

Реинжиниринг процесса нивелировки. Третья фаза

И.А. Федоров

Публикация посвящена анализу и перепроектированию процесса нивелировки, как процесса контроля взаимного расположения частей и агрегатов ЛА. Анализ и совершенствование осуществляется с использованием методики “Реинжиниринга бизнес-процессов”, реализующей, так называемый, “процессный подход” - один из восьми провозглашенных в международных стандартах ИСО 9000 двухтысячного года принципов менеджмента качества продукции. Публикация является продолжением статей Федорова И.А. о реинжиниринге процесса нивелировки. В публикации подробно рассмотрена третья фаза реинжиниринга - “фаза совершенствования процесса”. Описана математическая модель процесса и схема имитационного эксперимента, описано приложение, реализующее эксперимент в контуре системы “MicroStation”, предложена информационная поддержка проектирования и реализации технологического процесса нивелировки ЛА.

Введение

Данная публикация является продолжением статей Федорова И.А. “Реинжиниринг процесса нивелировки. Первый этап” и “Реинжиниринг процесса нивелировки. Второй этап”.

В первой статье рассматриваются следующие вопросы:

- актуальность проведения анализа и совершенствования процесса нивелировки, как процесса контроля взаимного расположения частей и агрегатов ЛА;
- описывается методика проведения исследования процесса - методика “реинжиниринга бизнес-процессов”;
- определяются направления совершенствования процесса, а также цели и задачи реинжиниринга.

Во второй статье описана вторая фаза реинжиниринга процесса - “фаза понимания процесса”, в рамках которой было проделано следующее:

- проведен инжиниринг процесса на основе анализа существующих методов и средств обеспечения технологического процесса нивелировки;
- выявлены причины возникновения погрешности обеспечения и определения нивелировочных параметров ЛА;
- изучены особенности размерных связей процесса нивелировки и обоснован метод их исследования.

В данной рукописи описываются третья фаза реинжиниринга процесса нивелировки - “фаза совершенствования процесса”. Здесь рассматриваются следующие вопросы:

- построение математической модели размерных связей процесса нивелировки;
- определение этапов имитационного эксперимента;
- проектирование приложения, реализующего имитационный эксперимент в контуре CAD/CAM системы “MicroStation”;
- разработка информационной поддержки проектирования и реализации технологического процесса нивелировки ЛА.

1. Построение математической модели процесса

При рассмотрении процесса ТС нивелировки в контексте результатов анализа требований потребителей к современным ЛА можно утверждать, что целью контроля действительного взаимного расположения агрегатов является определение действительных аэродинамических характеристик всего ЛА. Таким образом, процесс ТС нивелировки можно представить как совокупность деятельности исполнителей с вовлечением необходимого технологического оснащения по получению информации о действительных аэродинамических характеристиках ЛА посредством получения информации о действительных макрогеометрических параметрах ЛА.

Макрогеометрические параметры (макрогеометрия) - это параметры геометрического состояния ЛА. Они характеризуют форму и геометрические размеры поверхностей ЛА. Вместе с микрогеометрическими параметрами (микрогеометрия - шероховатость) макрогеометрические параметры определяют аэродинамические характеристики ЛА. В результате реализации процесса (на его выходе) множество контролируемых макрогеометрических параметров должно быть достаточным для определения с заданной точностью и достоверностью действительных аэродинамических характеристик ЛА.

Геометрическое состояние ЛА есть информация *о положении каждой точки одного агрегата относительно любой точки другого агрегата*. Очевидно, что информация о действительном геометрическом состоянии ЛА достаточна для нахождения действительных аэродинамических характеристик ЛА. Если с каждым агрегатом связана своя базовая система координат, то информация о геометрическом состоянии ЛА складывается из информации о положении всех точек на агрегате в его БСК и информации о взаимном расположении БСК агрегатов.

Для определения необходимого множества параметров, составляющих информацию о геометрическом состоянии ЛА, и работ ТС нивелировки по их нахождению следует рассмотреть два случая.

Первый случай (“идеальные агрегаты”) - геометрические параметры каждого из агрегатов ЛА в отдельности полностью идентичны проектным. Это значит, что у каждого агрегата достоверно известна информация о положении всех принадлежащих ему точек в его БСК.

В этом случае, для нахождения действительного геометрического состояния ЛА необходимо и достаточно определить взаимное расположение базовых систем координат агрегатов. Отклонение взаимного расположения БСК агрегатов обусловлено погрешностью стыковки агрегатов.

Если базовые системы координат прямоугольные (а это так по их определению), то параметры, подлежащие определению и составляющие информацию о геометрическом состоянии, следующие:

- расстояние между началами координат БСК агрегатов;
- угол между соответствующими нивелировочными плоскостями БСК агрегатов.

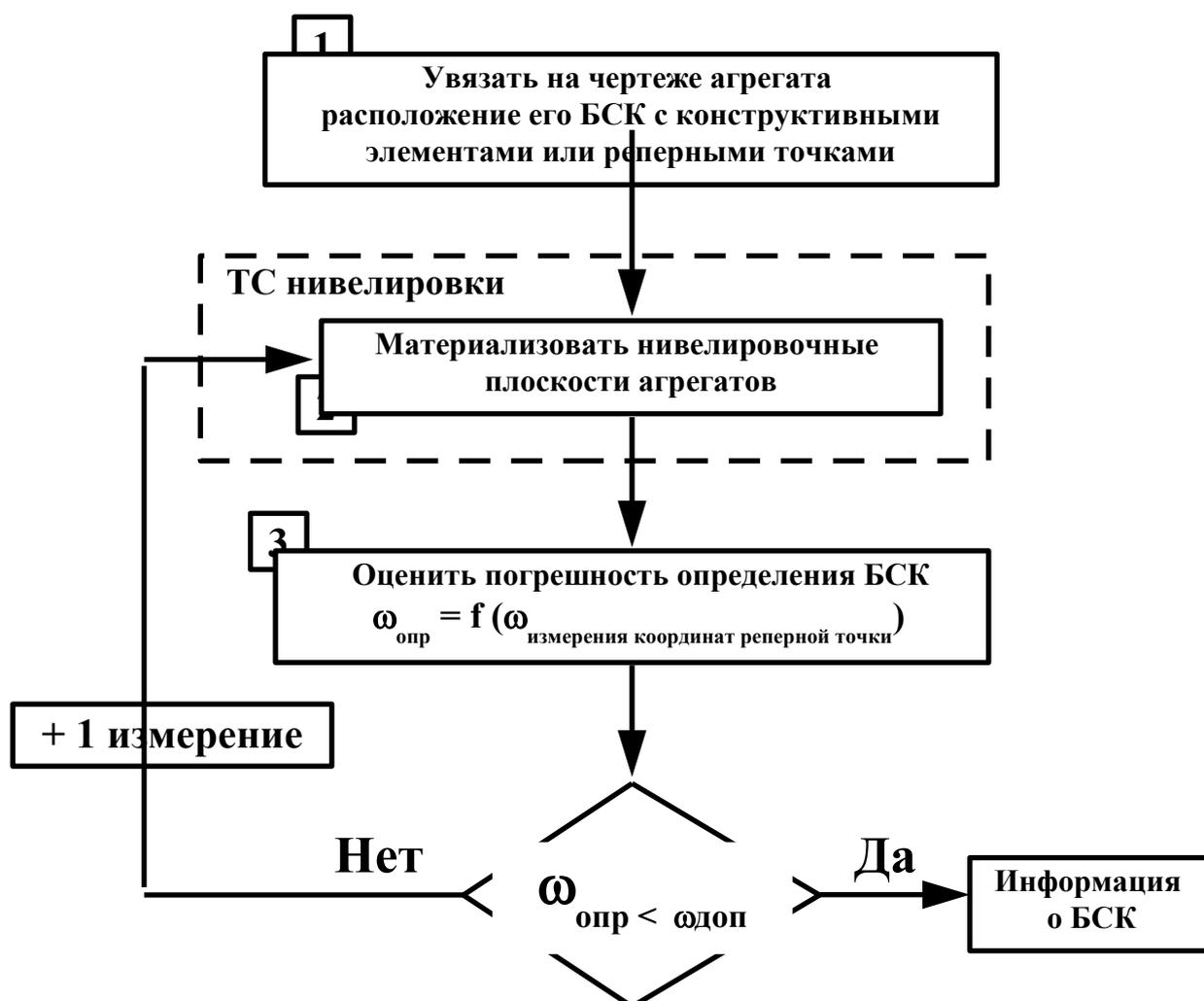


Рис. 1. Алгоритм деятельности по определению действительного геометрического состояния ЛА в случае идеальных агрегатов.

Пусть допустимая погрешность определения взаимного расположения нивелировочных плоскостей БСК равна $\omega_{\text{доп}}$. На рис. 1 представлена совокупность работ по определению действительного геометрического состояния ЛА.

Сначала необходимо увязать расположение БСК агрегата с его конструктивными элементами

или реперными точками. Для задания положения нивелировочных плоскостей агрегата достаточно трех реперных точек, не лежащих на одной прямой. Выбор реперных точек для увязки БСК традиционен в технологии самолетостроения и обусловлен наличием необходимого для их нанесения и измерения технологического оснащения.

После изготовления и стыковки агрегатов необходимо материализовать их нивелировочные плоскости путем измерения взаимного расположения реперных точек для вычисления коэффициентов уравнений нивелировочных плоскостей.

Затем следует оценить погрешность измерения угла между нивелировочными плоскостями. Погрешность определения угла между нивелировочными плоскостями характеризуется оценкой дисперсии, вычисленной по результатам нескольких измерений координат реперных точек. Если она окажется больше допустимой, то снизить ее можно путем увеличения количества измерений координат реперных точек с последующим определением их арифметических средних. С увеличением количества измерений, как известно, снижается случайная составляющая погрешности измерения. Средние значения координат реперных точек принимаются в качестве их действительных значений.

Второй случай (“реальные агрегаты”) - геометрические параметры агрегатов не идентичны заданным в конструкторской документации. Отклонения действительных геометрических параметров агрегатов от заданных на чертеже обусловлены погрешностью изготовления агрегатов. Таким образом, у реального агрегата не известны координаты принадлежащих ему точек в его БСК. Кроме того, неизвестно и взаимное расположение самих БСК агрегатов ЛА.

При материализации (заданных ранее на чертеже) БСК их вид не будет идентичен заданному. Поскольку, например, при выполнении силового замыкания во время агрегатной сборки может произойти закрутка отдельных сечений агрегата, которая повлечет за собой искривление координатных плоскостей и осей БСК.

Чтобы материализовать БСК агрегатов в виде, эквивалентном заданному (прямоугольные декартовы системы координат), необходимо принять гипотезу о том, что двум реально изготовленным агрегатам можно подобрать идентичную по своим аэродинамическим характеристикам пару агрегатов с идеальной формой поверхности. Назовем эти агрегаты “эквивалентными”, а состояние ЛА, характеризуемое взаимным расположением эквивалентных агрегатов - “эквивалентное геометрическое состояние ЛА”.

В случае “реальных агрегатов”, найти действительное геометрическое состояние ЛА невозможно. Однако если найти взаимное расположение БСК эквивалентных агрегатов, то будет найдено эквивалентное геометрическое состояние ЛА, которое определяет аэродинамические характеристики, идентичные аэродинамическим характеристикам реальных агрегатов.

Пусть допустимая погрешность определения взаимного расположения нивелировочных плоскостей БСК эквивалентных агрегатов равна $\omega_{доп}$. На рис. 2 представлена совокупность работ по определению эквивалентного геометрического состояния ЛА.

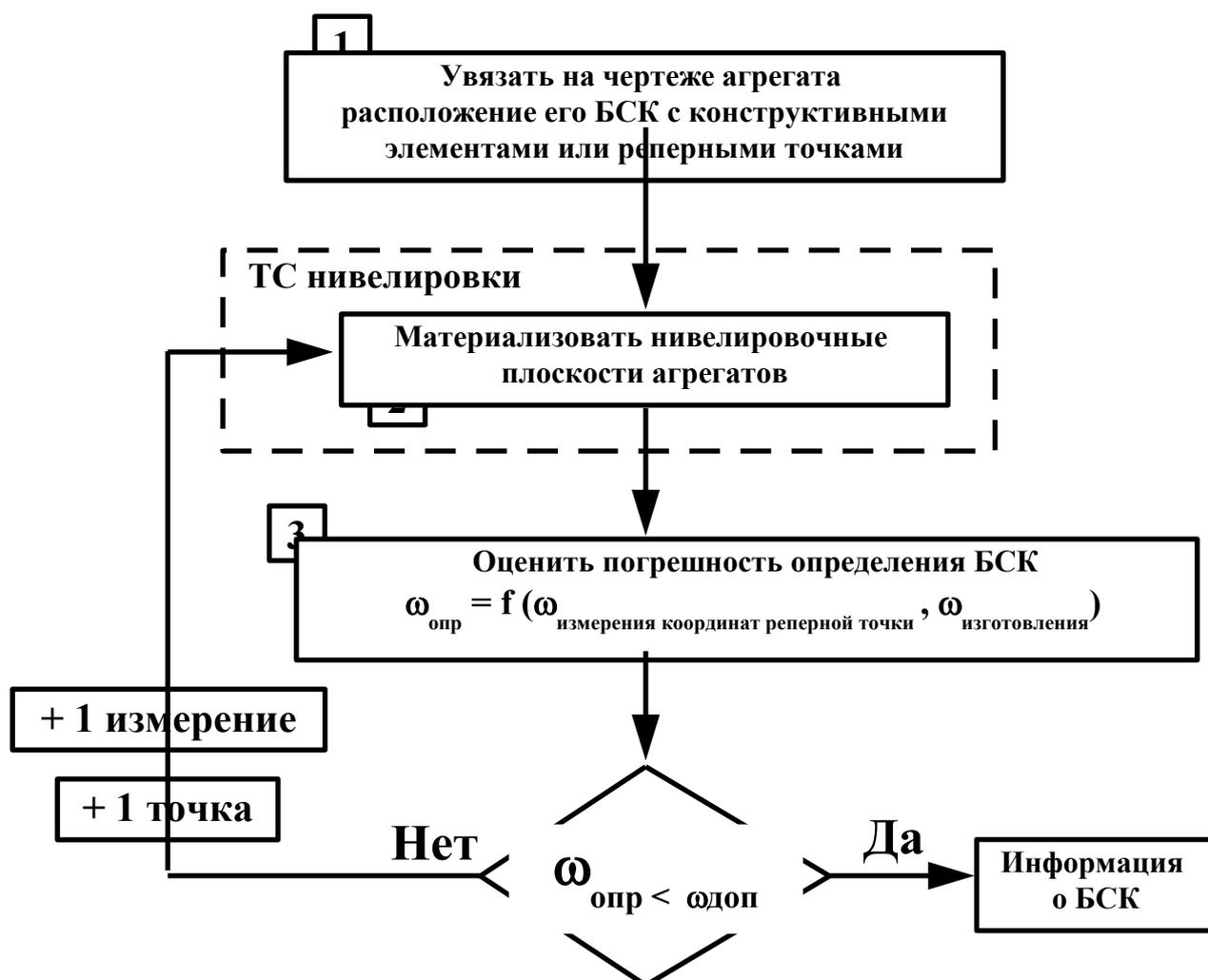


Рис. 2. Алгоритм деятельности по определению эквивалентного геометрического состояния ЛА в случае "реальных агрегатов".

Первый этап работ идентичен описанному выше первому этапу определения действительного геометрического состояния ЛА.

Если бы погрешность изготовления агрегатов $\omega_{изготовления} = 0$, то для материализации нивелировочной плоскости было бы также достаточно трех реперных точек. И между эквивалентным и реальным агрегатом можно было бы "ставить знак равенства". Но поскольку $\omega_{изготовления} \neq 0$, то при изменении взаимного расположения реперных точек в плоскости, с которой они увязаны на чертеже, положение последней при ее материализации будет изменяться. Изменение положения нивелировочной плоскости будет иметь место даже в предположении 100% точности измерения координат реперных точек. Интервал возможных положений материализованной нивелировочной

плоскости есть интервал возможных положений нивелировочной плоскости БСК эквивалентного агрегата. Этот интервал пропорционален отклонениям действительных координат реперных точек от заданных.

При построении нивелировочной плоскости через несколько (четыре и более) реперных точек по методу наименьших квадратов интервал возможных положений нивелировочной плоскости можно уменьшить путем увеличения количества реперных точек и расстояния между ними. Естественно, это верно в предположении равенства величин отклонений действительных координат реперных точек от заданных.

Таким образом, для достижения заданной точности определения эквивалентного геометрического состояния (при неизменных $\omega_{\text{измерения координат реперной точки}}$, $\omega_{\text{изготовления}}$) необходимо увеличивать как количество проводимых измерений координат реперных точек, так и само количество реперных точек.

Окончательно, информация о выходных параметрах процесса ТС нивелировки, как совокупности работ по определению эквивалентного геометрического состояния ЛА, должна включать:

- информацию о взаимном расположении начал координат БСК эквивалентных агрегатов;
- информацию о взаимном расположении нивелировочных плоскостей эквивалентных агрегатов.

Взаимное расположение нивелировочных плоскостей однозначно характеризуется углом между ними. Угол между плоскостями по определению есть угол между двумя перпендикулярами, восстановленными к прямой пересечения плоскостей в произвольной точке и лежащими в этих плоскостях.

2. Математическая модель процесса

Любая сложная система или объект в кибернетике может быть представлена функцией, рассматриваемой в некоторой области факторного пространства. Факторное пространство - это множество точек, определяющих состояние системы или объекта в зависимости от значения действующих на систему факторов (влияний). Эта функция называется функцией отклика $\eta(X_i)$, где X_i - уровень (значение) i - того фактора.

Факторы могут быть управляемыми, контролируруемыми и неконтролируемыми. С точки зрения осуществления управления системой, проведения активного эксперимента обычно выделяются и рассматриваются управляемые факторы. Влиянием контролируемых и неконтролируемых факторов либо пренебрегают, либо их влияния устраняют [1].

Реакция системы на воздействия совокупности факторов называется откликом системы и мо-

жет быть записана в виде уравнения $y_i = \eta(X_i)$, где y_i - значения откликов системы. Совокупность факторов, определяющих состояние системы, называется входом системы, а совокупность откликов, характеризующих это состояние - выходом. Процессом системы является взаимодействие между факторами и откликами системы.

Поиск функции отклика является одной из целей проведения натурального эксперимента над системой или объектом. Массив результатов натурального эксперимента служит исходной информацией для поиска математических уравнений - моделирующих операторов, связывающих уровни факторов и соответствующие им значения откликов системы. Совокупность найденных уравнений называется моделью системы. Модель системы интерпретирует в нашем сознании с некоторой точностью и достоверностью реально существующую независимо от наших знаний о ней функцию отклика системы. Если натуральный эксперимент не проводится, то эти уравнения находятся из теоретических предпосылок, закономерностей, определяющих поведение исследуемой системы.

Степень соответствия полученных закономерностей, интерпретирующих поведение функции отклика, должна быть соответствующим образом исследована. Для этого необходимо осуществить проверку адекватности построенной модели.

Выше была обоснована структура выходной информации имитационного эксперимента. Она должна содержать сведения о взаимном расположении нивелировочных плоскостей агрегатов, которое характеризуется углом между ними.

Каноническое уравнение плоскости, описывающее положение нивелировочной плоскости в декартовой системе координат XYZ:

$$ax + by + cz + 1 = 0 \tag{1}$$

Критерий, по которому находятся коэффициенты в уравнении плоскости - минимум суммы квадратов расстояний от точек до плоскости:

$$\sum_{i=1}^N \left(\frac{Ax_i + By_i + Cz_i + 1}{\sqrt{A^2 + B^2 + C^2}} \right)^2 \rightarrow \min, \text{ где } N - \text{ число реперных точек.} \tag{2}$$

Очевидно, что $\sqrt{A^2 + B^2 + C^2} \neq 0$. Подкоренное выражение не равно нулю, иначе $A=B=C=0$, что есть "вырождение" плоскости в точку.

Для нахождения коэффициентов в уравнении плоскости возьмем частные производные от S по A , B и C :

$$\frac{dS}{dA} = 0 \quad \frac{dS}{dB} = 0 \quad \frac{dS}{dC} = 0. \tag{3}$$

Опуская промежуточные преобразования получим систему уравнений:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^N (Ax_i + By_i + Cz_i + 1)x_i = \frac{A}{A^2 + B^2 + C^2} (Ax_i + By_i + Cz_i + 1)^2 \\ \sum_{i=1}^N (Ax_i + By_i + Cz_i + 1)y_i = \frac{B}{A^2 + B^2 + C^2} (Ax_i + By_i + Cz_i + 1)^2 \\ \sum_{i=1}^N (Ax_i + By_i + Cz_i + 1)z_i = \frac{C}{A^2 + B^2 + C^2} (Ax_i + By_i + Cz_i + 1)^2 \end{cases} \quad (4)$$

Раскрывая знак суммы, получим эквивалентную систему:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^N Ax_i^2 + \sum_{i=1}^N By_i x_i + \sum_{i=1}^N Cz_i x_i = -\sum_{i=1}^N x_i + \frac{A}{A^2 + B^2 + C^2} \sum_{i=1}^N (Ax_i + By_i + Cz_i + 1)^2 \\ \sum_{i=1}^N Ay_i x_i + \sum_{i=1}^N By_i^2 + \sum_{i=1}^N Cz_i y_i = -\sum_{i=1}^N y_i + \frac{A}{A^2 + B^2 + C^2} \sum_{i=1}^N (Ax_i + By_i + Cz_i + 1)^2 \\ \sum_{i=1}^N Az_i x_i + \sum_{i=1}^N By_i z_i + \sum_{i=1}^N Cz_i^2 = -\sum_{i=1}^N z_i + \frac{A}{A^2 + B^2 + C^2} \sum_{i=1}^N (Ax_i + By_i + Cz_i + 1)^2 \end{cases} \quad (5)$$

Решим эту систему методом последовательных приближений. Обозначим:

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^N x_i^2 &= X^2 & \sum_{i=1}^N y_i^2 &= Y^2 & \sum_{i=1}^N z_i^2 &= Z^2 \\ \sum_{i=1}^N x_i y_i &= XY & \sum_{i=1}^N x_i z_i &= XZ & \sum_{i=1}^N y_i z_i &= YZ \\ \sum_{i=1}^N x_i &= X & \sum_{i=1}^N y_i &= Y & \sum_{i=1}^N z_i &= Z. \end{aligned} \quad (6)$$

$$OST(A, B, C) = \frac{A}{A^2 + B^2 + C^2} \sum_{i=1}^N (Ax_i + By_i + Cz_i + 1)^2 \quad (7)$$

Перепишем систему:

$$\begin{cases} A \cdot X^2 + B \cdot XY + C \cdot XZ = OST - N \cdot X \\ A \cdot XY + B \cdot Y^2 + C \cdot YZ = OST - N \cdot Y \\ A \cdot XZ + B \cdot YZ + C \cdot Z^2 = OST - N \cdot Z \end{cases} \quad (8)$$

Пусть:

$$\begin{aligned} OX &= OST - N \cdot X \\ OY &= OST - N \cdot Y \\ OZ &= OST - N \cdot Z \end{aligned} \quad (9)$$

Решаем систему по методу Крамера:

(10)

(11)

(12)

(13)

Коэффициенты в уравнении плоскости первого приближения:

$$A = \Delta_A / \Delta, \quad B = \Delta_B / \Delta, \quad C = \Delta_C / \Delta.$$

(14)

В этих выражениях равенство нулю знаменателя соответствует случаям перпендикулярности искомой плоскости осей координат или координатным плоскостям. Во избежание деления на ноль в спроектированном программном модуле эти случаи рассматриваются отдельно.

Рис. 3. Схема имитационного эксперимента:

к - число итераций, h_k - шаг увеличения итераций, i - номер текущей итерации.

3. Схема имитационного эксперимента

Математическая модель является объектом проведения имитационного эксперимента, суть которого заключается в разыгрывании случайных значений координат точек, реализации моделирующих операторов и статического анализа массив значений угла между плоскостями.

При построении схемы имитационного моделирования выделяются его входные и выходные параметры.

Входные параметры:

- номинальные координаты реперных точек;
- интервалы возможных отклонений координат реперных точек;
- законы распределения возможных отклонений координат реперных точек.

Выходной параметр - угол между двумя нивелировочными плоскостями БСК агрегатов.

Схема имитационного эксперимента представлена в виде алгоритма на рис. 3.

Ниже приводится описание структурных блоков алгоритма.

Блок 1. Генерирование координаты i -той реперной точки осуществляется по формулам (для абсциссы):

$$x_i = x_{0i} + 2 \cdot \xi \cdot \Delta x_{0i} \text{ (для равномерного закона распределения);} \quad (16)$$

$$x_i = x_{0i} + \xi^{(12)} \cdot \sigma \text{ (для нормального),} \quad (17)$$

$$\text{где } \xi^{(12)} = \sum_{i=1}^{12} \xi_i - 6;$$

$\sigma = \Delta x_{0i}/3$ - среднеквадратическое отклонение координаты реперной точки (действительной или измеренной). Аналогично и для координат y, z .

Блок 2. Вычисление коэффициентов уравнений нивелировочных плоскостей осуществляется по формулам (2 - 14).

Блок 3. Вычисление угла между нивелировочными плоскостями α_i осуществляется по формуле (15).

Блок 4. Точечные оценки параметров распределения угла α :

$$\tilde{m} = \frac{\sum_{i=1}^K \alpha_i}{K} \text{ - оценка математического ожидания;} \quad (18)$$

$$\tilde{D} = \frac{1}{K-1} \sum_{i=1}^K \alpha_i^2 - \frac{1}{K(K-1)} \left(\sum_{k=1}^K \alpha_k \right)^2 \text{ - оценка дисперсии.} \quad (19)$$

Блок 5. Проверка точности и достоверности оценок параметров распределения угла между плоскостями α проводится путем построения для них доверительных интервалов. При этом определяется достаточность итераций имитационного эксперимента для достижения заданной точности и надежности оценок параметров распределения угла α .

Выполнение нижеприведенных неравенств означает достаточность количества итераций K :

$$P\{|\tilde{D} - D| < \varepsilon_D\} \geq 2\Phi\left(\frac{\varepsilon_D}{\sigma[\tilde{D}]}\right); \quad (20)$$

$$P\{|\tilde{m} - m| < \varepsilon_m\} \geq 2\Phi\left(\frac{\varepsilon_m}{\sigma[\tilde{m}]}\right) - 1, \quad (21)$$

где $\sigma[\tilde{m}] = \sqrt{\frac{\tilde{D}}{K}}$, $\sigma[\tilde{D}] = \sqrt{\frac{2}{K-1}} \tilde{D}$ - для нормального закона распределения α .

4. Информационное воплощение имитационного эксперимента

На основе проработанной схемы имитационного моделирования размерных связей процесса нивелировки был спроектирован комплекс программного обеспечения в виде приложения “MSI” к системе “MicroStation” (см. рис. 4 и 5) и файла подсказки “Подсказка для MSI” в формате “Micro-Soft Help File”.

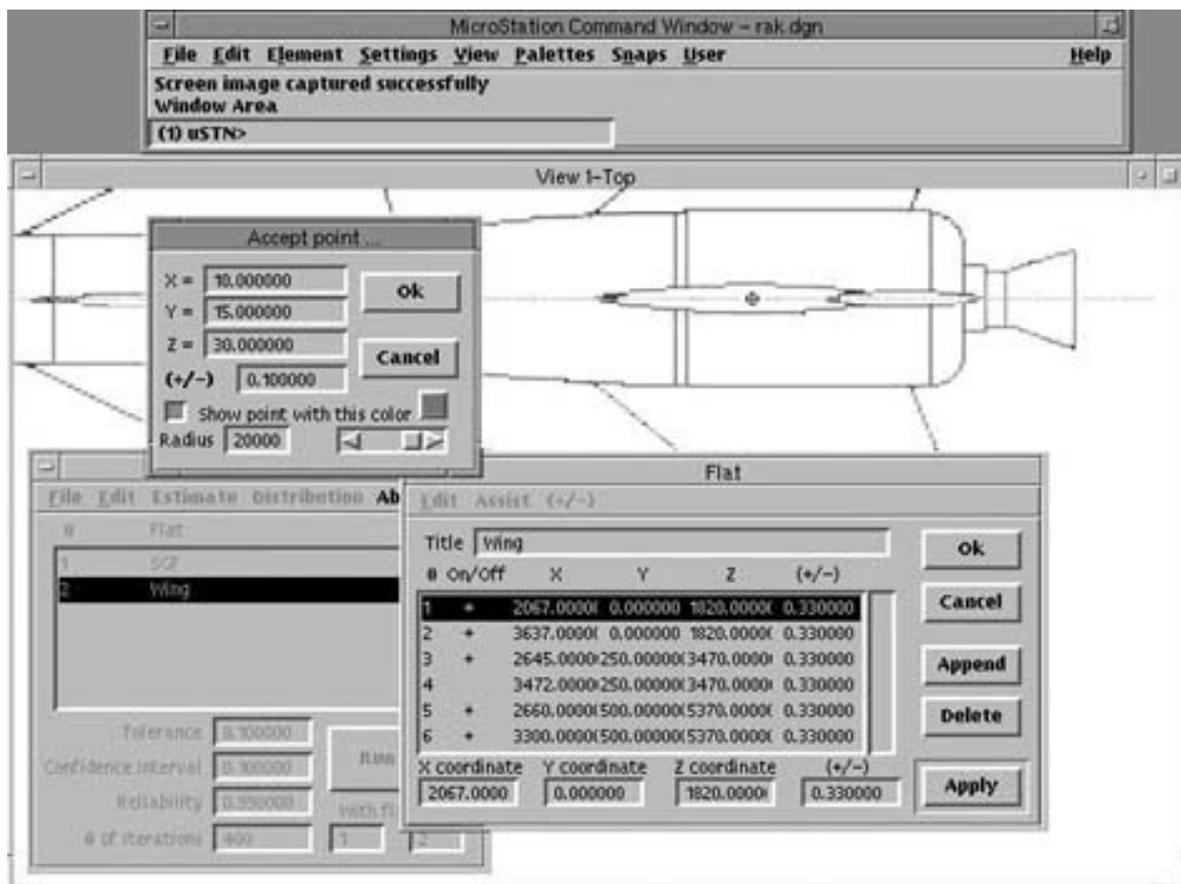


Рис. 4. Приложение “MSI”: диалоговые меню MSI, Flat, Accept point.

Приложение предназначено:

1. Для определения угла между двумя плоскостями, материализованными реперными точками по результатам измерений координат точек в произвольной, но единой системе координат.
2. Для прогнозирования погрешности определения угла между нивелировочными плоскостями при известных интервалах и законах распределения погрешности обеспечения и измерения координат реперных точек.

Приложение позволяет:

- задать набор нивелировочных плоскостей ЛА в диалоговом меню MSI;
- задать координаты реперных точек и их отклонения для каждой плоскости в меню Flat;
- определить координаты реперных точек с открытого проектного файла (электронного чертежа агрегата ЛА) в меню Accept point;
- провести имитационный эксперимент при нормальном или равномерном законе распределения координат точек;
- сохранить в файле или распечатать на принтере результаты эксперимента, отраженные в меню Results и Histogram.

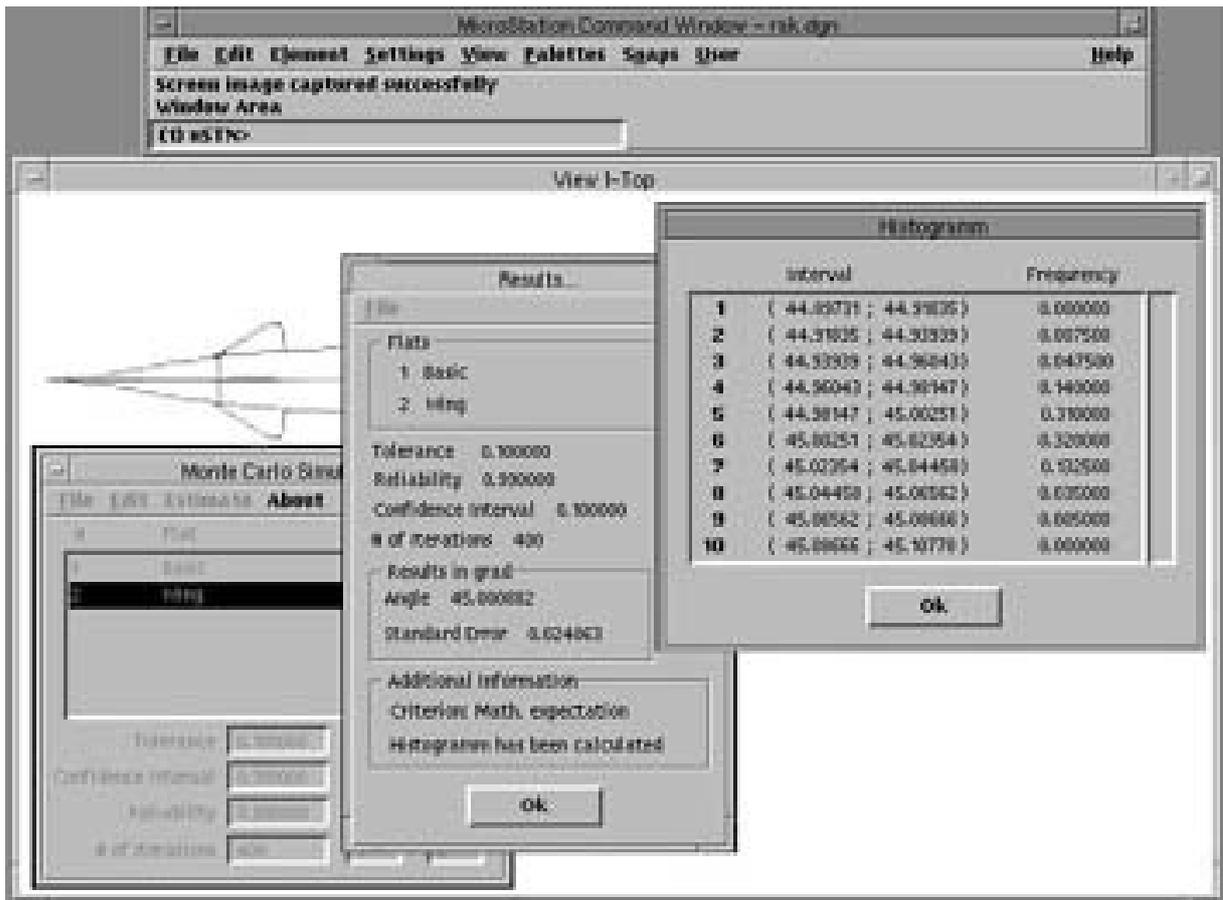


Рис. 5. Приложение "MSI": диалоговые меню MSI, Results, Histogram.



Рис. 6. Алгоритм проектирования процесса нивелировки с использованием программы “MSI”.

Спроектированный программный модуль является ядром предлагаемой информационной поддержки обеспечения процесса нивелировки ЛА. Под информационной поддержкой процесса нивелировки следует понимать совокупность средств программного и аппаратного обеспечения, а также методики или руководства по использованию этих средств в рамках задачи проектирования и реализации процесса .

В методике использования программных и аппаратных средств обеспечения процесса заложена концепция параллельного инжиниринга, которая заключается в одновременной и совместной работе различных подразделений предприятия на различных этапах выполнения поставленных проектно-конструкторских и конструкторско-технологических задач с использованием единой базы данных проекта.

При нормировании нивелировочных параметров ЛА задают максимально допустимую погрешность обеспечения и определения взаимного расположения БСК агрегатов, которое характеризуется углом между нивелировочными плоскостями агрегатов и расстоянием между началами координат.

При проектировании процесса нивелировки конструктор сначала формирует необходимые для этого исходные:

- требования к точности определения нивелировочных параметров ЛА;
- возможные места расположения реперных точек;
- допустимые отклонения действительных значений координат реперных точек;
- точность и надежность вычисления оценок параметров процесса.

По результатам имитационного эксперимента с помощью программного модуля “MSI” проводится коррекция исходных данных с целью оптимизации процесса.

Уточнению могут подлежать следующие параметры:

- количество и расположение реперных точек;
- требования к точности и надежности оценок параметров технологического процесса;
- требования к точности обеспечения координат реперных точек;
- требования к точности измерения координат реперных точек.

При этом соответственно будут осуществляться как изменения в конструкции агрегатов и оснастки, необходимой для изготовления и сборки, так и изменения в самой технологии их изготовления.

Ниже приводится описание структурных блоков алгоритма проектирования процесса (см. рис.6).

Формирование исходных данных

Исходные данные включают в себя следующее:

1. Номинальные координаты реперных точек в единой системе координат.
2. Интервалы отклонений действительных координат реперных точек.
3. Закон распределения действительных координат реперных точек внутри интервала из возможных значений.
4. Параметры закона распределения погрешности измерения.
5. Требования к точности реализации процесса, выраженные в виде максимально допустимой погрешности реализации процесса нивелировки - погрешности определения действительного взаимного расположения нивелировочных плоскостей. Она характеризуется оценкой среднеквадратического отклонения угла между нивелировочными плоскостями σ_{\max} :

$$\sigma_{\max} = \sqrt{\sigma_{\text{зад}}^2 + \sigma_{\text{mat}}^2},$$

(22)

где $\sigma_{\text{зад}}$ и $\sigma_{\text{мат}}$ - максимально допустимые значения среднеквадратических отклонений угла между нивелировочными плоскостями при задании и материализации нивелировочных плоскостей.

6. Достоверность оценки среднеквадратического отклонения угла между нивелировочными плоскостями.

Определение точности задания нивелировочных плоскостей осуществляется путем проведения имитационного эксперимента по алгоритму на рис. 3 при использовании следующих исходных данных:

- номинальные координаты реперных точек в единой системе координат - массив (x_{0i}, y_{0i}, z_{0i}) ;
- интервалы отклонений действительных значений координат точек - массив $(\pm\Delta x_{0i}, \pm\Delta y_{0i}, \pm\Delta z_{0i})$;
- параметры закона распределения действительных координат точек;
- достоверность оценки параметров распределения угла между нивелировочными плоскостями α : доверительный интервал для оценки математического ожидания и дисперсии $(\pm\varepsilon_m; \pm\varepsilon_D)$ и доверительная вероятность P ;
- число итераций имитационного эксперимента.

Для определение точности материализации нивелировочных плоскостей проводится имитационный эксперимент по алгоритму на рис. 3 при использовании следующих исходных данных:

- номинальные координаты реперных точек в единой системе координат - массив (x_{0i}, y_{0i}, z_{0i}) ;
- интервалы отклонений измеренных значений координат точек $(\pm\Delta x_{0i}, \pm\Delta y_{0i}, \pm\Delta z_{0i})$;
- параметры закона распределения измеренных значений координат точек;
- достоверность оценки параметров распределения угла между нивелировочными плоскостями - доверительный интервал для оценки математического ожидания и дисперсии $(\pm\varepsilon_m; \pm\varepsilon_D)$ и доверительная вероятность P ;
- число итераций имитационного эксперимента.

При использовании алгоритма имитационного эксперимента (рис. 3) для прогнозирования точности задания нивелировочных плоскостей полученная оценка $\tilde{\sigma}$ принимается равной $\tilde{\sigma}_{\text{зад}}$. При использовании алгоритма для прогнозирования точности материализации нивелировочных плоскостей $\tilde{\sigma} = \tilde{\sigma}_{\text{мат}}$.

Оценка среднеквадратического отклонения угла между нивелировочными плоскостями, полученная в результате реализации процесса нивелировки вычисляется по формуле:

$$\tilde{\sigma}_{\alpha} = \sqrt{\tilde{\sigma}_{зад}^2 + \tilde{\sigma}_{мат}^2} . \quad (24)$$

Выполнение условия $\tilde{\sigma}_{\alpha} \leq \sigma_{\max}$ означает достижение заданной точности определения угла между нивелировочными плоскостями. Если это условие не выполняется, то операция “Коррекция” алгоритма на рис. 6 может включать следующее:

- увеличение количества реперных точек, определяющих плоскости;
- увеличение расстояния между точками, определяющими плоскость;
- повышение точности измерения координат реперных точек.

При реализации спроектированного технологического процесса нивелировки информационная поддержка служит инструментом определения по результатам измерения координат реперных точек взаимного расположения нивелировочных плоскостей агрегатов. Результатом процесса является действительное значение угла между нивелировочными плоскостями, в качестве которого принимается оценка его математического ожидания. Точность и надежность оценки математического ожидания определяют необходимое количество итераций имитационного эксперимента.

При использовании информационной поддержки процесса координаты реперных точек достаточно измерить в произвольной, но единой системе координат. Произвольный выбор базы измерения обосновывает отсутствие необходимости увязки с ней системы координат изделия или агрегата, что при значительных габаритах представляет серьезную проблему. Наряду с этим, появляется возможность использования универсальных жестких нивелировочных стендов. В их конструкции в зависимости от формы и габаритов изделия меняются только ложементы стенда.

Список литературы

1. Чернуха В.Н. Основы испытаний авиационной техники: Учебное пособие. Ч.1. -М.: Военно-воздушная инж. акад. им. Н.Е. Жуковского, 1993. - 133 с.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

Федоров Илья Александрович, ассистент кафедры производства аэрокосмической техники Московского государственного авиационного института (технического университета)