_{1z} = m_1 r_1 \omega^2 \sin \phi_1$	$F_{1z}^{(a)} = B(m_y r - c_z l_2) \omega^2 / l_1$
3	$I_{2y} = m_2 r_2 \omega^2 \cos \phi_2$	$F_{2y}^{(a)} = B[m_z r + c_y (l_1 + l_2)] \omega^2 / l_1$
4	$I_{2z} = m_2 r_2 \omega^2 \sin \phi_2$	$F_{2z}^{(a)} = -B[m_y r - c_z (l_1 + l_2)] \omega^2 / l_1$

В табл. 2 внесены обычный и аэродинамический дисбалансы, соответствующие центробежным и аэродинамическим силам.

Таблица 2

Дисбалансы ротора с крыльчаткой

n/p	Дисбаланс от	
	сил инерции	аэродинамических сил
1	$S_{1y}^{(p)} = m_1 r_1 \cos \phi_1$	$S_{1y}^{(a)} = -B(m_z r + c_y l_2) / l_1$
2	$S_{1z}^{(p)} = m_1 r_1 \sin \phi_1$	$S_{1z}^{(a)} = B(m_y r - c_z l_2) / l_1$
3	$S_{2y}^{(p)} = m_2 r_2 \cos \phi_2$	$S_{2y}^{(a)} = B[m_z r + c_y (l_1 + l_2)] / l_1$
4	$S_{2z}^{(p)} = m_2 r_2 \sin \phi_2$	$S_{2z}^{(a)} = -B[m_y r - c_z (l_1 + l_2)] / l_1$

Суммарный дисбаланс вращающихся частей вентилятора определяется суммированием составляющих от обычного и аэродинамического дисбалансов:

$$S_{1y} = S_{1y}^{(p)} + S_{1y}^{(a)}, S_{1z} = S_{1z}^{(p)} + S_{1z}^{(a)},$$

$$S_{2y} = S_{2y}^{(p)} + S_{2y}^{(a)}, S_{2z} = S_{2z}^{(p)} + S_{2z}^{(a)}. \tag{16}$$

6. Обсуждение результатов исследования аэродинамического дисбаланса и возможности его уравновешивания корректировкой масс

Сравнение обычного и аэродинамического дисбалансов позволяет установить между ними такие аналогии:

- оба дисбаланса приводятся к двум плоскостям коррекции;
- силы от этих дисбалансов пропорциональны квадрату угловой скорости вращения ротора.

Отличие этих дисбалансов заключается в зависимости аэродинамического дисбаланса от плотности воздуха. Поэтому аэродинамический дисбаланс изменяется в зависимости от размещения вентилятора над уровнем моря и погодных условий.

В соответствии с общей теорией автобалансировки, оба дисбаланса можно уравновесить до начала эксплуатации ротора корректировкой масс, однако аэродинамический дисбаланс будет меняться в зависимости от плотности воздуха (газа).

В соответствии с теорией пассивных автобаланси- ров оба дисбаланса можно непрерывно уравновешивать на ходу ротора пассивными автобалансирами, причем:

- если ротор короткий, то аэродинамический и обычный дисбалансы возможно уравновесить только статически одним пассивным автобаланси- ром, расположенным в плоскости статического дисбаланса;

- если ротор длинный, то аэродинамический и обычный дисбалансы возможно уравновесить как статически одним пассивным автобаланси- ром, расположенным в плоскости статического дисбаланса, так и динамически – двумя пассивными автобалансирами, расположенными в двух разных плоскостях коррекции.

В соответствии с полученными результатами, можно утверждать, что в случае, если несколько лопастей или все лопасти изготовлены с дефектами, то расчет аэродинамического дисбаланса будет проходить аналогично и выводы, сделанные выше, не изменятся. Также насадку крыльчатки на вал с эксцентриситетом и перекосом можно моделировать неточностью изготовления ее лопастей. В этом случае также будут справедливы выводы, сделанные выше.

7. Выводы

Учитывая полученные результаты, делаем следующие выводы о возможности уравновешивания обычного и аэродинамического дисбалансов крыльчатки осевого вентилятора, если она изготовлена с дефектами, насажена на вал с эксцентриситетом и перекосом и вращается в первоначально неподвижном воздухе (газе).

1. Аэродинамический дисбаланс крыльчатки аналогичен обычному дисбалансу (приводится к двум плоскостям коррекции, силы от него пропорциональны квадрату угловой скорости вращения ротора), однако зависит от плотности воздуха (газа).

2. Оба дисбаланса можно уравновесить до начала эксплуатации ротора корректировкой масс, однако аэродинамический дисбаланс будет меняться в зависимости от плотности воздуха (газа).

3. Оба дисбаланса можно непрерывно уравновешивать на ходу ротора пассивными автобалансирами, при этом:

- если ротор короткий, то аэродинамический и обычный дисбалансы возможно уравновесить только статически одним пассивным автобаланси- ром, расположенным в плоскости статического дисбаланса;

- если ротор длинный, то аэродинамический и обычный дисбалансы возможно уравновесить как статически одним пассивным автобаланси- ром, расположенным в плоскости статического дисбаланса, так и динамически – двумя пассивными автобалансирами, расположенными в двух разных плоскостях коррекции.

Література

1. Поляков, В. В. Насосы и вентиляторы [Текст] / В. В. Поляков, Л. С. Скворцов. – М.: Стройиздат, 1990. – 336 с.
2. Яценко, В. А. Дисбаланс как одна из причин вибрации роторов шахтных стационарных машин [Текст] / В. А. Яценко // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Сер. Гірничо-електромеханічна. – 2009. – Вип. 17 (157). – С. 284–291.
3. Зиборов, К. А. Дисбаланс как один из основных факторов, влияющий на работу роторов шахтных вентиляторов главного проветривания [Текст] / К. А. Зиборов, Г. К. Ванжа, В. Н. Марьенко // Современное машиностроение. Наука и образование. – 2013. – № 3. – С. 734–740. – Режим доступа: http://www.mmf.spbstu.ru/mese/2013/734_740.pdf
4. Корнеев, Н. В. Аэродинамический дисбаланс турбоагрегатов и алгоритмы его прогнозирования [Текст] / Н. В. Корнеев // Машиностроитель. – 2008. – № 10. – С. 24–27.
5. Корнеев, Н. В. Расчет аэродинамического дисбаланса ротора турбокомпрессора ДВС [Текст] / Н. В. Корнеев, Е. В. Полякова // Автомобильная промышленность. – 2014. – № 8. – С. 13–16.
6. Корнеев, Н. В. Аэродинамический дисбаланс турбокомпрессора как причина снижения энергетических показателей двигателей внутреннего сгорания [Текст] / Н. В. Корнеев, Е. В. Полякова // Техника машиностроения. – 2014. – Т. 21, № 1. – С. 51–57.
7. Kim, J.-H. Optimization of the Aerodynamic and Aeroacoustic Performance of an Axial-Flow Fan [Text] / J.-H. Kim, B. Ovgor, K.-H. Cha, J.-H. Kim, S. Lee, K.-Y. Kim // AIAA Journal. – 2014. – Vol. 52, Issue 9. – P. 2032–2044. doi: 10.2514/1.J052754
8. Способ низкооборотной балансировки массы и аэродинамики высокооборотного лопаточного ротора. Пат. № 2419773 Российская Федерация, МПК G01M 1/00 (2006.01) [Текст] / Суворов Л. М. – заявитель и патентообладатель Суворов Л. М. – № 2009109011/28; заявл. 11.03.2009; опубл. 27.05.2011, Бюл. № 15.
9. Гусаров, А. А. Автобалансирующие устройства прямого действия [Текст] / А. А. Гусаров. – М.: Наука, 2002. – 119 с.
10. Філімоніхін, Г. Б. Зрівноваження і віброзахист роторів автобалансирами з твердими коригувальними вантажами [Текст]: монографія / Г. Б. Філімоніхін. – Кіровоград: КНТУ, 2004. – 352 с.
11. Філімоніхіна, І. І. Узагальнений емпіричний критерій стійкості основного руху і його застосування до ротора на двох осесиметричних пружних опорах [Текст] / І. І. Філімоніхіна, Г. Б. Філімоніхін // Машинознавство. – 2007. – № 3. – С. 22–27.
12. Філімоніхін, Г. Б. Експериментальне визначення ефективності динамічного зрівноваження кульовими автобалансирами крильчатки осьового вентилятора [Текст] / Г. Б. Філімоніхін, Л. С. Олійніченко // Український міжвідомчий н.-т. Збірник „Автоматизація виробничих процесів у машинобудуванні та приладобудуванні”. – 2011. – Вип. № 45. – С. 496–503.
13. Олійніченко, Л. С. Оптимізація параметрів автобалансирів для динамічного зрівноваження крильчатки осьового вентилятора 3D моделюванням [Текст] / Л. С. Олійніченко, Г. Б. Філімоніхін // Східно-Європейський журнал передових технологій. – 2014. – Т. 6, № 7(72). – С. 12–17. doi: 10.15587/1729-4061.2014.30498
14. Брусиловский, И. В. Аэродинамика осевых вентиляторов [Текст] / И. В. Брусиловский – М.: Машиностроение, 1984. – 240 с.
15. Александров, В. Л. Воздушные винты [Текст] / В. Л. Александров – М.: Оборонгиз, 1951. – 493 с.
16. Дьяченко, А. Ю. Анализ методов аэродинамического расчета несущего винта вертолета [Текст] / А. Ю. Дьяченко, В. С. Кривцов, А. М. Тимченко // Авиационно-космическая техника и технология. – 2014. – Вип. № 4 (111). – С. 22–33.
17. Загордан, А. М. Элементарная теория вертолета [Текст] / А. М. Загордан. – М.: Воениздат, 1955. – 216 с.