

Реинжиниринг процесса нивелировки. Вторая 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. Публикация является продолжением статьи Федорова И.А. “Реинжиниринг процесса нивелировки. Первая фаза” и в ней подробно рассмотрена вторая фаза реинжиниринга - “фаза понимания процесса”. Освещены способы реализации процесса нивелировки, идентифицированы работы составляющие процесс, выявлены источники возникновения погрешности взаимного расположения агрегатов.

Введение

Данная публикация является продолжением статьи Федорова И.А. “Реинжиниринг процесса нивелировки. Первый этап”, в которой 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”;
- подробно излагается содержание первого этапа или фазы реинжиниринга, которая называется “организационные мероприятия по совершенствованию”.

Основным итогом проведения первой фазы реинжиниринга следует считать определения направлений совершенствования и постановку цели и задач совершенствования процесса нивелировки, рассматриваемого как совокупность работ технологической системы (ТС), то есть совокупности исполнителей, средств технологического оснащения и предмета производства (ЛА).

Так среди направлений совершенствования были выделены два основных:

- совершенствование инструментальной базы процесса;
- совершенствование методической базы процесса.

Цель совершенствования - разработка методики выбора оптимального способа реализации процесса нивелировки, оформление в виде приложения к системе класса CAD/CAM и формирование на базе приложения информационной поддержки процесса, позволяющей при проектировании спрогнозировать точность реализации процесса, а при реализации обработать результаты измерений контролируемых параметров.

На втором этапе реинжиниринга (фаза понимания процесса) проводится инжиниринг процесса, при котором анализируются способы его реализации, применяемые средства технологического оснащения, выявляется природа возникновения погрешности взаимного расположения агрегатов ЛА, обосновывается метод исследования процесса.

1. Инжиниринг технологического процесса нивелировки

В зависимости от места проведения технологического процесса нивелировки конечной его целью может быть следующее:

1. Обеспечение заданного взаимного расположения частей и агрегатов ЛА (на этапе сборки).
2. Получение информации о действительных значениях нивелировочных параметров ЛА (на этапе контроля).

Для достижения этих целей необходимо выполнить определенный объем работ на различных этапах производственного цикла. Анализ этих работ и будет являться содержанием инжиниринга технологического процесса нивелировки.

Инжиниринг процесса заключается в выделении и идентификации как работ составляющих процесс, так и работ, обеспечивающих возможность выполнения процесса (см. таблицу 1).

Таблица 1

Работы по осуществлению процесса нивелировки

№	Этапы	Работы
1	Проектирование ЛА	Нормирование взаимного расположения реперных точек (задание БСК)
2	Проектирование сборочной оснастки	Нормирование взаимного расположения элементов стапеля, необходимых для нанесения реперных точек на агрегат
3	Изготовление и монтаж сборочной и контрольной оснастки	Увязка взаимного расположения средств нанесения реперных точек в стапеле, а также средств измерения в жестком нивелировочном стенде
4	Сборка агрегата	Перенесение реперных точек на агрегат
5	Контроль нивелировочных параметров	Измерение взаимного расположения реперных точек на собранном корпусе ЛА (материализация БСК)

На этапе проектирования ЛА происходит формирование его аэродинамического облика, определяются его основные геометрические параметры - параметры, характеризующие форму и взаим-

ное расположение аэродинамических поверхностей агрегатов. Здесь же определяются расположение БСК частей и агрегатов ЛА, то есть осуществляется процесс задания БСК. Виртуальные, не существующие объективно элементы БСК (оси, координатные плоскости), увязываются относительно некоторых конструктивных элементов или реперных точек на агрегатах. Эта увязка выполняется на чертеже или теоретическом плазе путем нормирования их расположения относительно БСК агрегатов. Таким образом, при нивелировке контролю подлежит взаимное расположение этих конструктивных элементов или реперных точек. Далее по тексту для краткости словосочетание “конструктивные элементы” будет опускаться.

На этапе проектирования сборочной оснастки известное расположение реперных точек будет являться исходной информацией для проектирования специальных средств перенесения реперных точек со стапеля на агрегат. Простейшим таким средством является комбинация втулки и керна (штыря). Втулка служит направляющей для керна, с помощью которого производится кернение на поверхности агрегата реперной точки. При монтаже сборочной оснастки расположение втулок с кернами будет переноситься с помощью комплекта взаимоувязанных шаблонов, таких как ШМФ (шаблон монтажно-фиксирующий) и МЭ (монтажный эталон), или с помощью универсальных средств (инструментальных, оптических).

При монтаже контрольной оснастки (жесткого нивелировочного стенда) увязке подлежит расположение чувствительных элементов измерительных средств стенда (см. рис. 1).

После сборки агрегата перенесение расположения реперных точек на его поверхность производится либо в стапеле - носителе БСК агрегата, либо с помощью оптических средств (ЛЦИС) с предварительной материализацией БСК агрегата [1]. При этом после выполнения силового замыкания агрегат высвобождается от базовых и фиксирующих элементов стапеля, так, например, поднимается верхняя стапельная плита. Эта операция необходима для перераспределения сборочных напряжений в конструкции, в результате которого происходит ее деформация. Только после этого на поверхность агрегата осуществляется нанесение реперных точек.

Второй способ нанесения реперных точек (с помощью ЛЦИС) применяется реже, в основном для крупногабаритных ЛА. Основная проблема этого способа заключается в сложности материализации БСК непосредственно на изделии, минуя стапель.

Реализация технологического процесса нивелировки осуществляется после окончательной сборки агрегатов ЛА. При этом, как уже отмечалось выше, взаимное расположение агрегатов и частей ЛА определяется путем измерения взаимного расположения реперных точек. Осуществляется процесс материализации БСК агрегатов.

Координаты реперных точек определяются следующими способами:

- в жестком нивелировочном стенде;

- с помощью теодолита и линейки;
- бесконтактными информационно-измерительными системами.

2. Нивелировка в жестком нивелировочном стенде

Контроль в специальных жестких нивелировочных стендах применяется на самолетостроительных заводах при больших программах выпуска самолетов для сокращения трудоемкости контрольной операции. Использование таких стендов позволяет обеспечивать высокую точность определения нивелировочных параметров ЛА.

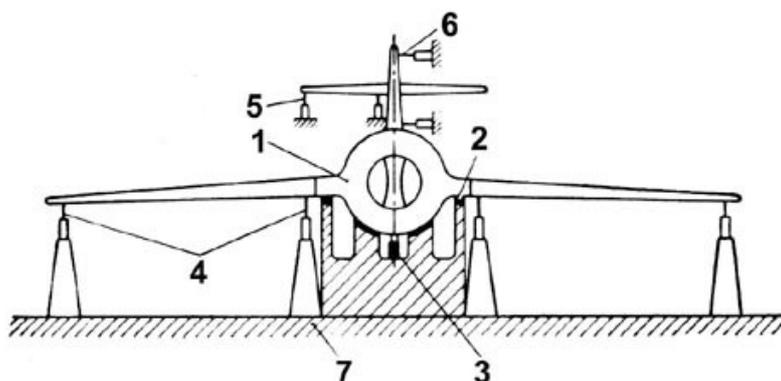


Рис. 1. Схема жесткого нивелировочного стенда:

1 - ЛА; 2 - ложементы; 3, 4, 5, 6 - индикаторные приборы; 7 - основание.

Нивелировочный стенд представляет собой массивное сооружение из жестких железобетонных или металлических опор-ложементов, на которых устанавливается ЛА. Измерения взаимного расположения реперных точек осуществляется при помощи специальных индикаторов, обычно часового типа, устанавливаемых на пинолях стенда (рис. 1).

Индикаторы настраиваются таким образом, чтобы их показания фиксировали отклонения положения точек от их номинального значения. Положение реперных точек, расположенных вдоль оси фюзеляжа, определяется выдвижными индикаторными приборами 3, а точек на крыльях, стабилизаторе и киле - приборами 4, 5 и 6.

Достоинство способа:

- достаточно высокая точность измерения координат точек (погрешность измерения до $\pm 0,1$ мм);
- относительно невысокая трудоемкость проведения контрольных операций.

Недостатки:

- необходимость проектирования стенда для каждого нового изделия;
- практически не применим для нивелировки крупногабаритных изделий.

3. Нивелировка с помощью теодолита и линейки

Сначала агрегат или изделие по нескольким реперным точкам устанавливают “в горизонт” (рис. 2). Это означает совмещение плоскости строительной горизонтали ЛА с плоскостью горизонта. Последняя определяется линиями визирования оптических средств (нивелиров, теодолитов).

Измерения координат точек осуществляют с помощью обычной линейки, нулевое положение которой совмещают с реперной точкой. Для чего на линейке предусмотрен репер. Предварительно линейку устанавливают вертикально по отвесу. Затем нивелиром или теодолитом засекают на линейке точку ее пересечения с плоскостью горизонта.

Достоинства этого метода в том, что он применим практически для любых изделий без ограничений их габаритов.

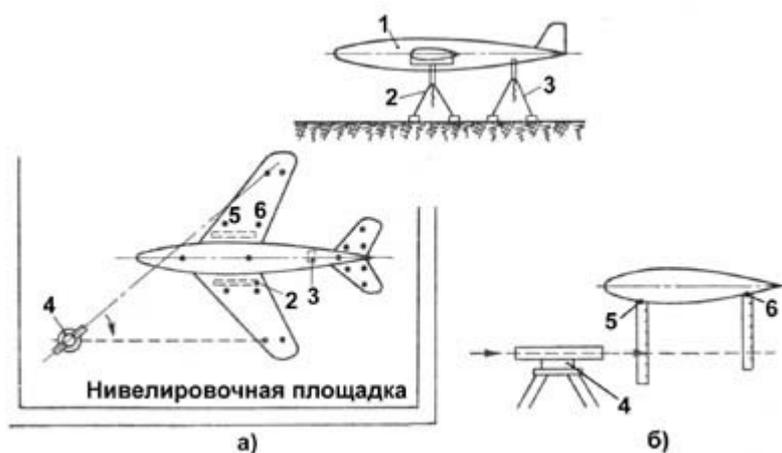


Рис. 2. Нивелировка ЛА с помощью теодолита и линейки:

1 - ЛА; 2, 3 - подъемники; 4 - теодолит; 5, 6 - реперные точки; а - установка ЛА “в горизонт”; б - определение превышения реперных точек.

Недостатки метода:

- погрешность определения координат точек как минимум в 2 раза выше, чем при нивелировке в жестком нивелировочном стенде. Она складывается из погрешности совмещения репера с реперной точкой, погрешности вертикализации линейки, погрешности измерения координат, а также погрешности установки изделия “в горизонт”;
- необходимость вспомогательного оборудования - строительных лесов и площадок для обеспечения возможности доступа рабочих к реперным точкам.

4. Нивелировка бесконтактными информационно-измерительными системами

Бесконтактным методом измерения согласно [2] называется такой метод измерения, при котором чувствительный элемент средства измерения не приводится в контакт с объектом измерения. Бесконтактные измерения основаны на использовании бесконтактных информационно-измерительных систем, реализующих принципы триангуляции (или ректангуляции) и тахеометрии. Информационно-измерительная система - это совокупность средств измерений и ЭВМ с необходимым программным обеспечением, служащим для обработки результатов измерений.

Принцип триангуляции заключается в определении координат точки путем измерения ее углового расположения из двух или более точек, расстояние между которыми известно. Ректангуляция есть разновидность триангуляции на плоскости. Вычисление координат точек осуществляется с использованием теорем синусов и косинусов.

Если двумя оптическими приборами (теодолитами) визировать на одну и ту же точку А, то, зная расстояние между точками С и В, в которых находятся приборы, по теореме синусов нетрудно вычислить координаты точки А (рис. 3).

По указанному принципу работает измерительная система RMS-2000 (фирма LEITZ, Германия) [3].

При использовании теодолитов, оснащенных цифровыми преобразователями значений углов поворота, возможно подключение ПЭВМ, осуществляющей вычисление координат точек. При этом расстояние можно определить, визируя теодолитами концы произвольно установленного эталона линейного размера.

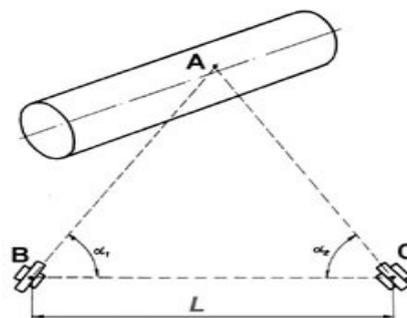


Рис. 3. Метод ректангуляции.

Принцип тахеометрии заключается в определении положения точки относительно средства измерения в полярной системе координат - радиус-вектор от начала системы координат средства измерения до измеряемой точки и два угла, характеризующих направление радиуса-вектора.

Если дальномер или лазерный интерферометр совмещен с теодолитом, то систему, аналогичную по возможностям предыдущим, можно построить на основе одного прибора - тахеометра.

Достоинства:

- высокая точность измерения координат реперных точек (погрешность измерения до 0,01 мм)
- отсутствие громоздкого вспомогательного оборудования
- простота и надежность измерений.

Недостатки:

- высокая стоимость оборудования;

- необходимость расположения точек визирования в зоне видимости оптических приборов.

Таким образом, определив состав и содержание всех работ, связанных с реализацией процесса нивелировки, можно приступить к исследованию причин возникновения погрешности взаимного расположения частей и агрегатов ЛА.

5. Причины возникновения погрешности взаимного расположения агрегатов ЛА

Причины возникновения погрешностей реализации процесса следует прежде всего искать в недостатках тех методов, которые используются для осуществления работ исследуемого процесса.

Основным методом обеспечения взаимозаменяемости узлов и агрегатов ЛА является плазово-шаблонный метод увязки. Основная идея метода, как известно, заключается в связанном переносе размеров с чертежа на сопрягаемые детали, узлы и агрегаты посредством системы жестких носителей форм и размеров.

Таблица 2

Источники возникновения погрешности при формировании аэродинамических характеристик ЛА

№	Этапы формирования аэродинамических характеристик	Погрешность
0	Задание аэродинамических характеристик ЛА	0
1	Определение геометрического облика ЛА	$\omega_{\text{геометрии}}$
2	Нормирование нивелировочных параметров как взаимного расположения реперных точек на аэродинамических поверхностях агрегатов ЛА	$\omega_{\text{норм}}$
3	Перенос расположения реперных точек на сборочную оснастку с чертежа (материализация СК агрегата на стапеле)	$\omega_{\text{перенос}}$
4	Изготовление агрегатов ЛА	$\omega_{\text{изг}}$
5	Копирование расположения реперных точек со сборочной оснастки на агрегаты (перенос СК со стапеля на агрегат)	$\omega_{\text{стапель}}$
6	Стыковка агрегатов ЛА	$\omega_{\text{сборки}}$
7	Контроль взаимного расположения реперных точек	$\omega_{\text{измерения}}$

К сожалению, сам плазово-шаблонный метод увязки является причиной возникновения существенных систематических погрешностей взаимного расположения агрегатов ЛА. Источником возникновения этих погрешностей оказывается процесс копирования размеров с одного жесткого носителя на другой.

В нижеприведенной таблице отражены источники возникновения погрешности формирования аэродинамических характеристик ЛА.

Суммарная погрешность формирования аэродинамических характеристик ЛА:

$$\omega_{\Sigma} = \omega_{\text{геометрии}} + \omega_{\text{норм}} + \omega_{\text{перенос}} + \omega_{\text{изг}} + \omega_{\text{стапель}} + \omega_{\text{сборки}} + \omega_{\text{измерения}}$$

Этапы с третьего по шестой являются этапами переноса геометрических размеров с чертежа на агрегаты ЛА при использовании плазово-шаблонного метода увязки.

Погрешность действительного взаимного расположения агрегатов ЛА, обусловленная родовым недостатком плазово-шаблонного метода:

$$\omega_{\text{пшм}} = \omega_{\text{перенос}} + \omega_{\text{изг}} + \omega_{\text{стапель}} + \omega_{\text{сборки}}$$

Ниже на рис. 4 показан процесс переноса копирования размеров с чертежа ЛА посредством жестких носителей на его агрегаты.

С теоретического плаза, исходными данными для построения которого являются чертеж изделия, изготавливаются первичные шаблоны ШКК (шаблон контрольно-контурный) или КП (конструктивный плаз). Далее по ним изготавливаются производственные шаблоны ШП (шаблон приспособления), ШВК, ШКС, ШМФ (шаблон монтажно-фиксирующий) и т.д., а потом и оснастка для изготовления и сборки стыкуемых агрегатов. Каждый этап копирования связан с накоплением погрешности.

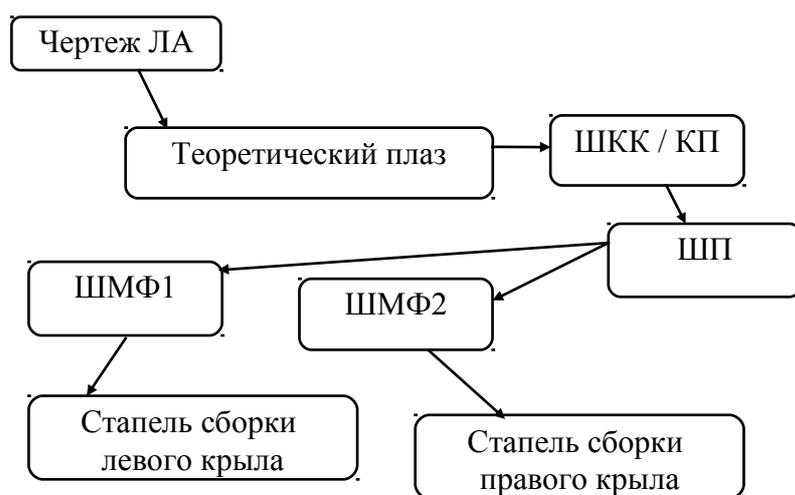


Рис. 4. Этапы накопления погрешности взаимного расположения левого и правого крыла при использовании плазово-шаблонного метода увязки.

Как видно схемы увязки левого и правого крыла самолета, два стапеля для сборки крыльев, на первый взгляд идентичные, таковыми, на самом деле, не являются. Разница между соответствующими геометрическими параметрами левого и правого стапеля обусловлена разницей в шаблонах, которые использовались для изготовления и монтажа этих стапелей. Тогда при стыковке крыльев самолета в их взаимное расположение вносится существенная по величине систематическая погрешность, обусловленная не идентичностью левого и правого стапеля. К этой систематической погрешности при стыковке, естественно, добавляется и случайная погрешность, обусловленная

случайным характером распределения внутренних напряжений при силовом замыкании. Собранные крылья не будут иметь идентичные относительные расположения внешних поверхностей обшивок и узлов стыка, что приведет к появлению дополнительного аэродинамического момента, снижающего маневренность и управляемость ЛА.

Таким образом, само использование плазово-шаблонного метода не позволяет эффективно решать задачи, связанные с повышением точности обеспечения заданного взаимного расположения агрегатов ЛА.

Второй существенный недостаток плазово-шаблонного метода проявляется при контроле геометрических параметров собранных агрегатов.

Суть любой операции контроля заключается в получении информации о величине какого-либо параметра и последующей его оценки - сравнения с некоторым базовым значением показателя или его эталоном.

При контроле геометрических параметров агрегата ЛА в качестве “геометрического эталона” выступает либо непосредственно стапель для сборки агрегата, либо контрольный стапель, который также изготавливается и монтируется с помощью набора взаимоувязанных шаблонов. И контрольный стапель, и сборочный, не могут являться эталонами агрегата, так как изготавливаются и монтируются с использованием шаблонов. Таким образом сборочная и контрольная оснастка, образно говоря, воспроизводит не проектную геометрию, а геометрию шаблонов.

При контроле отклонения размеров агрегатов ЛА относительно стапеля вносится неизвестная систематическая погрешность в определении геометрических параметров агрегата. Определение отклонений геометрических параметров агрегата производится не от проектных (заданных на чертеже), а от геометрических параметров стапеля.

Поиск решения проблем обеспечения взаимозаменяемости агрегатов и узлов ЛА следует вести в направлении использования методов и средств бесплазовой увязки.

При бесплазовой увязке отпадает необходимость в огромном количестве “промежуточных” шаблонов, то есть тех шаблонов, которые необходимы для переноса размера с чертежа на заготовительную и сборочную оснастку.

При бесплазовой увязке производственные шаблоны для изготовления и монтажа оснастки выполняются на станках с ЧПУ. Программа для станков генерируется на ЭВМ программными средствами систем компьютерного проектирования и производства CAD/CAM. Исходными данными являются электронные чертежи узлов и агрегатов ЛА. В конечном итоге, общее число необходимых жестких носителей снижается на два порядка.

6. Выбор метода исследования процесса ТС нивелировки

Исследованием, применительно к системе или явлению, можно считать любое действие, по получению информации о системе или явлении.

По принципам проведения процессы получения информации можно разделить на четыре группы:

- экспериментальные, осуществляемые техническими измерительными средствами;
- расчетные, осуществляемые путем вычислений с помощью вычислительной техники;
- органолептические, основанные на анализе восприятий органов чувств человека без применения технических измерительных средств;
- экспертные, основанные на учете мнений группы специалистов-экспертов.

Как уже отмечалось выше, исследование размерных связей процесса нивелировки сейчас осуществляется в значительной степени на основе экспертных оценок путем анализа статистической информации, касающейся реализации процесса при производстве однотипных ЛА. Одним из недостатков этого подхода является невозможность оптимизации затрат на реализацию процесса.

Расчетным путем исследовать размерные связи процесса нивелировки, формализуя их размерными цепями и используя известные методы расчета размерных цепей нецелесообразно по причине невысокой точности такого расчета при значительных погрешностях углового расположения плоскостей, содержащих звенья размерной цепи. Основные трудности формализации размерными цепями пространственных размерных связей, к которым относятся размерные связи процесса нивелировки, возникают при проецировании звеньев размерной цепи на одну плоскость при неизвестном угле между плоскостями, в которых они расположены. При неизвестном угле между плоскостями свести пространственную размерную цепь к плоскопараллельной и применить один из методов расчета размерных цепей практически невозможно. Для этого необходимо принимать гипотезу об известном угле между плоскостями, что существенно снижает точность расчета.

Экспериментальный подход при получении информации об объекте исследования может быть реализован путем проведения либо натурального, либо имитационного эксперимента. Принципиальное отличие натурального от имитационного эксперимента заключается в том, что объектом исследования при натурном эксперименте является реальное изделие или его реальная модель, а при имитационном - абстрактная модель изделия.

Основной недостаток имитационного эксперимента по сравнению с натурным заключается в невозможности воспроизведения моделью всего спектра свойств, которыми обладает реальный объект. Необходимость исключения из рассмотрения при проведении имитационного эксперимента ряда свойств объекта исследования влечет за собой появление ошибки результатов имитационного эксперимента. Величина этой ошибки зависит от степени соответствия модели реальному объекту. И, безусловно, заключительным этапом имитационного эксперимента должна быть про-

верка достоверности полученных результатов, то есть степени соответствия результатов имитационного эксперимента, полученных при моделировании реальных воздействий на модель, результатам натурального эксперимента, полученным при воспроизведении действительных воздействий на реальный объект.

Если проверка достоверности результатов имитационного эксперимента - положительна, то реализованная имитация натурального эксперимента может быть использована для проведения дальнейших исследований объекта при количественных изменениях уровней воздействий на него.

Хотя имитационное моделирование уступает по точности и достоверности результатов натурному эксперименту, именно имитационное моделирование было выбрано в качестве основного метода исследования размерных связей процесса. Использование натурального эксперимента в данной задаче практически невозможно по причине значительных затрат на его реализацию, связанных с осуществлением огромного количества измерений координат реперных точек на реальном ЛА.

Список литературы

1. Митрофанов А.А. Контроль сборки летательных аппаратов: Оптические и лазерные методы. -М.: Машиностроение, 1989. - 108 с.
2. Окрепилов В.В. Всеобщее управление качеством. В 4-х книгах. Кн. II. Учебник. - СПб: СПбУЭФ, 1996. - 170 с.
3. Бородкин А.А. Методы обеспечения взаимозаменяемости в производстве летательных аппаратов: Учебное пособие. -М.: МАИ, 1993. - 68 с.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

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