

УДК 004.94:629.7.002.2

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОМПЬЮТЕРНЫХ МОДЕЛЕЙ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ РАЗМЕРНЫХ ЦЕПЕЙ И МЕТОДА ВИРТУАЛЬНЫХ СБОРОК ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ МОНТАЖНЫХ ОПЕРАЦИЙ

© 2012 В. В. Сибирский, С. К. Чотчаева

Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону

Применительно к технологии монтажа силовой установки вертолета построена трехмерная связанная размерная цепь, определяющая точностные параметры сборки. Для собираемой конструкции поставлены прямая и обратная задачи размерной цепи, а также разработан численный алгоритм их решения. На основе рассмотрения трехмерной размерной цепи как «серый ящик» известной структуры с неизвестными значениями размеров составляющих звеньев построена база данных виртуальныхборок, используемая для поиска сборки – аналога и для синтеза одношаговой процедуры настройки регулируемых компенсаторов, определяющих точность взаимного положения агрегатов.

Авиастроение, точность сборки, пространственная размерная цепь, подвижные компенсаторы, синтез регулирования, база данных.

Введение

Сборка, являясь завершающим этапом изготовления изделия, определяет его качество и эксплуатационные показатели. Малая серийность изготовления изделий авиастроения не всегда позволяет использовать точную и производительную оснастку. В то же время требования к точности и качеству изготовления диктуются необходимой надежностью и тактико-техническими требованиями летательных аппаратов.

В конструкциях летательных аппаратов размеры многих узлов и деталей входят в трехмерные связанные размерные цепи (РЦ). Их выявление, анализ и расчет необходимы для достижения точности исходных – замыкающих звеньев. В процессе проектирования изделия и технологии его сборки необходимо найти зависимость замыкающего звена от составляющих звеньев, а затем по замыкающему (исходному) звену определить величины компенсирующих звеньев и требуемый диапазон их регулирования. Такая необходимость возникает при сборке и монтаже силовых установок самолетов и вертолетов. Установка двигателя производится по предварительно рассчитанным длинам стержней, после чего требуемое пространственное положение двигателя достигается регулированием длин

этих компенсирующих звеньев в несколько стадий.

В [1,2], посвященных разработке теоретических основ технологии сборки самолетов и вертолетов, рассматриваются математические модели сборочных работ.

Актуальность разработки аналитического описания пространственных связанных РЦ с использованием методов векторного анализа и компьютерного моделирования обосновывается в [3], [4], где сформулированы принципиальные проблемы научно-методического обеспечения сборочного производства.

Сравнительно небольшая серийность сборочного авиационного производства, затрудняющая накопление статистического материала, привела к созданию подхода, изложенного в работе [3], где обосновывается возможность виртуализации сборочных процессов как совокупности действий над конкретными деталями и сборочными единицами с их конкретными размерными связями. В ряде современных средств CAD проектирования (Solid Works, NX Unigraphics), задача увязки размеров элементов может быть решена для относительно простой топологии сборки при точном задании размеров всех звеньев.

В работе на примере РЦ конструкции силовой установки вертолета рассмотрена методика построения и аналитического

описания геометрии пространственных связанных РЦ.

1. Размерные связи и особенности достижения точности при монтаже силовой установки вертолета

Схема установки двигателя на главный редуктор представлена на рисунке 1.

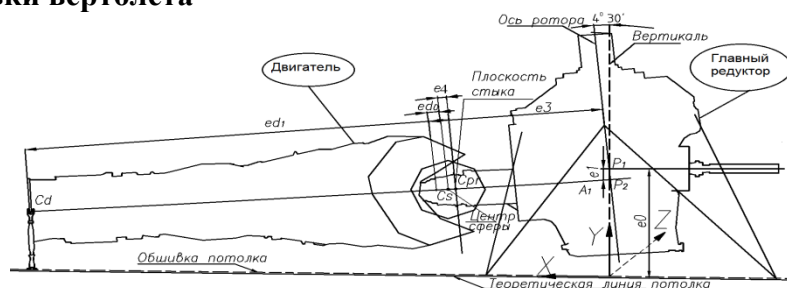


Рис. 1. Вид сбоку на схему монтажа силовой установки

Двигатель своим выходным валом входит во входной вал редуктора, и корпус двигателя опирается своей задней частью на сферическую опору редуктора. Соосность двигателя и вала редуктора косвенно определяется по параллельности плоскостей разъема двигателя и редуктора путем замера зазоров в четырех точках, симметрично расположенных на диаметре 160 мм. Допустимая техническими условиями непараллельность разъемных плоскостей составляет 0,15 мм.

Изменением длин трех из четырех подкосов (что лишает систему всех степеней свободы) производится регулировка положения оси двигателя и угла поворота α .

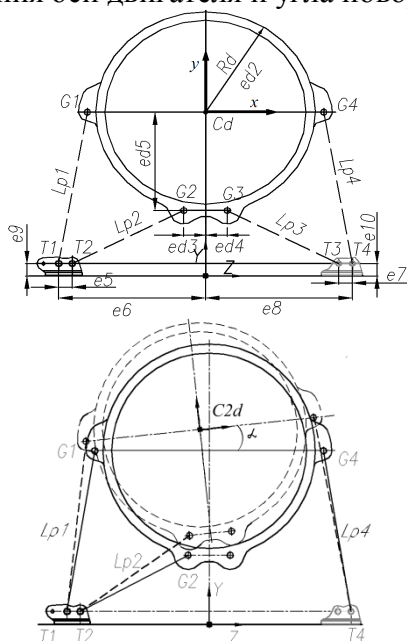


Рис. 2. Фронтальный вид на двигатель, установленный на регулируемых подкосах

Доступными для измерения являются только размеры замыкающих звеньев

(зазоры в стыке и угол α) и длины компенсирующих тяг-подкосов. Поэтому рассматриваемая размерная цепь фактически представляет собой "серый ящик", т.е. объект управления, структура которого может быть построена, но неизвестны значения внутренних параметров.

На практике процесс регулирования выполняется методом проб и ошибок. К числу недостатков этой технологии относится очень высокая трудоемкость и возможность внесения сборочных напряжений.

Для оптимизации процесса достижения точности сборки рассматриваемого узла использован подход, основанный на построении точной аналитической модели РЦ (структуры "серого ящика"), создании базы данных виртуальных сборок, где размеры внутренних звеньев варьируются случайным образом внутри известных полей допусков

Необходимым элементом предлагаемого подхода является решение прямой и обратной задач для РЦ. Прямая задача состоит в определении регулируемых длин тяг-подкосов по известным зазорам между плоскостями стыка двигателя с редуктором, углу поворота α и заданным внутри полей допусков линейным и угловым размерам составляющих звеньев. Результатом решения обратной задачи являются величины всех четырех зазоров в стыке и угла α , т.е., фактически угловая ориентация двигателя относительно главного редуктора, при задании размеров регулируемых подкосов.

2. Решение прямой задачи

Исходными данными для решения прямой задачи являются следующие линейные и угловые размеры, формируемые в результате установки главного редуктора на фюзеляж: ψ – угол наклона оси несущего винта, координаты точки $P_1 = (0 \ e_0 \ 0)^T$ и угол η – поворота редуктора вокруг оси Y (рис. 1). Далее на основе данных конструкторской документации на редуктор определяется единичный направляющий вектор \mathbf{a}_1 оси входного вала редуктора, что позволяет выразить в виде векторного уравнения прямой положение произвольной точки на оси вала редуктора, расположенной на расстоянии l_1 от точки P_2 :

$$\mathbf{r}(l_1) = P_2 + \mathbf{a}_1 \cdot l_1. \quad (1)$$

Направляющий вектор \mathbf{a}_2 оси двигателя определяется как вектор единичной нормали к привалочной плоскости двигателя по величинам измеренных зазоров. Эта процедура производится путем вычисления координат точек замера зазоров и определения коэффициентов нормального уравнения этой плоскости по четырем точкам методом наименьших квадратов.

С использованием векторного уравнения прямой (оси двигателя) в виде, аналогичном (1), определяется положение центра C_d лицевой плоскости двигателя (рис. 2) по его размерам, заданным в конструкторской документации.

Так как крепежные отверстия на двигателе закоординированы в собственной системе координат, а крепежные отверстия в кронштейнах – в системе координат, связанной с фюзеляжем, то координаты крепежных отверстий двигателя преобразуются к глобальной координатной системе с учетом угла взаимного поворота двигателя относительно собственной оси, который измеряется по рискам, нанесенным на фланце привалочной плоскости. Далее по известным координатам точек крепления подкосов на потолке и центров крепежных отверстий двигателя определяются длины всех подкосов:

$$Lp_i = |T_i - G_i|, \quad (2)$$

а угол излома осей двигателя и редуктора, равный углу между направляющими векторами \mathbf{a}_1 и \mathbf{a}_2 , вычисляется из их скалярного произведения

$$\varphi = \arccos(\mathbf{a}_1 \cdot \mathbf{a}_2).$$

3. Решение обратной задачи

Для исследования зависимости угла излома осей и угла поворота α от размеров подвижных компенсаторов была поставлена следующая задача. Известны длины трех подкосов Lp_1, Lp_2, Lp_4 , а координаты точек на фюзеляже T_1, T_2, T_4 , на двигателе G_1, G_2, G_4 и все внутренние размеры сборки заданы внутри своих полей допусков. Необходимо определить угол излома осей φ и угол поворота α .

Координаты центра переднего торца двигателя $C_{2d} = (C_{2d,z} \ C_{2d,y})^T$ и угол α входят неявно в систему трех нелинейных уравнений:

$$Lp_i^2 = (G_i - T_i)^2 \quad i = 1, 2, 4. \quad (3)$$

Для их определения формулируется оптимизационная задача с ограничениями на допустимые значения неизвестных

$$\begin{aligned} \min_{\alpha, C_{2d,z}, C_{2d,y}} \Delta(\alpha, C_{2d,z}, C_{2d,y}), \\ |\alpha| \leq \alpha_{\max}, \end{aligned} \quad (4)$$

$$\min C_{2d,z} \leq C_{2d,z} \leq \max C_{2d,z},$$

$$\min C_{2d,y} \leq C_{2d,y} \leq \max C_{2d,y},$$

где минимизируется функционал ошибок

$$\Delta(\alpha, C_{2d,z}, C_{2d,y}) = \sum_{i=1,2,4} \left[(G_{iz} \cos \alpha - G_{iy} \sin \alpha + C_{2d,z} - T_{iz})^2 + (G_{iy} \sin \alpha + G_{iz} \cos \alpha + C_{2d,y} - T_{iy})^2 - Lp_i^2 \right],$$

значение которого должно быть равно нулю. Решение оптимизационной задачи (4) выполняется численным методом Левенберга-Марквардта, который обеспечивает быструю сходимость, если кинематическая схема (рис. 2) с заданными размерами совместна.

По найденным $C_{2d,z}, C_{2d,y}, \alpha$ определяется направляющий вектор оси двигателя \mathbf{a}_2 , а направляющий вектор приемной оси редуктора и остальные параметры замыкающего звена вычисляются, как и при решении прямой задачи. Результатом решения обратной задачи являются зазоры δ_i между

привалочными плоскостями, угол излома осей φ и угол поворота α .

Для проверки создана серия виртуальных сборок, для которых решены прямая и обратная задачи. В результате исследования 50 таких виртуальных сборок было установлено, что разработанный численный метод решения прямой - обратной задач для размерной цепи обеспечивал восстановление исходных положений привалочных плоскостей с точностью не хуже 0,005 мм,

4. База данных виртуальных сборок и алгоритм оптимизации процесса достижения точности

Математическая модель размерных связей монтируемого агрегата и численные алгоритмы решения прямой и обратной задач являются составными элементами разработанного алгоритма и программного средства, ускоряющего процесс достижения точности монтажа силовой установки. Разработанный метод использовал допущение о том, что если два объекта одинаковой структуры, внутренние параметры которых неизменны в процессе управления, при подаче на их входы одинаковых управляющих векторов генерируют векторы выходных сигналов, близкие по некоторой норме, то подача на эти два объекта других, но тождественных, управляющих векторов приведет к близкой реакции. В терминах рассматриваемой размерной цепи это означало следующее. Если при некоторых значениях длин регулируемых подкосов Lp^*_1, Lp^*_2, Lp^*_4 сборка I с неизвестными внутренними размерами обеспечивает углы излома и поворота $\varphi^{*I}, \alpha^{*I}$, а сборка II также с неизвестными внутренними размерами обеспечивает близкие углы излома и поворота $\varphi^{*II} \approx \varphi^{*I}, \alpha^{*II} \approx \alpha^{*I}$, то при установке подкосов с длинами $Lp^{+1}, Lp^{+2}, Lp^{+4}$ замыкающие звенья для обеих сборок также будут почти равными $\varphi^{+II} \approx \varphi^{+I}, \alpha^{+II} \approx \alpha^{+I}$.

Для реализации предложенного метода были определены номинальные длины регулируемых подкосов: $\mathcal{E}p_1 = \mathcal{E}p_4 =$

312 мм, $\mathcal{E}p_2 = 231$ мм. Далее были созданы 500 виртуальных сборок с номинальными размерами подкосов и внутренними размерами, генерируемыми случайным образом внутри заданных полей допусков. Для каждой из этих виртуальных сборок вначале решалась обратная задача, результатом которой было определение всех четырех зазоров между привалочными плоскостями двигателя и главного редуктора, а также угол поворота двигателя α . Затем для каждой из этих пятисот сборок решалась прямая задача, по результатам решения которой определялись длины подкосов, обеспечивающие обнуление углов φ и α , т.е. достижение требуемой точности с некоторым запасом.

Результатом описанного этапа работы стало создание базы виртуальных сборок с большим набором внутренних размеров. Каждая запись этой базы данных, соответствующая одной виртуальной сборке, содержала информацию о векторе разности $\Delta \mathbf{a} = \mathbf{a}_1 - \mathbf{a}_2$ между направляющими векторами осей двигателя \mathbf{a}_1 и главного редуктора \mathbf{a}_2 . Данные о внутренних размерах виртуальных сборок в базе данных не сохранялись, что соответствовало введенному выше допущению о близости значений параметров структуры двух объектов.

Созданная база данных использовалась как средство поиска сборки-аналога для достижения точности монтажа конкретных агрегатов. Критерием того, что аналогом конкретной сборки S_k является виртуальная сборка S_v из базы данных, был минимум Эвклидовой нормы разности

$$\min_v Q = \sqrt{|\Delta \mathbf{a}_k - \Delta \mathbf{a}_v|^2 + (\alpha_k - \alpha_v)^2}, \quad (5)$$

где величины с индексом k относятся к конкретной монтируемой сборке, а величины с индексом v – к виртуальной сборке из базы данных. После нахождения сборки – аналога для достижения точности конкретной сборки использовались рекомендованные для аналога размеры компенсаторов. Некоторые результаты работы алгоритма достижения точности на основе поиска аналога в базе данных приведены на рисунках 3-5. Представленные результаты получены в

результате применения разработанной методики в технологии монтажа силовой установки двух вертолетов (4 зачерненные точки на диаграммах) и 50 компьютерных симуляций.

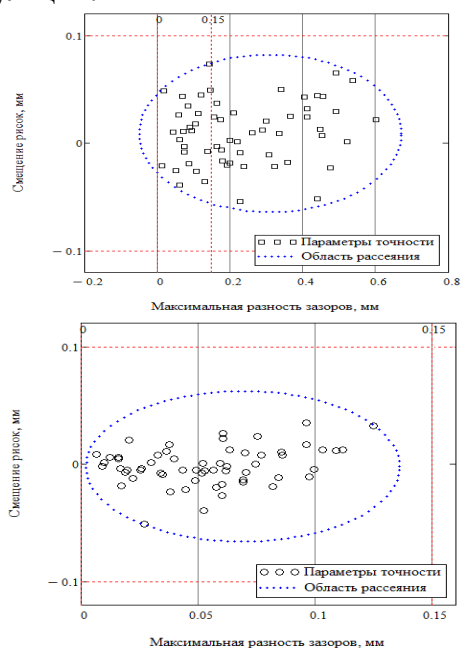


Рис. 3. Точечные диаграммы рассеяния исходных показателей точности сборок (слева) и сборок с размерами компенсаторов, выбранных из базы данных для сборки – аналога (справа)

На точечных диаграммах хорошо видно сужение поля рассеяния угла излома (регистрируемое по максимальной разности зазоров между привалочными плоскостями) с 0,7 мм до 0,13 мм, а также сужение диапазона рассеяния углов поворота с 0,17 мм до 0,11 мм. Показатели точности всех сборок, подвергнутых однократному регулированию согласно предложенной методике, уложились в допуск, требуемый техническими условиями.

Гистограммы распределения исходных показателей точности сборок и показателей, достигнутых после однократного регулирования, представленные на рис. 4,5, демонстрируют высокую чувствительность угла излома осей к регулированию длин компенсирующих звеньев, тогда как влияние регулирования на угол поворота двигателя выражено относительно слабо. Это обстоятельство, обусловленное геометрией исследованной размерной цепи, подтверждает актуальность разработки и использования в практике сборки сложных машин математических моделей пространственных РЦ.

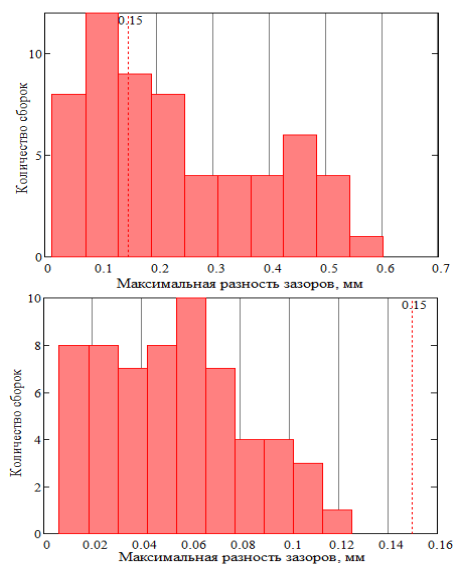


Рис. 4. Изменение показателя точности угла излома осей двигателя и главного редуктора – максимальной разности зазоров после однократного применения алгоритма синтеза регулирования длин компенсаторов на основе сборки – аналога (Вертикальные пунктирные линии обозначают границу поля допуска)

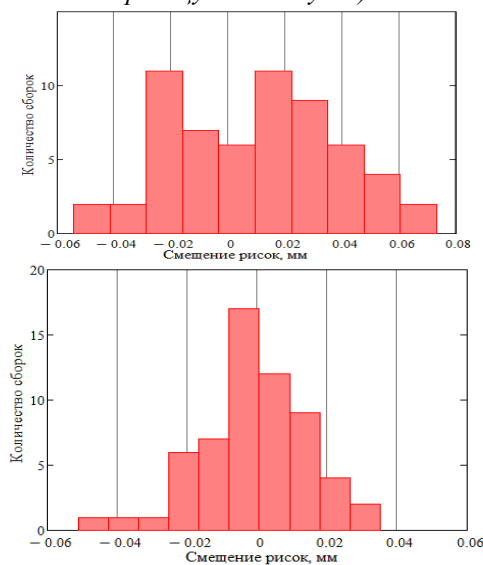


Рис. 5. Изменение показателя точности угла поворота оси двигателя – смещения контрольных риска после однократного применения алгоритма синтеза регулирования длин компенсаторов на основе сборки – аналога

Представленные результаты позволяют дать предварительную оценку эффективности применения разработанного метода в технологии монтажа агрегатов, точность которых достигается замыканием многозвенных пространственных связанных РЦ. Из рисунка 4 следует, что даже при выдерживании размеров на все составляющие звенья в очень жестких допусках, что достигается применением самого современного

металлообрабатывающего оборудования и координированием базовых отверстий на фюзеляже с помощью лазерных оптических устройств, только менее 40% собираемых агрегатов удовлетворяет требованиям точности без дополнительного регулирования. За счет применения разработанного метода количество регулировок удастся сократить с 7-15 до одной, которая выполняется по результатам однократного замера зазоров и одного обращения к базе данных, установленной на простейшем портативном компьютере. Кроме снижения трудоемкости не менее чем в пять раз и гарантированного достижения точности, предложенная методика позволяет исключить дополнительные монтажные напряжения, крайне нежелательные для высоконагруженных авиационных конструкций.

Заключение

1. На основе математической модели связанной трехмерной размерной цепи монтажа силовой установки вертолета разработан метод повышения производительности и точности технологии монтажа, использующий поиск и заимствование данных сборки – аналога в базе данных виртуальных компьютерных сборок, построенной путем генерации значений всех элементов размерной цепи внутри заданных полей допусков.

2. Для сформулированных прямой и обратной задач рассмотренной пространственной связанной РЦ силовой установки разработаны и реализованы в виде алгоритмов и компьютерной программы методы решения, использующие в качестве исходных данных заимствованные из КД внутренние размеры собираемого агрегата результаты замеров замыкающих звеньев (прямая задача) и подвижных компенсаторов (обратная задача).

3. С использованием построенной математической модели связанной пространственной РЦ выполнен размерный анализ агрегатов, позволивший связать показатели точности сборки с размерами трех подвижных компенсаторов – регулируемых подкосов, уточнить их

номинальные размеры и диапазоны регулирования.

4. Натурными и численными экспериментами подтверждена эффективность формирования закона регулирования подвижных компенсаторов на основе поиска сборки – аналога и рассмотрения размерной цепи как «серого ящика».

5. Разработанная методика позволяет сократить количество регулировок с 7-15 до одной, выполняемой по результатам однократного замера зазоров и одного обращения к базе данных, установленной на портативном компьютере, и тем самым повысить производительность трудоемких монтажных операций, точность, и, в конечном итоге, надежность высокотехнологичных изделий авиастроения.

Библиографический список:

1. Павлов, В.А. Технология сборки самолетов и вертолетов [Текст] / В.А. Павлов // Учебник. В 2 т. Теоретические основы сборки. Том 1. М.: Изд-во МАИ, 1993 г. – 288 с.

2. Павлов, В.А. Технология сборки самолетов [Текст] / В.А. Павлов, В.И. Ершов // Учебник для студентов авиационных специальностей вузов. М.: Машиностроение, 1986. - 456 с.

3. Безъязычный, В.Ф. Некоторые проблемы современного сборочного производства и перспективы их преодоления [Текст] / В.Ф. Безъязычный, В.В. Непомилуева // I международная научно-техническая конференция «Совершенствование существующих и создание новых технологий в машиностроении и авиастроении»: Сборник трудов (1-3 июня 2009 года). – Ростов-на-Дону: Изд-во ЮНЦ РАН, 2009.

4. Исаев, С.В. Методика оценки линейной модели пространственной РЦ для обеспечения взаимозаменяемости объектов производства при сборке [Текст] / С.В. Исаев // Автореферат диссертации. МГТУ им. Н.Э. Баумана, М. 2007 г.

**USING COMPUTER MODELS SPATIAL DIMENSION CHAINS AND DATABASE OF
VIRTUAL ASSEMBLIES FOR IMPROVEMENT OF ASSEMBLY OPERATIONS
PERFORMANCE**

© 2012 V. V. Sibirsky, S. K. Chotchaeva

Don State Technical University, Rostov-on-Don

The coupled three dimensional chains defining the precision parameters of assembly was built for the mounting of power plant on the helicopter's airframe. For the assembled structure the dimensional forward and inverse problems were stated and numerical algorithm of its resolving was developed. Considering as the "grey box" the 3D dimensional chain with known architecture but unknown sizes of each parts we created the database of the virtual assemblies which was used to find the assembly – analog, and further to the synthesis of one step setting of the moving compensators at mounting of the real world aggregate.

Aircraft construction, the accuracy of the Assembly; spatial dimensional chain, mobile expansion joints; synthesis of regulation; the database.

Информация об авторах

Сибирский Владимир Викторович, кандидат технических наук, доцент кафедры «Авиастроение», Донской государственной технической университет. Область научных интересов: авиастроение, машиностроение, сборка, размерные цепи, вертолеты.

Чотчаева Самира Камаловна, ассистент кафедры «Авиастроение», Донской государственной технической университет. E-mail: semo_s@mail.ru. Область научных интересов: авиастроение, машиностроение, сборка, размерные цепи, вертолеты.

Sibirsky Vladimir Viktorovich, Ph.D., Associate Professor of department "Aircraft", Don State Technical University. Area of research: aviation, engineering, assembly, dimension chain, helicopters.

Chotchaeva Samira Kamalovna, Postgraduate student, Don State Technical University. E-mail: semo_s@mail.ru. Area of research: aviation, engineering, assembly, dimension chain, helicopters.