

- Н.Э. Баумана, 2001 - 448 с.
8. Разработка методологии управления режимными параметрами и процессом изнашивания инструментов как основы повышения эффективности лезвийной обработки: дис. д-ра техн. наук. / Грубый С.В. М., 2004 - 535 с.
 9. Теория резания: учебник / Ящерицын П.И., Фельдштейн Е.Э., Корниевич М.А. Минск.: Новое знание, 2006 - 512 с.
 10. Режимы резания труднообрабатываемых материалов. Справочник / Гуревич Я.Л., Горохов М.В., Захаров В.И. и др. М.: Машиностроение, 1986 - 240 с.
 11. Макаров А.Д. Оптимизация процессов резания. М.: Машиностроение, 1976 - 278 с.

Повышение эффективности процессов сборки роторов газотурбинных двигателей на основе технологии имитационного моделирования

к.т.н. Тимофеев М. В., к.т.н. Тимофеева Е. В.
РГАТУ, Рыбинск
8(4855)22-20-91, tadiom@rsatu.ru

Аннотация. Работа направлена на совершенствование технологии сборки ротора ГТД смешанного типа, который является одной из наиболее распространённых в настоящее время конструкций.

Ключевые слова: ротор ГТД, сборка, имитационное моделирование

Для обеспечения эксплуатационных свойств роторов смешанного типа необходимо наличие силового замыкания их деталей, сопрягающихся друг с другом, которое вызывает деформации как самих деталей роторного пакета, так и их контактирующих поверхностей.

В современном авиадвигателестроении к точности сборки роторов предъявляются очень жесткие требования. Однако несмотря на то, что наиболее ответственные детали ГТД уже сейчас изготавливаются фактически с максимально достижимой в производстве точностью, при сборке даже хорошо освоенных серийных авиационных двигателей требуемая точность достигается методами неполной взаимозаменяемости, а также за счет осуществляемых вручную пригонки, попарного или индивидуального подбора деталей. При этом количество нуждающихся в доработке изделий может достигать 20...80%, что вынуждает производить многочисленные повторные сборки, подбирая опытным путём детали или производя их пригонку. Такой процесс сборки практически невозможно автоматизировать, а характеристики собранного ротора невозможно предсказать даже в том случае, если известны действительные размеры всех собираемых деталей.

Специфической особенностью роторов ГТД является то, что многие их детали (например, диски и кольца) могут устанавливаться в изделии в разных относительных положениях, равноценных с конструктивной точки зрения. Однако наличие макроотклонений на контактирующих поверхностях приводит к тому, что, изменяя угловое положение деталей друг относительно друга, можно получить варианты ротора с различными характеристиками, в том числе не удовлетворяющие заданным требованиям точности. Технологическая сборка представляет собой процесс формирования действительной сборочной оси ротора путем подбора оптимального относительного расположения его деталей. Исправить сформированную таким образом ось ротора в дальнейшем можно только путем разборки ротора и разворотом или заменой его деталей. Такой процесс чрезвычайно трудоёмок и снижает качество собираемого изделия, поскольку после осуществления разворота деталей для взаимной компенсации их погрешностей необходимо каждый раз заново обрабатывать с высокой точностью отверстия под призонные болты, соединяющие детали ротора, увеличивая их диаметр и заменяя сами болты.

Одним из крупных резервов снижения себестоимости изготовления ГТД и улучшения их эксплуатационных характеристик является организация их одноразовой бездоговодочной сборки. А одним из главных условий обеспечения одноразовой сборки является наличие адекватных математических моделей сборочного процесса. Их использование позволяет

управлять суммированием погрешностей деталей при формировании сборочной размерной цепи и таким образом создавать управляемый процесс сборки.

При выборе математической модели комплектования деталей и подбора их оптимального положения рассматривались три варианта. Все они предполагают определение взаимного положения систем координат, привязанных к центрам масс деталей. Для этого рассматривается процесс контакта каждой пары деталей по трём точкам.

В первом варианте [2] математическая модель основана на определении положения систем координат всех деталей в сборочной системе координат с помощью расчета направляющих косинусов координатной системы очередной присоединяемой детали. Для выполнения этой задачи необходимо решить систему из 12 линейных уравнений с 12 неизвестными вида:

$$\left. \begin{aligned} X_{i,i+1}^S &= l_{1,i} \cdot X_{i,i+1} + l_{2,i} \cdot Y_{i,i+1} + l_{3,i} \cdot Z_{i,i+1} + a_{i+1} \\ Y_{i,i+1}^S &= m_{1,i} \cdot X_{i,i+1} + m_{2,i} \cdot Y_{i,i+1} + m_{3,i} \cdot Z_{i,i+1} + b_{i+1} \\ Z_{i,i+1}^S &= n_{1,i} \cdot X_{i,i+1} + n_{2,i} \cdot Y_{i,i+1} + n_{3,i} \cdot Z_{i,i+1} + c_{i+1} \end{aligned} \right\}; \quad (1)$$

где: $l_1, l_2, l_3, m_1, m_2, m_3$ и n_1, n_2, n_3 – направляющие косинусы, соответственно, оси OX, OY и OZ системы координат очередной присоединяемой детали относительно сборочной системы координат; $X_{i,i+1}, Y_{i,i+1}, Z_{i,i+1}$ – координаты точек на вспомогательной базовой поверхности в системе координат i -й детали; a_i, b_i, c_i – координаты x, y, z , соответственно, начала координат i -й детали в системе координат первой детали.

Такие уравнения составляются для трёх точек контакта и четвёртой вспомогательной точки, в качестве которой можно выбрать любую из точек замера биений. Для решения этой системы можно воспользоваться одним из известных методов решения систем линейных уравнений, например, методом Гаусса или методом последовательных приближений, однако скорость расчётов данной модели на ЭВМ оказывается чрезвычайно низкой (меньше 500 вариантов в секунду на процессоре AMD-400 МГц при необходимости рассмотреть $16,8 \times 10^6$ вариантов для ротора, состоящего из 9 деталей).

Во втором варианте [1] положение системы координат очередной присоединяемой детали в сборочной системе координат определяется с помощью матрицы углов поворотов и радиус-вектора, соединяющего начало координат сборочной координатной системы с началом координат координатной системы рассматриваемой детали. Основным недостатком этой математической модели в том, что она не учитывает длину деталей в осевом направлении, что ограничивает область применения данной модели деталями, длина которых значительно меньше их диаметра. Кроме того, в отличие от первой модели, здесь не учитываются деформации, возникающие при сборке. Поэтому, хотя скорость расчёта по данной методике сравнительно высока (около 5300 вариантов в секунду), использование её нецелесообразно.

Третий вариант, предложенный авторами, основан на расчёте систем координат деталей с помощью уравнений плоскости, представляющей собой плоскость XOY системы координат очередной присоединяемой детали, и определении координат точек контакта следующей пары деталей с помощью уравнений прямых перпендикулярных плоскости и проходящих через заданные точки.

Плоскость XOY задаётся уравнением вида:

$$A \cdot x + B \cdot y + C \cdot z + D = 0; \quad (2)$$

где: коэффициенты плоскости A, B, C и D находятся через координаты точек контакта как определители матриц третьего порядка.

Чтобы найти координаты точек контакта следующей пары деталей, необходимо провести прямые перпендикулярные плоскости и проходящие через эти точки. Тогда координаты точек контакта следующей пары деталей определяются как:

$$Z_{st} = \frac{\left(D - z \cdot t \cdot \sqrt{A^2 + B^2 + C^2} + A \cdot x_v + B \cdot y_v \right) \cdot C - (A^2 + B^2) \cdot z_v}{A^2 + B^2 + C^2}; \quad (3)$$

$$X_{st} = x_o + \frac{A}{C} (z_v - z_o) \quad Y_{st} = y_o + \frac{B}{C} (z_v - z_o)$$

где: zt – сумма номинальной длины детали и биений в точке контакта; x_v, y_v, z_v – координаты вспомогательной точки, представляющей собой проекцию рассматриваемой точки контакта на плоскость XOY ; x_o, y_o – начало координат координатной системы детали в сборочной системе координат.

Эта модель также учитывает сборочные деформации. Скорость расчёта по данной методике составляет около 2300 вариантов в секунду, поэтому она была принята в качестве базовой.

Для реализации предложенной математической модели был разработан алгоритм программы расчёта нежёсткой размерной цепи ротора с учётом объёмных и контактных деформаций. Программа позволяет рассчитать все возможные варианты роторного пакета и выбрать оптимальный с наименьшим технологическим дисбалансом. Таким образом, процесс индивидуального подбора деталей, до сих пор производимый вручную, автоматизируется с помощью ЭВМ.

При виртуальной сборке ротора производится полный перебор всех имеющихся в наличии деталей каждого наименования и всех возможных вариантов их относительного расположения в изделии, что позволяет выбрать лучшие варианты ротора из всех возможных.

Основным недостатком метода полного перебора является его большая трудоёмкость. Поэтому для уменьшения затрат машинного времени процесс расчёта разделён на два этапа:

- 1) предварительный расчёт пространственного положения деталей ротора без учёта сборочных деформаций для всех возможных вариантов сборки, после которого отбрасываются «плохие» варианты (не удовлетворяющие критерию $[D]$ – критерию начального технологического дисбаланса);
- 2) уточнение пространственного положения деталей для оставшихся вариантов с учётом сборочных деформаций.

При расчёте вариантов с различным угловым положением деталей в каждом цикле расчёта последовательно поворачивается только одна деталь, а остальные считаются неподвижными. При этом пространственное положение рассчитывается только для детали, изменившей положение, и следующих за ней, а данные для оставшихся неподвижными деталей берутся из формирующейся в процессе расчётов базы данных. Это позволяет уменьшить количество вычислений в предварительном расчёте примерно в 4 раза.

Результатом расчёта является база данных с вариантами ротора, в наибольшей степени удовлетворяющими заданному критерию начального технологического дисбаланса. При сборке ротора из комплекта деталей, на основе которого производился расчёт, детали устанавливаются в положения, определённые в одном из «наилучших» вариантов.

Выводы

Для имитационного моделирования сборки ротора предложена математическая модель комплектования деталей и подбора их оптимального положения. Виртуальное моделирование позволяет подобрать наилучшее расположение деталей в роторе ГТД, тем самым обеспечивая его одноразовую беззаводочную сборку.

Литература

1. Разработка методологии комплектования деталей в роторных пакетах газотурбинных двигателей. Диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук. Ершков В.Ю.: – Рыбинск, РГАТА, 1999 – 201 с.
2. Разработка технологических основ обеспечения качества сборки высокоточных узлов газотурбинных двигателей. Непомилуев В.В.: Дисс.на соискание учёной степени док. техн. наук. – Рыбинск, 2000 – 578 с.