

Реинжиниринг процесса нивелировки. Четвертая фаза

И.А. Федоров

Рукопись 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. Рукопись является завершающей публикацией Федорова И.А. о реинжиниринге процесса нивелировки. В рукописи подробно рассмотрена четвертая фаза реинжиниринга. Освещены вопросы оценки достоверности результатов исследования процесса, проведен экспертный анализ экономической эффективности от реализации новых процессов нивелировки, спроектированных с помощью разработанной программы “MSI”, приведены результаты ее практического внедрения.

Введение

Данная рукопись является заключительной из публикаций Федорова И.А. о реинжиниринге процесса нивелировки.

В первых двух статьях 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;
- проводится инжиниринг процесса на основе анализа существующих методов и средств его обеспечения;
- выявляются причины возникновения погрешности обеспечения и определения нивелировочных параметров ЛА;
- обосновывается метод исследования процесса.

В третьей статье описываются третья фаза реинжиниринга процесса нивелировки - “фаза совершенствования процесса”:

- описывается построение математической модели размерных связей процесса нивелировки;
- определяется схема проведения имитационного эксперимента над моделью;

- описываются возможности приложения “MSI”, реализующего имитационный эксперимент в контуре системы семейства CAD/CAM - “MicroStation”;
- формулируются основные положения информационной поддержки, как методики использования приложения “MSI” при решении задачи проектирования оптимального технологического процесса нивелировки.

На четвертом этапе осуществляется следующее:

- оценка достоверности результатов имитационного моделирования;
- оценка ожидаемого экономического эффекта от применения предлагаемой информационной поддержки;
- внедрение результатов реинжиниринга и оценка его эффективности.

1. Общие принципы оценки статистической совместимости результатов моделирования с данными натурных измерений

Согласно многим работам в области имитационного моделирования [1], [2], [3] единой математической теории, позволяющей оценивать статистическую совместимость имитационных моделей вероятностных систем, в настоящее время не существует. Основная причина этого заключается в существовании неформальных этапов имитационного моделирования, специфичных для конкретных областей применения этого метода исследования. Вместе с тем имеется обширный статистический аппарат для проведения такой оценки для частных состояний исследуемой системы.

В общем случае, на основании положительной оценки статистической совместимости натурных данных с прогнозом частного состояния системы делать вывод о пригодности всей модели нельзя.

Переходя к модели, описывающей состояние стохастической системы размерных связей в целом, и имея положительную оценку для частного прогноза, полученного по модели, введем следующее допущение. Условно примем, что размерные связи процесса нивелировки представляют собой композицию случайных величин или интерпретируются стационарной эргодической случайной функцией. Это означает, что при неизменном технологическом процессе (а это всегда предполагается в решаемой задаче) при количественном изменении его точностных параметров законы распределения погрешностей или вид случайной функции, а также исходная структура размерных связей существенно не изменяются. Из этого следует, что при переходе от одной точки факторного пространства, достоверность моделирования в которой известна, к любой другой точке система не претерпевает никаких существенных изменений.

Приняв указанное допущение и обосновав адекватность модели, получим, что основным источником ошибок в этом случае может оказаться лишь генерированная исходная информация, достоверность генерирования которой необходимо оценить.

Итак, для оценки достоверности результатов моделирования необходимо:

- обосновать адекватность математической модели, описывающей размерные связи процесса нивелировки, подтвердив тем самым достаточность априорной информации о размерных связях процесса;
- произвести оценку достоверности воспроизведения или моделирования входных факторов при реализации имитационного эксперимента, то есть оценить степень соответствия генерированных на ЭВМ значений входных факторов их реальным значениям.

И в том и в другом случае необходимо иметь статистический материал проведенных натуральных исследований рассматриваемых размерных связей.

2. Обоснование адекватности математической модели

Для проверки адекватности построенной модели при постоянной дисперсии воспроизводимости процесса необходимо и достаточно произвести сравнение однородности двух дисперсий в одной из точек факторного пространства - дисперсии, характеризующей погрешность проведенных натуральных измерений значения отклика в этой точке факторного пространства и дисперсии предсказания (полученной по модели) значения отклика в этой же точке факторного пространства. В случае, когда функция отклика характеризует зависимость расположения нивелировочной плоскости в пространстве от расположения ряда реперных точек на поверхности агрегата, необходимо иметь соответствующую статистику. Такая статистика должна содержать информацию о координатах реперных точек и о расположении нивелировочной плоскости, материализованной этими точками. Очевидно, что такие натурные эксперименты вообще не проводились, поэтому проверку адекватности построенной математической модели следует проводить путем правдоподобных рассуждений.

Функция отклика, которая при проведении имитационного эксперимента по определению положения нивелировочной плоскости в пространстве заменяется некоторой математической моделью, описывает “поведение” нивелировочной плоскости агрегата, материализованной набором реперных точек на его поверхности. В качестве этого “поведения” принимается угловое положение нивелировочной плоскости в некоторой системе координат. Это угол между данной нивелировочной плоскостью и какой-либо из координатных плоскостей, которая также может являться нивелировочной плоскостью другого агрегата ЛА.

Формула определения угла между плоскостями содержит коэффициенты уравнений плоскостей. При работе приложения “MSI” эти коэффициенты находятся с точностью до 0,001%. Следовательно, ошибки, которые могут возникнуть при “замене” функции отклика ее математической моделью, будут следствием округления значений промежуточных вычислений. Реализуя эти вычисления на ЭВМ, можно пренебречь и такого рода ошибками.

В таком случае, построенную математическую модель размерных связей процесса нивелировки, представляющей собой систему дифференциальных уравнений, можно считать абсолютно адекватной функции отклика системы размерных связей процесса нивелировки.

3. Оценка достоверности моделирования случайных координат реперных точек

Для оценки достоверности моделирования случайной величины необходимо:

- оценить правомерность гипотезы о характере функции распределения случайной величины;
- оценить степень соответствия генерированной на ЭВМ случайной величины этой функции распределения.

Таблица 1

Превышения реперных точек над плоскостью строительной горизонтали по нивелировочным данным самолета ТУ - 154М

№	Крыло по углу Н				Крыло по углу Δ				Стабилизатор			
	Нервюра №11 (номинал 141)		Нервюра №43 (номинал 124)		Нервюра №6 (номинал 67)		Нервюра №25 (номинал 7)		по углу Н (номинал 228)		по углу Δ (номинал 87)	
	прав.	лев.	прав.	лев.	прав.	лев.	прав.	лев.	прав.	лев.	прав.	лев.
1	140	138	128	132	66	68	12	11	230	231	91	81
2	139	138	134	134	63	63	3	5	230	231	89	86
3	143	141	130	133	64	65	3	7	228	231	89	91
4	139	138	128	133	65	63	8	5	231	230	89	90
5	141	138	129	117	65	64	7	7	229	231	86	88
6	138	138	135	120	65	64	8	3	230	229	89	90
7	138	139	125	123	65	67	9	4	230	231	88	89
8	138	138	129	128	63	63	10	3	230	227	89	88
9	140	141	127	130	64	65	11	7	229	228	85	87
10	142	140	128	122	67	66	6	8	230	227	87	85

Возможности современных ЭВМ позволяют генерировать псевдоравновероятные случайные величины с периодом повторения порядка 10^{10} . Такая периодичность является единственной причиной несоответствия генерированной случайной величины требуемому закону распределения.

При реализации N выборок значений случайных координат реперных количество “включений” генератора случайных чисел будет равно $N \cdot 3 \cdot (a + b)$, где a и b - число реперных точек материализации нивелировочных плоскостей. Видно, что даже при N порядка сотен тысяч периодичность генерирования случайной величины себя никак не проявит.

В предлагаемом имитационном эксперименте моделировались случайные значения координат реперных точек в заданной области своего определения в соответствии с априори известным законом распределения.

Чтобы проверить гипотезу о некотором законе распределения, которому подчиняются случайные значения координат реперных точек необходимо иметь выборку этих значений, произведенную при натуральных измерениях реального объекта производства. В этом случае достаточно повести оценку статической совместимости двух выборок - натурной и генерированной. Эта оценка совместимости проводится с помощью критерия Вилькоксона.

Критерий Вилькоксона служит для проверки однородности независимых выборок x_1, x_2, \dots, x_n , и y_1, y_2, \dots, y_k в предположении, что X и Y - непрерывные случайные функции [4].

Нулевая гипотеза состоит в том, что при всех значениях аргумента (обозначим его через x) функции распределения равны между собой:

$$F_1(x) = F_2(x).$$

Предполагается, что объем первой выборки меньше (не больше) второй: $n \leq k$, или это не так, то выборки можно поменять местами.

Проверка нулевой гипотезы в случае, если объем обеих выборок не превосходит 25. Для того, чтобы при уровне значимости α проверить нулевую гипотезу $F_1(x) = F_2(x)$ об однородности двух независимых выборок объемов n и k надо:

1. Расположить варианты обеих выборок в возрастающем порядке, т.е. в виде одного вариационного ряда, и найти в этом ряду $W_{\text{набл}}$ - сумму порядковых номеров вариант первой выборки.

2. Найти по таблице нижнюю критическую точку: $\omega_{\text{нижн.кр.}}(Q, n, k)$, где $Q = \alpha/2$.

3. Найти верхнюю критическую точку:

$$\omega_{\text{верхн.кр.}}(Q, n, k) = (n + k + 1)n_1 - \omega_{\text{нижн.кр.}}$$

Если $\omega_{\text{нижн.кр.}} < W_{\text{набл}} < \omega_{\text{верхн.кр.}}$, нулевая гипотеза принимается.

Приведем пример проверки нулевой гипотезы об однородности двух независимых выборок:

- выборки значений координаты реперной точки, сгенерированной на ЭВМ с помощью программного модуля “MSI” по нормальному закону распределения;
- выборки значений координаты реперной точки, по результатам нивелировок самолетов ТУ - 154М.

В таблице 1 приводятся данные замеров превышений реперных точек над плоскостью строительной горизонтали 10 самолетов модификации ТУ - 154М. Измерения проводились сразу после изготовления самолетов.

Генерирование на ЭВМ выборок значений превышений реперных точек осуществлялось по формуле $\xi(\sigma; a) = \sigma \cdot \xi^{(n)} + a$, где a - номинальное значение превышения; σ - среднеквадратическое отклонение, принятое как частное от деления поля допуска превышения реперной точки на 6;

$\xi^{(n)} = \sqrt{\frac{12}{n}} \sum_{i=1}^n (\alpha_i - 1/2)$ - нормальная случайная величина, α_i - случайная величина, распределенная равномерно на отрезке (0 ; 1).

Рассмотрим нивелировку крыла по углу Н, нервюра №11 на правой консоли крыла.

Таблица 2

Выборки значений превышений реперных точек на правом крыле по углу Н:

X - натурная выборка значений превышений реперных точек, Y - генерированная

#	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
X	140	139	143	139	141	138	138	138	140	142	-
Y	140,3	138,5	139,4	139,1	138,7	140,1	141,9	140,5	138,2	142,6	143,1

Таблица 3

Расположение выборок X и Y в возрастающем порядке

#	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
XY	138	138	138	138,2	138,5	138,7	139	139	139,1	139,4	
#	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
XY	140	140	140,1	140,3	140,5	141	141,9	142	142,6	143	143,1

$$W_{\text{набл}} = 1 + 2 + 3 + 7 + 8 + 9 + 11 + 12 + 16 + 18 + 20 = 107.$$

Уровень значимости $\alpha = 0,1$, $Q = 0,05$, $n = 10$, $k = 11$.

$$\omega_{\text{нижн.кр}}(0,05; 10; 11) = 86$$

$$\omega_{\text{верхн.кр}}(Q, n, k) = 22 \cdot 10 - 86 = 134$$

Поскольку, $86 < 107 < 134$, то нулевая гипотеза об однородности двух выборок принимается с уровнем значимости 0,1.

4. Пример проектирования технологического процесса с использованием приложения "MSI"

Заданы БСК переднего и заднего отсеков спускаемого аппарата (СА) (см. рис. 1). Точка начала координат БСК отсеков находится в центре окружности, описанной вокруг стыкового шпангоута двух отсеков. Две координатные плоскости совпадают с плоскостями стабилизации отсеков, третья координатная плоскость (общая для отсеков) есть привалочная плоскость стыкового шпангоута (рис. 1).

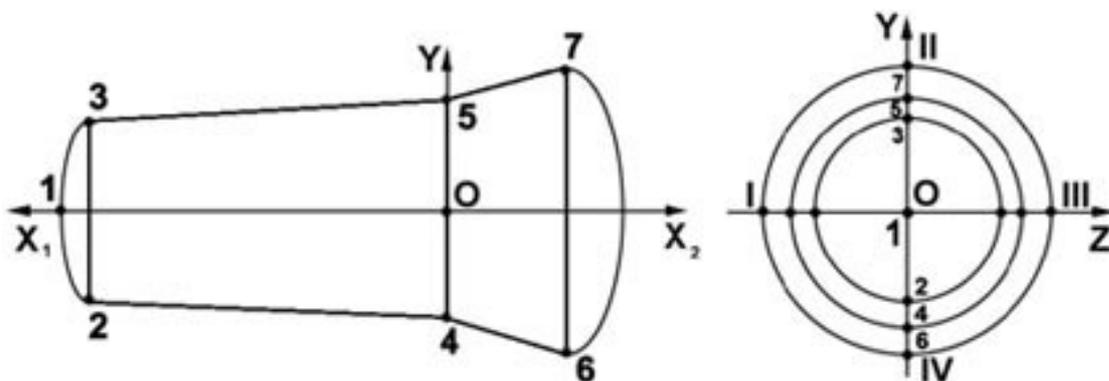


Рис. 1. БСК переднего отсека (X_1YZ) и заднего отсека (X_2YZ).

Плоскости стабилизации (I-III) отсеков могут быть заданы и материализованы семью реперными точками (рис. 1).

Таблица 4

Координаты реперных точек СА

№ точки	Координаты точки, мм
1	(0; 0; 0)
2	(120; 0; -450)
3	(120; 0; 450)
4	(1000; 0; -550)
5	(1000; 0; 550)
6	(1360; 0; -740)
7	(1360; 0; -740)

Плоскость стабилизации (I - III) переднего отсека может быть материализована точками 1, 2, 3, 4, 5. Плоскость стабилизации (I - III) заднего отсека - 4, 5, 6, 7.

Задача - определить минимальный набор реперных точек, при котором поле рассеяния погрешности определения угла между плоскостями стабилизации (I - III) переднего и заднего отсеков не превышает $\pm 0,5^\circ$.

При проведении имитационного эксперимента подбирается такое расположение реперных точек, при котором удовлетворялось бы требование по точности определения угла между плоскостями

ми стабилизации (I - III) переднего и заднего отсеков СА, а общее число реперных точек было бы минимальным.

Таблица 5

Результаты имитационного эксперимента

№	Номера реперных точек плоскости стабилизации переднего отсека	Номера реперных точек плоскости стабилизации заднего отсека	Оценка среднеквадратического отклонения при равномерном законе распределения σ_p , (град)	Оценка среднеквадратического отклонения при нормальном законе распределения σ_n , (град)	Суммарный интервал рассеяния угла между плоскостями $\Delta = 6 \cdot \sqrt{\sigma_p^2 + \sigma_n^2}$, (град)
1	1, 4, 5	4, 6, 7	0.663	0.234	0.898
2	1, 2, 5	4, 5, 6, 7	0.853	0.265	1.118
3	2, 4, 5	4, 5, 6, 7	0.618	0.207	0.826
4	2, 3, 4, 5	5, 6, 7	0.674	0.236	0.91
5	2, 3, 4, 5	4, 5, 6, 7	0.579	0.194	0.773
6	1, 2, 3, 4, 5	4, 5, 6, 7	0.576	0.193	0.769

Имитационный эксперимент проводится с помощью программы “MSI”.

Определение точности задания нивелировочных плоскостей.

Исходные данные имитационного эксперимента:

- координаты реперных точек плоскостей стабилизации (I - III) по таблице 4;
- интервал рассеяния действительных значений координат реперных точек ± 1 мм (закон распределения равномерный);
- доверительный интервал для оценки среднеквадратического отклонения $\pm 0,005^\circ$;
- доверительная вероятность для оценки среднеквадратического отклонения - 95%;
- число итераций - 400.

Определение точности материализации нивелировочных плоскостей.

Исходные данные имитационного эксперимента:

- координаты реперных точек плоскостей стабилизации (I - III) по таблице 4;
- поле рассеяния погрешности измерения координат реперных точек $\pm 0,5$ мм (закон распределения нормальный);
- доверительный интервал для оценки среднеквадратического отклонения $\pm 0,005^\circ$;
- доверительная вероятность для оценки среднеквадратического отклонения - 95%;
- число итераций - 400.

Результаты эксперимента приведены в таблице 5, из которой видно, что оптимальным вариантом, при котором удовлетворяются требования по точности определения угла между плоскостями

стабилизации (I - II), будет вариант №1. Плоскость стабилизации переднего отсека при этом определяется точками 1, 4, 5; плоскость стабилизации заднего отсека - 4, 6, 7.

5. Оценка экономической эффективности применения информационной поддержки

Итогом функционирования экономической системы за некоторый период времени, называется результатом P , который всегда обеспечивается определенными затратами Z каких-либо ресурсов. P и Z выражаются в денежной форме. Разница $\Delta = P - Z$ называется экономической эффективностью, отношение $\eta = P/Z$ - показатель эффективности.

Экономическую эффективность принято классифицировать на собственную и сравнительную. Собственная экономическая эффективность есть разность доходов P и полных приведенных затрат системы за определенный период времени. Сравнительная эффективность - разность приведенных затрат на изготовление идентичной продукции двумя системами в сопоставляемых условиях.

Для анализа целесообразности применения созданной информационной поддержки обеспечения процесса нивелировки следует рассмотреть сравнительную эффективность ее применения, для чего рассмотрению подлежат две технологические системы изготовления ЛА. Первая система предусматривает применение предлагаемой информационной поддержки при проектировании и реализации процессов обеспечения и определения нивелировочных параметров ЛА, а вторая - нет.

Прежде всего следует определить условия, необходимые для успешного применения разработанной информационной поддержки. Это, во-первых, наличие РС совместимой ЭВМ, достаточной для инсталляции "MicroStation" (Ver 5.0) и имеющей стандартное устройство ввода-вывода графической информации. Во-вторых, естественно, наличие самой системы "MicroStation" и программного модуля "MSI". В-третьих, необходим специалист имеющий навык работы с системой "MicroStation" на уровне пользователя и ознакомленный с возможностями программного модуля "MSI", как инструмента исследования размерных связей процесса нивелировки.

Помимо этого следует отметить, что использование предлагаемой информационной поддержки предусматривает применение новой, отличной от существующей методики нормирования нивелировочных параметров ЛА, которая к настоящему времени не разработана. Поэтому экономический эффект, обусловленный переходом на новую методику нормирования допусков нивелировочных параметров, анализу не подлежит.

В таком случае, капитальные или единовременные затраты на изготовления ЛА первой технологической системой, в отличие от второй будут включать в себя статьи расходов на обеспечение указанных выше трех необходимых условий.

Теперь необходимо выделить отличительные особенности работы первой технологической системы.

При проектировании процесса нивелировки ЛА, как операции контроля взаимного расположения поверхностей, использование предлагаемого информационного обеспечения позволит свести отработку параметров процесса, связанного с уточнением количества и расположения реперных точек, с реальных образцов ЛА на их электронные модели.

При контроле геометрических параметров ЛА отпадает необходимость увязки БСК ЛА с системой координат измерительного стенда. Относительно средств измерения ЛА располагается произвольно. Это позволит отказаться от следующих операций:

- установки изделия “в горизонт” (совмещения БСК ЛА с базой измерения);
- увязки стапеля с базой измерения, если стапель является носителем системы координат;
- поворота изделия на 180^0 для компенсаций погрешностей совмещения системы координат ЛА и базы измерения.

При сборке агрегатов ЛА появляется возможность материализации фактической БСК агрегата, что позволит:

- отказаться от использования точного стапеля как носителя системы координат агрегата при сборке, оставив ему лишь роль ложемента;
- существенно повысить точность обеспечения взаимного расположения агрегатов с исключением из размерной связи погрешности базирования их в стапеле.

С повышением точности и надежности контроля нивелировочных параметров снижается вероятность проведения повторных испытаний ЛА. Снижение вероятности проведения повторных испытаний происходит за счет снижения вероятности выбора в качестве объекта испытаний заведомо некачественных по своим нивелировочным параметрам изделий.

Снижение затрат на эксплуатацию ЛА, обусловленное повышением точности и надежности определения нивелировочных параметров, выражается через снижение ресурса двигательной установки, отводимого на компенсацию возмущающего момента, возникающего от невысокой точности обеспечения нивелировочных параметров.

Эффект от увеличения точности взаимного расположения агрегатов, который проявляется при эксплуатации ЛА, спрогнозировать крайне сложно, поэтому из рассмотрения он исключается. При этом увеличивается надежность оценки нижней границы ожидаемого экономического эффекта.

5.1. Этап сборки ЛА

Ожидаемый экономический эффект, проявляющийся на этапе сборки ЛА на одно изделие:

$$\Delta C_{\text{сборка}} = (C_{\text{точный стапель}} - C_{\text{ложемента}}) / N,$$

где $C_{\text{точный стапель}}$ - затраты на изготовление точного стапеля - носителя базовой системы координат ЛА; $C_{\text{ложемента}}$ - затраты на изготовление стапеля, выполняющего роль обычного ложемента; N - число изделий в партии.

Затраты на точный стапель:

$$C_{\text{точный стапель}} = C_{\text{прямые}} + C_{\text{накладные}},$$

где $C_{\text{прямые}}$ - прямые расходы включают затраты на зарплату производственным рабочим и материал: $C_{\text{прямые}} = C_{\text{зарплата}} + C_{\text{материал}}$; $C_{\text{накладные}}$ - накладные расходы.

Затраты на зарплату рабочим за изготовление точного стапеля:

$$C_{\text{зарплата}} = k \cdot T \cdot n,$$

где $k = 2$ - налоговый коэффициент, $T = 10\,000$ н/ч - трудоемкость в нормо-часах, $n = 10 \dots 15$ руб./нормо-час - тарифная ставка.

$$C_{\text{зарплата}} = 200\,000 \dots 300\,000 \text{ руб.}$$

$$\text{Затраты на материал: } C_{\text{материал}} = m_{\text{стапеля}} \cdot C_m,$$

где $m = 3 \dots 5$ т - ориентировочная масса стапеля; $C_m = 20\,000$ руб - цена за 1 тонну.

$$C_{\text{материал}} = 60\,000 \dots 100\,000 \text{ руб.}$$

Затраты на накладные расходы составляют примерно 400% затрат на прямые расходы:

$$C_{\text{накладные расходы}} = 4 \cdot (260\,000 \dots 400\,000) = 1\,040\,000 \dots 1\,600\,000 \text{ руб.}$$

Итак, ориентировочная стоимость точного стапеля:

$$C_{\text{точный стапель}} = 1\,300\,000 \dots 2\,000\,000 \text{ руб.}$$

Затраты на стапель, выполняющий роль только ложемента, рассчитывается также. Трудоемкость изготовления ложемента $T = 2\,000$ н/ч, масса $m = 0,5 \dots 1,5$ т.

Тогда $C_{\text{зарплата}} = 40\,000 \dots 60\,000$ руб., $C_{\text{материал}} = 10\,000 \dots 50\,000$ руб., $C_{\text{накладные}} = 200\,000 \dots 440\,000$ руб.

Ориентировочная стоимость ложемента:

$$C_{\text{ложемента}} = 250\,000 \dots 490\,000 \text{ руб.}$$

Окончательно, ожидаемый экономический эффект при сборке ЛА:

$$\Delta C_{\text{сборка}} = (1\,050\,000 \dots 1\,510\,000 \text{ руб.}) / N, \text{ где } N - \text{число изделий в партии.}$$

5.2. Этап летных испытаний ЛА

Снижение затрат на проведение летных испытаний, можно спрогнозировать по формуле:

$$\Delta C_{\text{проектирование}} = (\Delta C_{\text{натурные испытания}} - C_{\text{имитационное моделирование}}) / N,$$

где $\Delta C_{\text{натурные испытания}}$ - снижение затрат на проведение натурных испытаний;

$C_{\text{имитационное моделирование}}$ - затраты на проведения имитационного моделирования процесса нивелировки, которые складываются из затрат на программное обеспечение, ЭВМ и обучение персонала;
 N - число изделий в партии.

Чем выше достоверность определения нивелировочных параметров, тем меньше вероятность проведения повторных испытаний.

Тогда $\Delta C_{\text{натурные испытания}} = \Delta P \times C_{\text{повтор}}$, где ΔP - снижение вероятности проведения повторных испытаний, $C_{\text{повтор}}$ - затраты на проведение повторных испытаний.

Пусть необходимо произвести огневые испытания зенитно-ракетного комплекса “С - 300 ПМУ”. При испытаниях производится пуск двух ракет, каждая из которых стоит около 2 000 000 руб. Если принять, что вероятность повторных испытаний снизится на 3%, то нетрудно посчитать:

$$\Delta C_{\text{натурные испытания}} = 0,03 \times 2 \times 2\,000\,000 = 120\,000 \text{ руб.}$$

5.3. Этап контроля геометрических параметров ЛА

При контроле геометрии ЛА ожидаемый экономический эффект, приходящийся на одно изделие, можно спрогнозировать по формуле:

$$\Delta C_{\text{контроль геометрии}} = C_{\text{выставки в горизонт}} + C_{\text{поворот на } 180^\circ} + C_{\text{ручной счет}} - C_{\text{расчет на ЭВМ}},$$

где $C_{\text{выставки в горизонт}}$ - затраты на выполнение операции установки базовой плоскости изделия параллельно плоскости строительной горизонтали; $C_{\text{поворот на } 180^\circ}$ - затраты на выполнение операции вращения изделия на 180° относительно средств измерения с целью компенсации погрешности увязки БСК ЛА и системы координат стенда измерения; $C_{\text{ручной счет}}$ и $C_{\text{расчет на ЭВМ}}$ - затраты на обработку результатов измерений вручную и на ЭВМ соответственно.

Ориентировочно можно принять, что затраты на проведение имитационного моделирования полностью компенсируются эффектом от снижения затрат на проведение операции контроля геометрических параметров ЛА.

Кроме того, результаты процесса нивелировки, спроектированного с помощью предлагаемой информационной поддержки, позволят определить с высокой точностью и достоверностью необходимый ресурс двигательной установки, отводимый на компенсацию неточности взаимного расположения аэродинамических поверхностей агрегатов конкретного ЛА. Если же тот же процесс нивелировки является частью операции стыковки агрегатов (стыкуются предварительно отнивелированные агрегаты), то появляется возможность также и регулирования этого ресурса.

В качестве окончательного результата экспертной оценки экономического эффекта, ожидаемого при использовании предлагаемой информационной поддержки, можно принять отношение 1 500 000 руб. / N , где N - число изделий в партии.

6. Внедрение разработанной методики

Разработанная методика выбора оптимального способа задания и материализации нивелировочных плоскостей была положена в основу методических материалов утвержденных в “Национальном институте авиационных технологий” (ОАО НИАТ). Методические материалы называются “Методика выбора оптимального количества и расположения реперных точек для достижения заданной точности и достоверности определения действительного взаимного расположения нивелировочных плоскостей ЛА”.

В методических материалах представлено следующее:

- математическая модель размерных связей процесса нивелировки, описывающая взаимное расположение нивелировочных плоскостей агрегатов;
- состав входных и выходных параметров модели;
- определены способы воспроизведения входных параметров;
- приведена и подробно описана схема проведения имитационного эксперимента по проектированию оптимального технологического процесса нивелировки;
- рассмотрен пример проектирования процесса контроля взаимного расположения отсеков спускаемого аппарата.

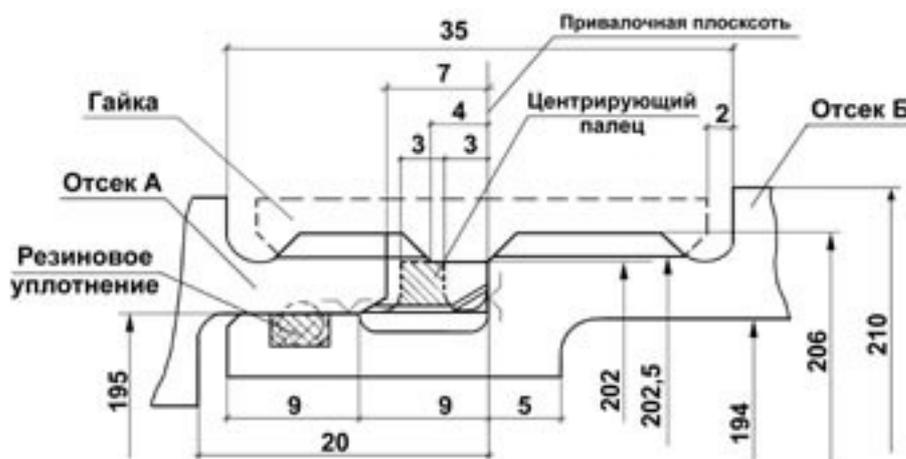


Рис. 2. Резьбовой стык отсеков изделия 9М96.

В рамках договора между ОАО НИАТ и МКБ “Факел” № 3371 от 30.06.93 “Технологическое сопровождение разработки и постановки изделия 9М96” разработанное приложение “MSI” было применено для оценки влияния точности базирования отсеков в стыковочном стенде на собираемость резьбового стыка (см. рис. 2).

Базирование отсеков осуществляется по центрирующему бурту, привалочной плоскости и центрирующим пальцам на отсеке А и центрирующим пазам на отсеке Б.



Рис. 3. Базирование отсеков по реперным точкам в стыковочном стенде.

Сборка отсеков производится в стыковочном стенде путем навинчивания гайки на правостороннюю резьбу отсека А с последующим свинчиванием гайки на левостороннюю резьбу отсека Б. Базирование отсека в стенде осуществляется по четырем реперным точкам (см. рис. 3 и таблицу 6).

Базовая система координат для двух отсеков в сборе задана следующим образом. Точка “О” начала координат - центр поперечного сечения по привалочной плоскости. Ось Х направлена вдоль отсеков в направлении от отсека Б к А, перпендикулярна привалочной плоскости и проходит от через точку “О”. Оси Y и Z направлены вдоль полуосей (О - III) и (О - II) в плоскости стыка соответственно. Координаты реперных точек в таблице 6 даны при окончательно состыкованном положении отсеков.

Таблица 6

Координаты реперных точек отсеков А и Б

	Отсек А	Отсек В
	рт.1 (30, 105, 0)	рт.5 (-30, 105, 0)
	рт.2 (30, -105, 0)	рт.6 (-30, -105, 0)
	рт.3 (1000, 90, 0)	рт.7 (-1100, 105, 0)
	рт.4 (1000, -90, 0)	рт.8 (-1100, -105, 0)

По договору, в частности, было выполнено следующее:

1. Проведен расчет на прочность стыка с целью определения оптимального количества и расположения центрирующих пальцев и пазов.
2. Спрогнозирована точность обеспечения взаимного расположения плоскостей стабилизации отсеков при их базировании в стыковочном стенде.
3. Рассчитаны оптимальные допуски на геометрические параметры и взаимное расположение центрирующих пальцев и пазов.

Расчет на прочность узлов стыка показал, что при известных случаях нагружения двух пальцев и, соответственно, двух пазов достаточно для обеспечения работоспособности стыка.

При прогнозировании точности обеспечения взаимного расположения нивелировочных плоскостей отсеков при их базировании в стенде с помощью программы “MSI” было исследовано влияние погрешности обеспечения и измерения взаимного расположения реперных точек на точность определения взаимного расположения одноименных плоскостей стабилизации отсеков (см. таблицу 7). Доверительный интервал для точечной оценки дисперсии составил 0,001 при достоверности 95%.

Таблица 7

Таблица результатов имитационного эксперимента

№	ϖ_{Σ} , (мм)	σ_{φ} , (град)
1	$\pm 0,25$	0,004566
2	$\pm 0,5$	0,009132
3	$\pm 0,75$	0,013698
4	± 1	0,018264
5	$\pm 1,25$	0,025409
6	$\pm 1,5$	0,030492
7	$\pm 1,75$	0,034287
8	± 2	0,039142

В таблице ϖ_{Σ} есть суммарный интервал возможных отклонений координат реперных точек:

$$\varpi_{\Sigma} = \varpi_{\text{совм}} + \varpi_{\text{стенда}} + \varpi_{\text{обеспеч}}$$

где $\varpi_{\text{совм}}$ - часть суммарного интервала, обусловленная неточностью совмещения репера с реперной точкой;

$\varpi_{\text{стенда}}$ - часть суммарного интервала, обусловленная неточностью взаимной увязки реперов стенда;

$\varpi_{\text{обеспеч}}$ - часть суммарного интервала, обусловленная неточностью обеспечения взаимного расположения реперных точек и плоскостей стабилизации отсеков.

σ_{φ} - среднеквадратическое отклонение угла между одноименными плоскостями стабилизации φ .

Для выполнения условия собираемости отсеков зазор между пазом и пальцем должен компенсировать следующие погрешности:

- погрешность базирования отсеков в стенде;
- погрешность увязки расположения пальцев и соответствующих пазов относительно реперных точек отсека.

Тогда условие собираемости стыка (без учета погрешности увязки реперных точек относительно плоскостей стабилизации) следующее (см. рис. 4.):

$$z_{\min} \geq D(\sin\alpha_{\text{пал}} + \sin\alpha_{\text{паз}})/2 + \varpi_{\text{баз}},$$

где $z_{\min} = (b_{\text{паз}}^{\min} - b_{\text{пал}}^{\max})$ - минимально необходимый зазор между пальцем и пазом;

$b_{\text{пал}}^{\max}$ - максимальная ширина пальца;

$b_{\text{паз}}^{\min}$ - минимальная ширина паза;

$\alpha_{\text{пал}}$ - угол отклонения пальца отсека А от полуоси (О - II);

$\alpha_{\text{паз}}$ - угол отклонения паза отсека В от полуоси (О - II);

$D = 101$ мм - диаметр отсека в месте расположения пальцев;

$\varpi_{\text{баз}} = (\varpi_{\xi} + \varpi_{\gamma})$ - погрешность базирования отсеков в стенде;

$\varpi_{\xi} = \varpi_{\Sigma}$ - часть погрешности базирования $\varpi_{\text{баз}}$, обусловленная несовпадением осей;

ϖ_{γ} - часть погрешности базирования $\varpi_{\text{баз}}$, обусловленная искривлением осей.

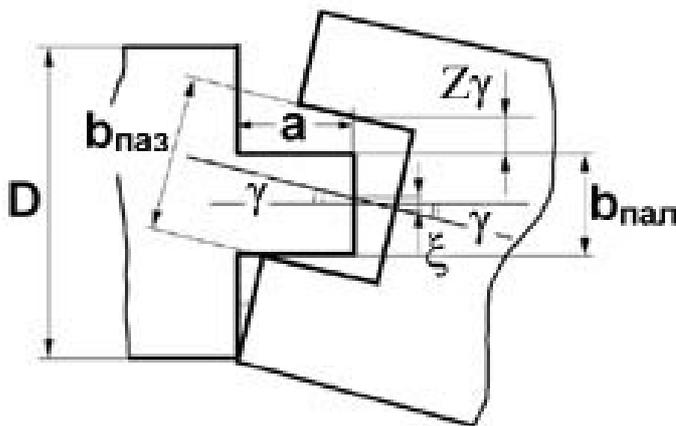


Рис. 4. Расположение пальца отсека А в пазах отсека Б.

Угол γ есть угол между продольными осями отсеков. Для определения угла γ достаточно было определить угол между одноименными плоскостями стабилизации отсеков φ .

В предположении о нормальном законе распределения угла φ , можно принять $\varpi_{\gamma} = 6\sigma_{\varphi}$.

Из условия собираемости были определены $b_{\text{пал}}^{\max}$ и $b_{\text{паз}}^{\min}$.

Для обеспечения заданного угла закрутки должно выполняться следующее:

$$\alpha_{\text{закр}}^{\max} \geq \alpha_{\text{закр1}} + \alpha_{\text{закр2}} + z_{\text{max}} = \alpha_{\text{пал}} + \alpha_{\text{паз}} + 2\beta_{\text{завал}} + z_{\text{max}} \text{ (см. рис. 5),}$$

где $z_{\text{max}} = (b_{\text{паз}}^{\max} - b_{\text{пал}}^{\min})$ - максимально допустимый зазор между пальцем и пазом (при $\gamma = 0$);

$b_{\text{паз}}^{\max}$ - максимальная ширина паза;

$b_{\text{пал}}^{\min}$ - минимальная ширина пальца;

$\beta_{\text{завал}}$ - угол, характеризующий “завал” пальца (паза) 2 относительно пальца 1, номинально $\beta_{\text{завал}} = 0$;

$\alpha_{\text{закр1}}$ - угол закрутки прямой, проходящей через середину пальцев, относительно следа плоскости стабилизации (II - IV) в плоскости стыка отсека А;

$\alpha_{\text{закр2}}$ - угол закрутки прямой, проходящей через середину пазов, относительно следа плоскости стабилизации (II - IV) в плоскости стыка отсека В, номинально $\alpha_{\text{закр1}} = \alpha_{\text{закр2}} = 0$.

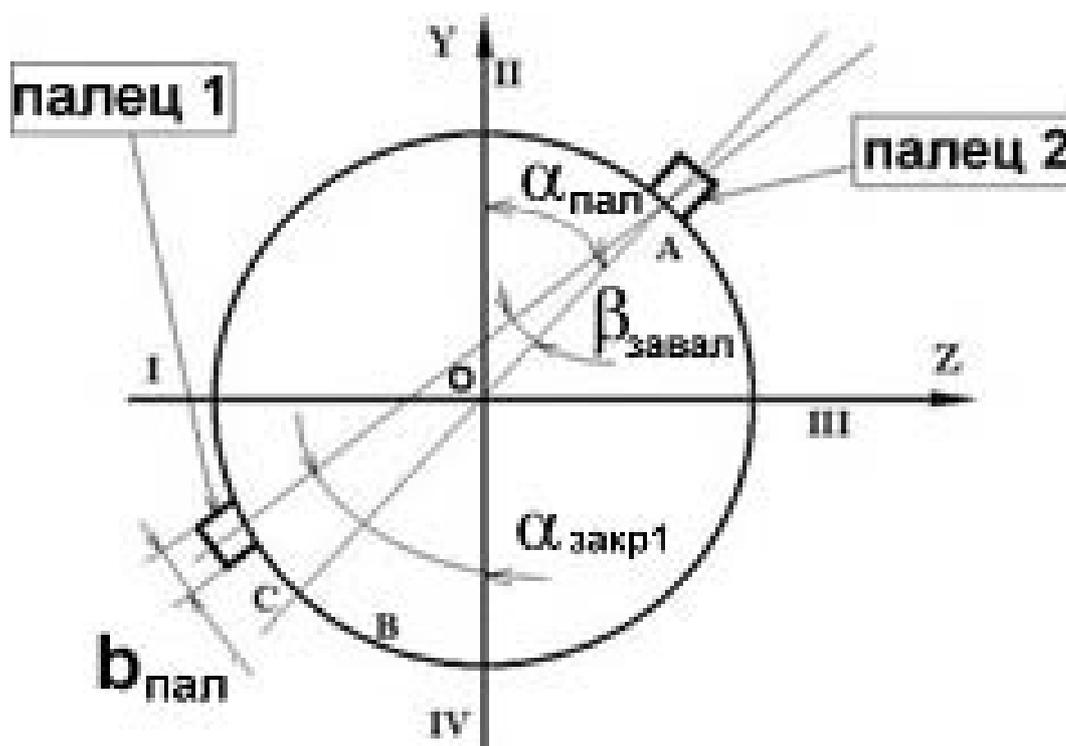


Рис. 5. Плоскость стыка отсека А.

Из условия обеспечения угла закрутки были определены $b_{\text{паз}}^{\text{max}}$ и $b_{\text{пал}}^{\text{min}}$.

На основе результатов расчета были предложены технологически обоснованные требования к точности геометрических параметров стыка отсеков и стыковочного станда, что позволило существенно упростить конструкцию стыка и технологический процесс стыковки отсеков.

Список литературы

1. Бруевич Н.Г., Сергеев Б.И. Основы нелинейной теории точности механизмов с низшими кинематическими парами.// Точность механизмов и автоматизированных измерительных средств. -М., 1966. - С.3-14.

2. Бусленко Н.П. Моделирование сложных систем. -М: Наука, 1978. - 399 с.
 3. Клейнен Дж. Статистические методы в имитационном моделировании. -Пер. с англ. -М.: Статистика, 1976. -Вып. I. - 115 с., Вып. II - 259 с.
 4. Гмурман В.Е. Руководство к решению задач по теории вероятностей и математической статистике: Учеб. пособие для студентов вузов. -М.: Высшая школа, 1999. - 400 с
-

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

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