

13. *Оценка имущества и имущественных прав в Украине* (под ред. Н. Лебедь) – К.: ООО Информационно-издательская фирма "Принт-Экспресс", 2002. – 688 с.
14. *Оценка интеллектуальной собственности*. – М.: Финансы и статистика, 2003. – 351 с.
15. *Системные исследования*. Ежегодник. – М.: Наука. а) 1969, б) 1971, в) 1977, г) 1980.
16. *Системный анализ*. – К.: Вища школа, 1993. – 303 с.
17. *Ситник В.Ф., Гордієнко Ш.В.* Системи підтримки прийняття рішень. – К.: КНЕУ, 2004. – 428 с. Техніка, 1995. – 162 с.
18. *Советов Б.Я., Яковлев С.А.* Моделирование систем. – М.: Высшая школа, 1985. – 271 с.
19. *Столл Р.* Множества. Логика. Аксиоматические теории. – М.: Просвещение, 1968. – 230 с.
20. *Тамбовцев В.П.* Проблемы формирования целей в экономической системе. Автореферат на соиск. уч. степени канд. экон. наук. – М.: МГУ, 1972. – 25 с.
21. *Теория прогнозирования и принятия решений*. – М.: Высшая школа, 1977. – 35 с.
22. *Теория выбора и принятия решений*. – М.: Наука, 1981. – 256 с.
23. *Теория систем*. Математические методы и моделирование. М.: Мир, 1989. – 382 с.
24. *Формальная логика*. – Л.: ЛГУ, 1977. – 357 с.
25. *Эддоус М., Стэнфильд Р.* Методы принятия решений. М.: ЮНИТИ, 1997. – 390 с.

УДК 621.4.002.2 : 629.73.002.72

Кондратюк Э.В.¹, Титов В.А.², Филимоныхин Г.Б.³

¹ГП ЗМБК "Прогресс" им. А.Г. Ивченко. Украина, г. Запорожье.

²Украинский НИИ авиационной технологии. Украина, г. Киев.

³Кировоградский национальный технический университет. Украина, г. Кировоград

СБОРКА РОТОРА БАРАБАННО-ДИСКОВОЙ КОНСТРУКЦИИ МЕТОДОМ ДВУХ ПРОБНЫХ СБОРОК

Анотація

Розроблена теорія нового методу складання ротора. Метод передбачає визначення оптимальних кутів повороту ланок в роторному пакеті за результатами пробних зборок.

Abstract

The theory of a new method of assembly of a rotor is developed. The method provides definition of optimum angles of turn of parts in rotary package by results of trial assemblies.

Введение. В основе процесса сборки роторов компрессоров газотурбинных двигателей лежат предположения об жесткости стыкуемых звеньев (дисков, проставок, валов и т.д.), идеальной округлости боковых и идеальной плоскостности торцевых стыкуемых поверхностей [1-6]. При таких предположениях при стыковке двух звеньев 1 и 2 образуется кинематическая пара пятого класса типа цилиндрический шарнир, если рассматривать угол поворота звена 2 относительно звена 1 как степень свободы. Оптимизация при сборке таких роторов заключается в том, чтобы по характеристикам пары определить такой угол поворота звена 2 относительно звена 1, при котором неточности изготовления звеньев 1 и 2 будут максимально компенсировать друг друга [5, 6].

Повышение требований к точности сборки роторов ГТД привело к тому, что допуски на радиальные и торцевые биения контрольных поверхностей стали величинами одного порядка с неточностями изготовления стыкуемых поверхностей звеньев, их

деформациями при стыковке. С другой стороны, появились роторы, в которых стыковка звеньев производится по двум и более посадочным местам. Это создает трудности при определении характеристик пары, образуемой соединением двух звеньев, если использовать традиционный метод замера биений посадочных мест отдельных деталей [5, 6]. Частично эти трудности были преодолены в работе [7], в которой предложена новая технология сборки нежестких многоступенчатых роторов компрессоров ГТД, использующая дополнительные замеры геометрических характеристик звеньев. Первым недостатком этой технологии является большое число дополнительных замеров, что существенно замедляет процесс сборки ротора. Вторым недостатком состоит в значительной погрешности определения характеристик пары по результатам замера. Это связано с погрешностями измерений, их дискретностью, наличием приближенных вычислений, не учетом ряда факторов, характеризующих неточность изготовления посадочных мест звеньев, и т.д. Поэтому, в настоящей работе разрабатывается альтернативный метод определения характеристик пар и сборки ротора, основанный на эмпирическом подходе. При этом предполагается, что при стыковке двух звеньев по-прежнему (на практике – с некоторой погрешностью) образуется кинематическая пара 5-го класса, типа цилиндрический шарнир. Предлагаемый метод основан на двух пробных соединениях звеньев, или на двух пробных сборках ротора.

1. Характеристики ротора и задача его сборки. Составной ротор барабанно-дисковой конструкции состоит из N звеньев, соединенных последовательно.

Положение базовой оси k -го звена задают характерные точки A_k, B_k . Через эти точки проходят поперечные сечения звеньев, которыми стыкуются два соседних звена. Угол поворота звена k относительно земли будем называть абсолютным углом поворота и обозначим через ψ_k . Угол поворота звена k относительно звена $(k-1)$ будем называть относительным углом поворота и обозначим через φ_k . Первое звено устанавливается консольно в подшипники с поворотом $\psi_k = \varphi_k$ относительно нулевой метки на внутренних кольцах подшипников. Для звена k :

$$\psi_k = \sum_{j=1}^k \varphi_j, \quad (k = 1, \dots, N). \quad (1)$$

Обозначим через: h_k – длину звена k ; l_k – расстояние от левого сечения до центра масс звена k ; H_k – расстояние от левого сечения до конца звена k . Тогда:

$$H_k = \sum_{j=1}^k h_j. \quad (2)$$

В идеальном случае характерные точки (базовые оси) каждого звена должны лежать на базовой оси ротора. Из-за неточности сборки ротора эти точки будут находиться на некоторых расстояниях от базовой оси ротора.

Введем систему координат, жестко связанную с ротором, в которой ось z направлена по базовой оси ротора (по оси вращения ротора), ось x – в сторону нулевой метки, предназначенной для определения абсолютного угла поворота звеньев, ось y направлена так, что система осей – правая. Оси начинаются в крайнем сечении ротора – сечении A_1 . Введем в рассмотрение комплексные числа

$$\omega = x + iy. \quad (3)$$

Будем обозначать положения характерных точек ротора после сборки как A_k, B_k . Им будут соответствовать комплексные числа, характеризующие смещения точек относительно оси ротора, которые будем обозначать так же.

В теории роторов барабанно-дисковой конструкции принято считать, что при стыковке двух звеньев

образуется кинематическая пара V -класса типа цилиндрический шарнир. При этом звено k условно поворачивается относительно звена $(k-1)$ на угол φ_k вокруг оси, которая жестко связана со звеном $(k-1)$.

За функционал критерия качества сборки ротора примем алгебраическую сумму локальных статических дисбалансов, создаваемых звеньями ротора [4]:

$$Q_D = \sum_{j=1}^N |D_j|, \quad (4)$$

где $|D_j|$ – модуль статического дисбаланса, создаваемого звеном j . В соответствии с моделью ротора вектор этого дисбаланса определяется по формуле

$$D_k = m_k e_k(\varphi_1, \dots, \varphi_k) + D_{0k}, \quad (5)$$

где m_k – масса звена k , $e_k(\varphi_1, \dots, \varphi_k)$ – его эксцентриситет, D_{0k} – собственный дисбаланс.

Если функционал (5) построен, то математически задача оптимальной сборки ротора состоит в определении таких углов поворота звеньев $\varphi_1, \dots, \varphi_n$, при которых функционал качества примет наименьшее значение. Обычно при этом налагаются и дополнительные ограничения, например, на эксцентриситеты и перекосы рабочих колес или других звеньев ротора. Поскольку такая задача тем или иным методом решена [4-5], то ниже решается задача определения характеристик пар, образуемых стыковкой звеньев, и построения по этим характеристикам функционала качества (4).

2. Характеристики движения звена k относительно звена $(k-1)$. Совместим базовую ось звена $(k-1)$ с осью ротора z (рис. 2). При этом расположим звено $(k-1)$ в исходном положении, то есть его абсолютный угол поворота $\psi_{k-1} = 0$.

Будем обозначать относительные положения характерных точек звена в исходном положении величинами со штрихами: A'_k, B'_{k-1} . Относительно звена $(k-1)$ следующее звено k повернуто на угол φ_k . Будем обозначать характерные точки звена k величинами с двумя штрихами, зависящими от: $A''_k(\varphi_k), B''_k(\varphi_k)$.

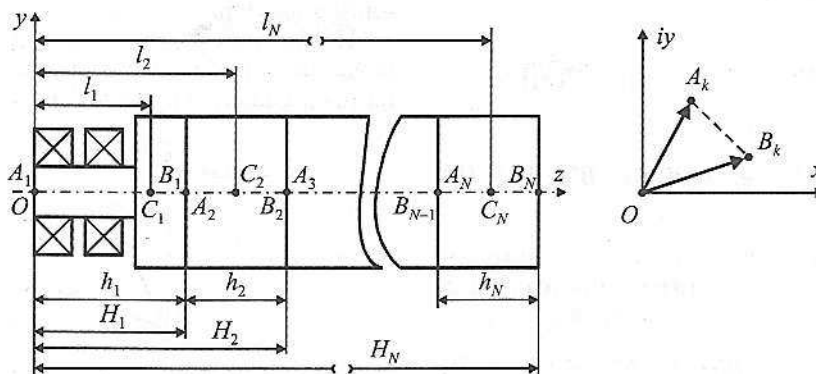


Рис. 1. Составной ротор барабанно-дисковой конструкции.

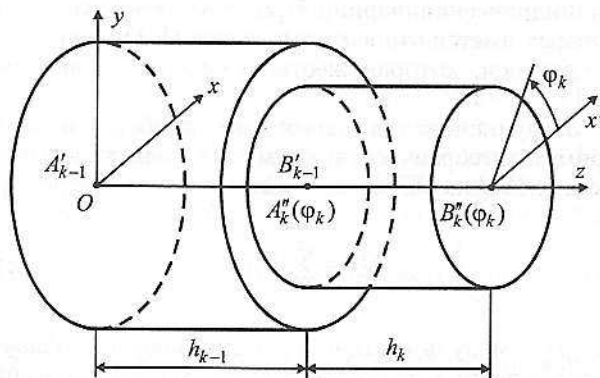


Рис. 2. К изучению характеристик движения звена k относительно звена $(k-1)$.

Из-за неточности изготовления звеньев эти точки будут находиться на некоторых расстояниях от оси ротора (рис. 3, а). Отрезок $[A''_k(\varphi_k), B''_k(\varphi_k)]$ в плоскости Oxy изображает ось звена k .

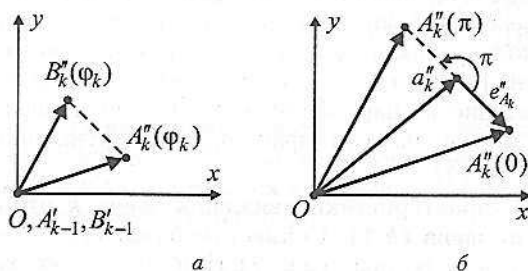


Рис. 3. Характеристики движения звена k относительно звена $(k-1)$

Точкам $A''_k(\varphi_k), B''_k(\varphi_k)$ соответствуют комплексные числа, характеризующие смещения точек относительно базовой линии звена $(k-1)$.

При относительном вращении звена k его характерные точки вращаются вокруг некоторых центров, как это показано на рис. 3, б. Из рисунка находим следующие характеристики движений характерных точек A''_k, B''_k :

$$a''_k = [A''_k(0) + A''_k(\pi)] / 2, \quad e''_{A_k} = [A''_k(0) - A''_k(\pi)] / 2,$$

$$b''_k = [B''_k(0) + B''_k(\pi)] / 2, \quad e''_{B_k} = [B''_k(0) - B''_k(\pi)] / 2. \quad (6)$$

С учетом свойств комплексных чисел находим закон движения характерных точек, определяющих движение звена k относительно звена $(k-1)$:

$$A''_k(\varphi_k) = a''_k + e''_{A_k} e^{i\varphi_k}, \quad B''_k(\varphi_k) = b''_k + e''_{B_k} e^{i\varphi_k}. \quad (7)$$

Этот закон относительного движения будем называть характеристикой рассматриваемой пары.

Заметим, что при определении движения звена k относительно звена $(k-1)$ наиболее удобно повернуть звено k на углы 0° и 180° . Эти углы удобны и при вычислении абсолютных углов поворотов звеньев: каждое звено в итоге будет либо не повернутым, либо повернутым на 180° .

3. Построение функционала качества сборки ротора по характеристикам пар. Отклонение продольной оси ротора от базовой оси, вызванное неточной установкой звена k относительно звена $(k-1)$, без учета абсолютного угла поворота ψ_{k-1} звена $(k-1)$ вычисляется по формуле:

$$e''_k(u, \varphi_k) = A''_k(\varphi_k) + \frac{(u - H_{k-1})}{h_k} [B''_k(\varphi_k) - A''_k(\varphi_k)], \quad u \geq H_{k-1}. \quad (8)$$

Это же отклонение, но с учетом абсолютного угла поворота звена $(k-1)$, вычисляется по формуле:

$$e_k(u, \psi_{k-1}, \varphi_k) = e''_k(u, \varphi_k) e^{i\psi_{k-1}}, \quad u \geq H_{k-1}. \quad (9)$$

Перемещения $e_k(u, \psi_{k-1}, \varphi_k)$ являются элементарными перемещениями. По принципу линейности элементарных перемещений суммарное перемещение произвольной точки на оси ротора, вызванное несколькими элементарными перемещениями, не зависит от порядка совершения перемещений и равно векторной сумме элементарных перемещений [8]. В соответствии с принципом эксцентриситет звена k определяется по формуле:

$$e_k(\varphi_1, \dots, \varphi_k) = \sum_{j=1}^k e_j(l_k - H_j, \psi_{j-1}, \varphi_j). \quad (10)$$

Функционал качества имеет вид (4), и строится с использованием эксцентриситетов (10).

4. Определение характеристик пар по абсолютным отклонениям характерных точек ротора. Пусть ротор был собран два раза. Первый раз – его звенья не повернуты ($\psi_j = \varphi_j = 0$), а второй раз – нечетные звенья повернуты на 180° . Считаем, что для двух сборок роторов измерены непосредственно (или найдены по результатам других измерений) абсолютные отклонения характерных точек звеньев от базовой оси ротора. Определим по этим отклонениям характеристики пар.

После первой пробной сборки неточная установка звена $(k-1)$ создает следующее смещение точек на продольной оси звена k (рис. 4):

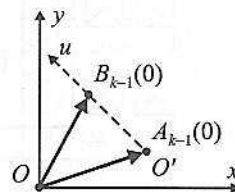


Рис. 4. К определению характеристик пары.

$$e_{k-1}(u, 0) = A_{k-1}(0) + \frac{u}{h_{k-1}} [B_{k-1}(0) - A_{k-1}(0)], \quad u \in [h_{k-1}, h_{k-1} + h_k]. \quad (11)$$

Чтобы получить относительные координаты характерных точек звена k , необходимо от их абсолютных координат отнять смещения, вызванные неточной установкой звена ($k-1$):

$$A_k''(0) = A_k(0) - e_{k-1}(h_{k-1}, 0), \quad B_k''(0) = B_k(0) - e_{k-1}(h_{k-1} + h_k, 0).$$

Отсюда, после преобразований, получаем:

$$A_k''(0) = A_k(0) - B_{k-1}(0), \quad B_k''(0) = B_k(0) + \left(\frac{h_k}{h_{k-1}} - 1\right) A_{k-1}(0) - \frac{h_k}{h_{k-1}} B_{k-1}(0). \quad (12)$$

При второй сборке четные звенья не повернуты, а нечетные – повернуты на 180° . При этом все относительные углы поворота равны. Если звено ($k-1$) четное, то: $(k-1) = 2m$, $\{m = 1, 2, \dots; 2m < N\}$,

$$A_k''(\pi) = A_k(\pi) - B_{k-1}(\pi),$$

$$B_k''(\pi) = B_k(\pi) + \left(\frac{h_k}{h_{k-1}} - 1\right) A_{k-1}(\pi) - \frac{h_k}{h_{k-1}} B_{k-1}(\pi). \quad (13)$$

Если звено ($k-1$) нечетное, то: $(k-1) = 2m - 1$, $\{m = 1, 2, \dots; 2m \leq N\}$,

$$A_k''(\pi) = -[A_k(\pi) - B_{k-1}(\pi)],$$

$$B_k''(\pi) = -\left[B_k(\pi) + \left(\frac{h_k}{h_{k-1}} - 1\right) A_{k-1}(\pi) - \frac{h_k}{h_{k-1}} B_{k-1}(\pi) \right]. \quad (14)$$

При получении формул (14) учтено, что поворот звена ($k-1$) на 180° приводит к изменению направления векторов на противоположное, и поэтому комплексные числа меняют знаки на противоположные.

Характеристики пары, образуемой соединением звена k со звеном ($k-1$) определяются по формулам (6), (7).

5. Определение абсолютного положения характерных точек звена k . Рассмотрим два возможных способа определения.

1. Определим положения характерных точек звена k по радиальным биениям двух контрольных поверхностей. На рис. 5, а показана схема расположения контрольных поверхностей и соответствующих точек P_k, Q_k , звена k , отклонения которых определяются в результате непосредственных измерений.

Ставится задача определить абсолютные отклонения характерных точек звена. На рис. 5, б показана базовая линия звена k в комплексной плоскости (x, iy). По рисунку находим уравнение этой линии:

$$e_k(u) = P_k + \frac{u'}{h_k - a_k - b_k} (Q_k - P_k), \quad u' \in [-a_k, h_k - b_k]. \quad (15)$$

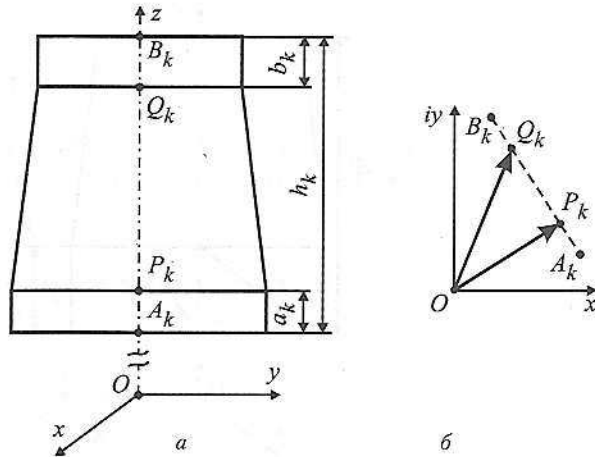


Рис. 5. Определение абсолютного положения характерных точек звена k по радиальным биениям двух контрольных поверхностей.

Тогда $A_k = e_k(-a_k)$, $B_k = e_k(h_k - b_k)$, откуда после преобразований находим:

$$A_k = \frac{P_k(h_k - b_k) - Q_k a_k}{h_k - a_k - b_k}, \quad B_k = \frac{-P_k b_k + Q_k(h_k - a_k)}{h_k - a_k - b_k}. \quad (16)$$

2. Определим абсолютные положения контрольных точек звена k по радиальному и тангенциальному биениям контрольных поверхностей. Положение k -го звена в пространстве будем определять суммой двух перемещений (рис. 6):

1) поступательного перемещения вместе с полюсом – точкой – P_k которое задается соответствующим эксцентриситетом, измеряемым по биению контрольной поверхности;

2) поворотом вокруг оси N_k , образующей с осью x' угол β_k , на угол δ_k .

На рис. 6, б, в, показаны расчетные схемы, предназначенные для определения отклонений характерных точек A_k, B_k звена k по измеренным непосредственно характеристикам биений P_k, β_k, δ_k . Для удобства все характеристики показаны положительными. По рисунку, в комплексном виде, находим:

$$A_k = P_k - |P_k A_k| \sin \beta_k + i |P_k A_k| \cos \beta_k = P_k + i |P_k A_k| e^{i\beta_k},$$

$$B_k = P_k + |P_k B_k| \sin \beta_k - i |P_k B_k| \cos \beta_k = P_k - i |P_k B_k| e^{i\beta_k}. \quad (17)$$

В силу малости угла δ_k ,

$$|P_k A_k| \approx a_k \delta_k, \quad |P_k B_k| \approx (h_k - a_k) \delta_k. \quad (18)$$

Тогда :

$$A_k = P_k + i a_k \delta_k e^{i\beta_k}, \quad B_k = P_k - i (h_k - a_k) \delta_k e^{i\beta_k}. \quad (19)$$

Можно проверить, что полученные формулы справедливы для любых P_k, β_k, δ_k , то есть для самого общего случая.

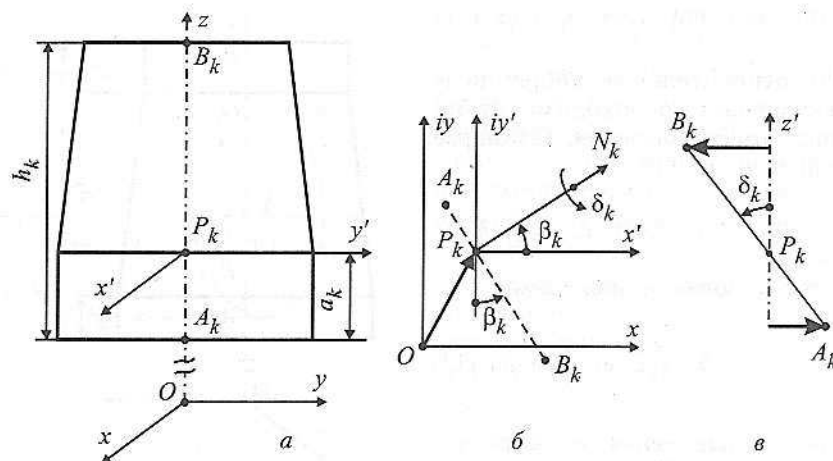


Рис. 6. Определение положения контрольных точек звена k по радиальному и тангенциальному биениям контрольных поверхностей

Заметим, что торцевые биения звеньев можно измерять и по биению кольцевой черты. Эта черта наносится тонким режущим инструментом на полированную контрольную поверхность, предназначенную для измерения радиальных биений. Биения черты можно измерять оптически – с использованием микроскопа типа "Мир".

Выводы.

1. Разработанная теория сборки ротора методом двух пробных сборок позволяет по результатам двух пробныхборок определять характеристики образующих при стыковке звеньев ротора кинематических пар. По этим характеристикам можно определить оптимальные углы поворота звеньев в роторном пакете, например, минимизацией функционала качества (4) или методом последовательной оптимизации [5,6].

2. Метод может быть применен и для двухопорного ротора. В этом случае за базовую линию ротора можно взять базовую линию первого звена. Для того, чтобы по установке ротора в опоры его уравновешенность не ухудшалась, необходимо требовать, чтобы контрольные точки последнего звена были на базовой оси первого звена.

3. Разработанный метод имеет следующие преимущества: большую точность, поскольку характеристики пар определяются непосредственно для собранного ротора; становится излишней дополнительная оснастка, необходимая для определения

биений отдельного звена (поворотные контролирующие устройства, центрирующие устройства, переходные контрольные устройства и т.п.).

Литература

1. *Гарькавый А.А.* Сборка авиационных двигателей. – М.: Машиностроение, 1981. – 223 с.
2. *Ильянков А.И., Левит М.Е.* Основы сборки авиационных двигателей. – М.: Машиностроение, 1987. – 288 с.
3. *Никитин А.Н.* Технология сборки двигателей летательных аппаратов. – М.: Машиностроение, 1982. – 269 с.
4. *Щепетильников В.А.* Основы балансировочной техники. В 2-х томах. – М.: Машиностроение, 1975. (том 1 Уравновешивание жестких роторов и механизмов) с. 528.
5. ОСТ 1.41185-72 "Ротор компрессора с дисками, имеющими торцевые зубья. Типовой технологический процесс сборки ротора".
6. ОСТ 1-76086-71 "Прибор для определения оптимального положения дисков при сборке ротора компрессора".
7. *Пейчев Г.И., Кондратюк Э.В., Сорочан В.И.* Прогрессивные технологии сборки роторов ГТД // Технологические системы. – 2003. – №1. – С. 56–60.
8. *Кильчевский Н.А.* Курс теоретической механики, т. I (кинематика, статика, динамика точки). – М.: "Наука", 1977, – 480 с.