

УДК 629.78

## МЕТОД КОНТРОЛЯ ТОЧНОСТИ ИЗДЕЛИЙ КОСМИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА НА ЭТАПЕ РАЗРАБОТКИ КОНСТРУКТОРСКОЙ ДОКУМЕНТАЦИИ

© 2014 В. Д. Еленев<sup>1</sup>, Ю. П. Шупляк<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Самарский государственный аэрокосмический университет  
имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет)

<sup>2</sup>ОАО «РКЦ «Прогресс», г. Самара

Рассматриваются вопросы контроля над заданной точностью изделий космического комплекса на этапе разработки конструкторской документации.

Точность изделия на этапе разработки конструкторской документации рассматривается как системная характеристика, охватывающая совокупность единичных требований по точности изделия, заданных на этапе разработки технического задания.

В основу метода положено понятие о типовом проектном параметре точности, при помощи которого фиксируется всё множество единичных требований по точности изделия, определяемых техническим заданием. Все требования по точности изделия, реализуемые на этапе разработки конструкторской документации, приводятся к заданному в техническом задании исходному множеству типовых проектных параметров точности с целью подтверждения (или не подтверждения) их соответствия друг другу.

*Точность, размерный анализ, расчёт размерных цепей, верификация, электронная модель изделия, типовой проектный параметр точности, метрическое пространство.*

### Введение

Работа относится к проблематике обеспечения точности изделий космического комплекса (КК) на различных этапах их жизненного цикла существования (ЖЦС). Под изделиями КК в данном случае понимаются составные части (СЧ) КК различного уровня иерархии, для создания которых разрабатываются отдельные технические задания (ТЗ).

Точность изделия является одним из важнейших показателей, отражающих его способность выполнять поставленные задачи на этапе эксплуатации в составе КК и определяющих качество изделия на всех этапах ЖЦС. Она задаётся в ТЗ, обеспечивается на этапах разработки конструкторской документации (КД) и изготовления и далее контролируется на всех последующих этапах ЖЦС изделия.

Основным инструментом, при помощи которого производится контроль точности изделия на этапе разработки КД, является размерный анализ (РА), опирающийся на математический аппарат теории размерных цепей (РЦ).

С помощью РА становится возможным решить любые задачи (прямые и обратные), которые могут возникнуть при обеспечении точности изделия на различных этапах ЖЦС [1, 2].

Существуют различные методики проведения РА на точность с использованием компьютерных технологий, в том числе:

- «Parametrik Technology corporation Creo Elements/Pro 5.0 Анализ допуска Основанный Технологией SETOL», используемая на базе системы Creo Elements/Pro Tolerance Analysis Extension;

- модуль «Библиотека расчёта размерных цепей» в КОМПАС-3D и другие (например [3]).

Однако все эти методики распространяются только на этапы разработки КД и изготовления, а контроль над обеспечением реализации заданных в ТЗ требований по точности изделия на последующих этапах ЖЦС в настоящее время проводится вручную.

Данное обстоятельство значительно затрудняет объективный контроль над точностью изделия в виде аудиторской

проверки подтверждения точности изделия третьей независимой стороной и однозначно исключает процессы обеспечения заданных в ТЗ требований по точности изделия на последующих этапах ЖЦС из единого информационного пространства (ЕИП), в рамках которого действуют процессы обеспечения качества изделия.

В настоящей работе рассматривается один из возможных вариантов решения данной проблемы на этапе разработки КД.

### **Состояние проблемы объективного контроля над обеспечением точности изделия на различных этапах жизненного цикла существования**

При рассмотрении проблемы обеспечения объективного контроля над обеспечением точности изделий на этапе разработки КД в качестве исходных, не подлежащих обсуждению и принимаемых в качестве аксиом, принимаются следующие положения.

1. Проблема обеспечения объективного контроля над реализацией заданных в ТЗ требований по точности изделия рассматривается в рамках процессов нисходящего проектирования, предполагающих разделение (с известной степенью условности) процесса проектирования изделия на два взаимосвязанных этапа ЖЦС, выполняемых друг за другом в следующей последовательности: этап разработки ТЗ; этап разработки КД.

2. САПР, используемые при нисходящем проектировании, должны соответствовать требованиям нормативной базы, которая представлена в [4-6].

К числу таких САПР, используемых на предприятии, можно отнести, например:

- среди отечественных систем – САПР «Компас»;
- среди зарубежных систем – САПР Pro/Engineer.

3. Вопросы, связанные с тем, каким образом проводится РА и задаются требования по точности в ТЗ и обеспечиваются

их реализация на этапе разработки КД, не рассматриваются.

В настоящей работе предполагается, что РА, определяющий требования по точности изделия на этапах разработки ТЗ и КД, проведён, а его результаты известны и содержатся в размерных базах, определяющих точность изделия в электронных моделях изделия (ЭМИ) [5], которые могут быть двух видов:

- проектные ЭМИ (ЭМИП), разрабатываемые проектными подразделениями;
- конструкторские ЭМИ (ЭМИК), разрабатываемые конструкторскими подразделениями.

Известно [7], что процессы нисходящего проектирования гарантируют выполнение требований ТЗ, но, вместе с тем, они не гарантируют реализуемость требований данного ТЗ. Поэтому процессы нисходящего проектирования носят итеративный характер, то есть предполагают возможность неоднократного чередования процедур синтеза (структурного и параметрического) и верификации.

Здесь, в соответствии с [8], следует понимать:

- под верификацией – подтверждение (посредством представления объективных свидетельств) того, что установленные требования были выполнены;
- под объективным свидетельством – данные, полученные путём наблюдения, измерения, испытания или другим способом, подтверждающие наличие или истинность чего-либо.

В настоящей работе в качестве объективного свидетельства рассматриваются два результата РА изделия на точность на этапах разработки ТЗ и КД, а верификация КД на соответствие требованиям ТЗ по точности (далее по тексту – верификация) рассматривается как процедура, связанная с контролем соответствия этих результатов РА друг другу.

Мощности множеств размеров, определяющих точность изделия в размерных базах ЭМИП и ЭМИК, имеют различный порядок, при этом оба множе-

ства размеров должны подтверждать одну и ту же точность изделия.

Здесь возникают следующие вопросы:

- что считать точностью изделия на различных этапах ЖЦС;
- что является единицей размерного анализа точности изделия;
- что является мерой точности изделия.

Приведём следующее определение точности.

**Определение 1.** «Точность геометрического параметра – степень приближения действительного значения геометрического параметра к его номинальному значению» [9].

Известны и другие определения точности, но все они в конечном итоге сводятся к приведённому выше определению, носят частный характер и не привязаны к этапам ЖЦС.

Известны следующие виды (категории) РА: анализ детали; анализ механизма или изделия; анализ технологического процесса. Методология проведения данных категорий РА приведена, например, в [10], однако она справедлива только для этапов разработки КД и изготовления.

Проблема создания эффективных методов верификации КД на соответствие требованиям ТЗ с помощью упоминаемых выше САПР связана с тем, что ЭМИП и ЭМИК представляют собой две 3-мерные САД-модели, основные построения в которых выполняются в рамках электронных спецификаций изделий по номинальным размерам. Информация по размерам, имеющим допуски, вводится в такие модели искусственно:

- либо аналогично традиционным конструкторским чертежам в виде отдельно параметризованных размеров;
- либо в виде текстовых аннотаций.

При этом во время копирования геометрии изделия из ЭМИП в ЭМИК:

- происходит потеря информации по параметризованным размерам;

- отсутствует прямая связь между параметризованными размерами в ЭМИП и ЭМИК.

*Примечание 1.* Здесь и далее по тексту под параметризованными размерами будут пониматься такие размеры, у которых, помимо номинальных размеров, указаны допуски.

Таким образом, проблема контроля над точностью изделий на этапе разработки КД в настоящее время не имеет формального решения и превращается в сугубо субъективную процедуру, связанную с большой трудоёмкостью и требующую высокой квалификации исполнителей, которые не всегда могут быть объективными. При этом аудиторская проверка подтверждения точности изделия третьей независимой стороной с помощью РА становится очень затруднительной.

### **Точность изделия. Общие положения и основное определение**

Разделение процесса проектирования изделия на этапы разработки ТЗ и КД обусловлено разными целями и задачами, решаемыми на данных этапах.

Основной целью этапа разработки ТЗ является создание проекта изделия, реализующего поставленные задачи на уровне, соответствующем современному уровню науки и техники.

Основной целью этапа разработки КД является создание конструкции изделия, соответствующей всем требованиям ТЗ с учётом возможности изготовления изделия на существующей производственной базе завода-изготовителя.

Основное условие для завершения разработки КД изделия и перехода к этапу изготовления сформулируем следующим образом:

«Для успешного завершения этапов проектирования изделия (с учётом обеспечения заданной точности изделия) и последующего перехода к этапу изготовления изделия:

- необходимо, чтобы разработанная КД соответствовала существующей производственной базе завода-изготовителя;

- достаточно, чтобы разработанная КД соответствовала требованиям ТЗ».

Чтобы провести РА изделия на любом этапе проектирования, необходимо формально описать точность изделия (детали, узла, машины) в виде ограниченного множества размеров (назовём их параметрами точности - ПТ), которые отличаются от прочих размеров, определяющих размерную базу ЭМИП (ЭМИК), следующими особенностями:

- каждый ПТ имеет одинаковую структуру (номинальное значение и допустимые отклонения от номинального значения);

- значение каждого ПТ выражается языком чисел (метрических характеристик), что позволяет количественно сравнивать его с другими размерами точности на различных этапах ЖЦС посредством счёта или измерения.

В то же время ПТ, представляющие точность изделия на этапах разработки ТЗ и КД, отличаются друг от друга тем, что принадлежат разным моделям. Чтобы отличать их друг от друга, введём дополнительную идентификацию: проектные ПТ (ППТ) и конструктивные ПТ (КПТ).

Любое изделие КК имеет иерархическую структуру (детали, сборочные единицы, изделие в целом). Соответственно точность изделия также должна иметь иерархическую структуру. В настоящей работе точность изделия, представленная в ЭМИП и ЭМИК, рассматривается на трёх уровнях иерархии:

- на нижнем уровне – как точность множества электронных моделей проектных модулей (ЭМПМ) для ЭМИП и электронных моделей деталей (ЭМД) для ЭМИК, в которых каждая ЭМПМ (ЭМД) описывается в виде множества помодульных (поддетальных) ПТ;

- на среднем уровне – как точность взаимного расположения всех ЭМПМ (ЭМД) относительно друг друга в составе ЭМИП (ЭМИК), которая рассматривается

в виде электронной модели сборочной единицы (ЭМСЕ) [5];

- на верхнем уровне – как точность изделия в целом, рассматриваемая в виде некоторой интегральной характеристики всех составляющих ППТ (КПТ) нижних уровней иерархии.

Иерархическое построение даёт право считать точность изделия системной характеристикой изделия, которая имеет следующие особенности [11]:

- не поддаётся непосредственному наблюдению;

- является характеристикой системы с иерархической структурой и сама имеет иерархический характер;

- определяется только при помощи формального описания, которое охватывает все уровни иерархии.

На различных этапах ЖЦС точность изделия может изменяться, то есть имеет свойства динамичности. При этом на всех этапах ЖЦС точность изделия обязательно должна соответствовать заданной в ТЗ точности в рамках назначенной меры точности, то есть точность изделия обладает свойствами устойчивости.

Дадим понятию о точности изделия следующее определение.

**Определение 2.** «Точность изделия есть системная характеристика изделия, имеющая структуру иерархического типа, описываемая на различных этапах иерархии ограниченным множеством идентифицированных параметров точности, имеющих для соответствующего этапа ЖЦС конкретные количественные значения, обладающая на различных этапах ЖЦС свойствами динамичности и устойчивости в рамках заданной меры точности».

### Основная идея метода

ЭМИП и ЭМИК представляют собой две модели, построенные в рамках единой (базовой) системы координат (БСК) и размещённые в метрическом (Евклидовом) пространстве.

Известно, что в рамках системы координат любую точку можно однозначно описать в пространстве отдельно и уникально от других, используя начало отсчёта, оси координат и расстояния от начала отсчёта до проекций точки на оси. При необходимости, зная взаимное расположение друг относительно друга двух точек, принадлежащих ЭМИП, его можно определить как два расстояния между проекциями этих точек на соответствующие оси координат (если задача решается на плоскости).

В качестве единицы анализа точности изделия на этапе разработки КД прием параметризованный ППТ, который будем рассматривать как ПТ, который, в первую очередь, определяет не точность, с которой обеспечивается расстояние между двумя какими-либо точками, а точность, с которой должно обеспечиваться взаимное расположение двух точек, принадлежащих ЭМИП, в пространстве относительно друг друга.

С целью упрощения излагаемых материалов здесь и далее по тексту все рассуждения будем вести в рамках двухмерной системы координат. Поэтому, в общем случае, точность взаимного расположения двух точек в пространстве относительно друг друга может быть представлена двумя ППТ.

В настоящей работе процедуру верификации КД будем рассматривать для одного параметризованного ППТ, считая, что все рассуждения будут справедливы и для других параметризованных ППТ из состава ЭМИП.

При последующих рассуждениях будем исходить из условия, что на множестве КПТ, обеспечивающих заданную точность изделия на этапе разработки КД,

определено разбиение на классы эквивалентности по множеству ППТ, задающих точность изделия на этапе разработки ТЗ. Принятое условие позволяет считать, что одно и то же взаимное положение двух точек на плоскости относительно какой-либо оси координат может быть однозначно представлено либо с помощью одного ППТ, либо с помощью множества КПТ, эквивалентных исходному ППТ по соответствующему классу эквивалентности.

Будем считать, что любой ПТ (ППТ или ПКТ) является системой, которая включает в себя имя ПТ и множество атрибутов, в число которых входят номинальное значение ПТ и допуски.

Имена ПТ могут принадлежать разным ЭМИ (ЭМИП или ЭМИК) и, соответственно, иметь различную иерархию имён (в зависимости от уровня иерархии, на котором они входят в ЭМИ), а атрибуты ПТ (независимо от их принадлежности) могут иметь различное значение, но всегда будут выражаться в рамках единой метрической системе измерений.

*Примечание 2.* Все используемые далее по тексту обозначения имён, значений и т.д. принимаются условно только с целью пояснения сущности метода. Для реализации метода на практике необходимо дополнительно провести процедуру **постпараметризации**, которая заключается в присвоении всем переменным, привлекаемым к процедуре верификации, собственных уникальных имён и значений.

На рис. 1 показана графическая интерпретация параметризованного ППТ как элемента, задающего в ЭМИП требования по точности.

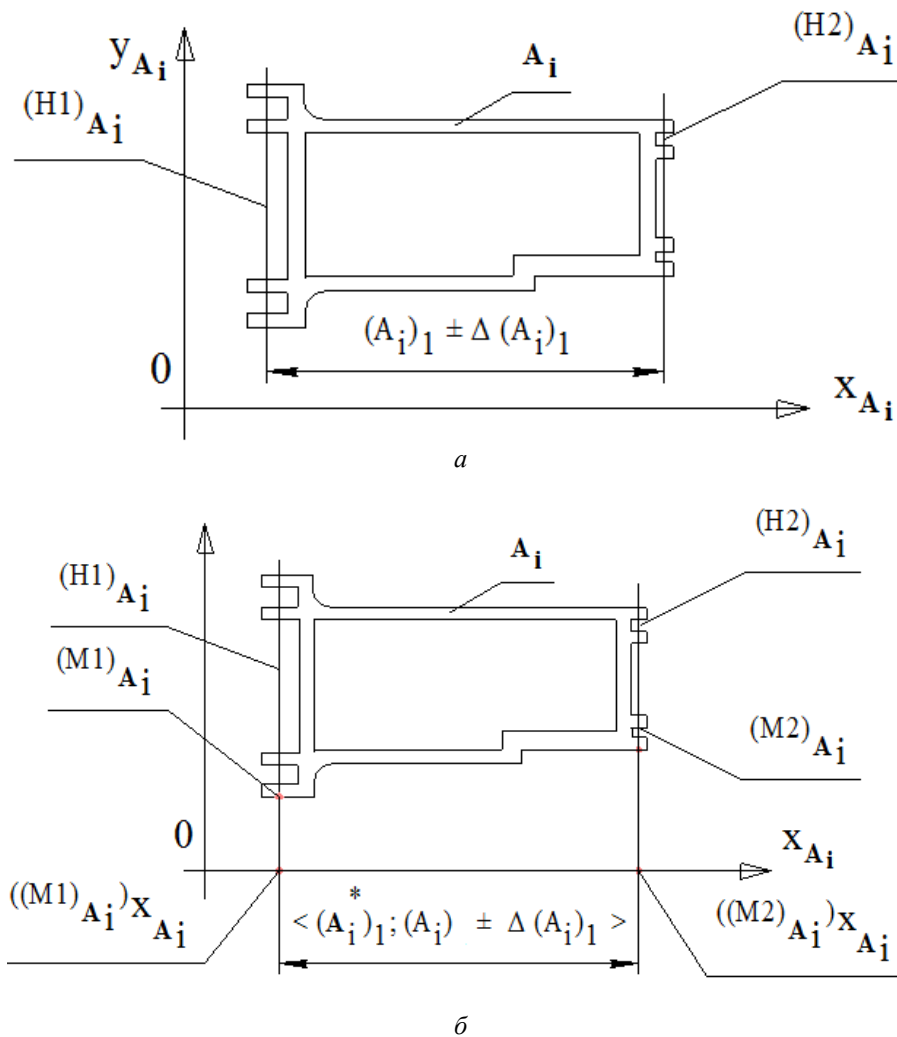


Рис. 1. Графическая интерпретация типового проектного параметра точности:  
 а – традиционная форма представления проектного параметра точности  
 в виде размера с допуском " $(A_i)_1 \pm \Delta(A_i)_1$ ";  
 б – представление типового проектного параметра точности с помощью БТ

На рис. 1, а показана некоторая ЭМПМ  $A_i$ , входящая в состав ЭМИП, построенная в рамках системы координат  $x_{A_i}$   $0$   $y_{A_i}$ , на которой показан параметризованный ППТ  $(A_i)_1 \pm \Delta(A_i)_1$ , который определяет точность расстояния между осями  $(H1)_{A_i}$  и  $(H2)_{A_i}$  в таком виде, в каком он обычно указывается на модели (и в КД).

Здесь индекс «1» при  $A_i$  означает порядковый номер номинального значения ППТ в составе ЭМПМ  $A_i$ , а значок « $\pm \Delta$ » указывает на то, что это допуск на номинальное значение.

В действительности для любой ЭМПМ типа  $A_i$  все ППТ взаимосвязаны между собой. Так, например, для ЭМПМ  $A_i$ , показанной на рис. 1, а, к осям  $(H1)_{A_i}$  и  $(H2)_{A_i}$  предъявляются требования по отклонению от вертикальности с заданной точностью (в данном примере эти требования не рассматриваются).

Возникает вопрос, от каких баз необходимо отсчитывать ППТ  $(A_i)_1 \pm \Delta(A_i)_1$  в пространстве, если указывается расстояние между двумя непараллельными линиями?

Введём в ЭМПМ  $A_i$  две точки  $(M1)_{Ai}$  и  $(M2)_{Ai}$  на осях  $(H1)_{Ai}$  и  $(H2)_{Ai}$ , как это показано на рис. 1, б, и спроецируем их на ось  $x_{Ai}$ . Как видно из рисунка, ППТ  $(A_i)_1 \pm \Delta(A_i)_1$  замыкается на проекции этих точек  $((M1)_{Ai})_{x_{Ai}}$  и  $((M2)_{Ai})_{x_{Ai}}$  и при этом определяется однозначно. В то же время ППТ  $(A_i)_1 \pm \Delta(A_i)_1$  становится независимым от осей  $(H1)_{Ai}$  и  $(H2)_{Ai}$ .

Назовём введённые таким образом точки базовыми точками (БТ) и отметим, что данные БТ представляют собой идеализированные абстрактные элементы, поскольку реально в местах их введения в ЭМИП могут быть пустые места. Вместе с тем, введение БТ позволяет более точно указывать базы, от которых отсчитываются ППТ, и делает эти ППТ независимыми друг от друга в пределах ЭМИП. Главным условием для точного определения баз здесь является правильность введения БТ в ЭМИП.

Дадим ППТ, размещённому между проекциями  $((M1)_{Ai})_{x_{Ai}}$  и  $((M2)_{Ai})_{x_{Ai}}$  точек  $(M1)_{Ai}$  и  $(M2)_{Ai}$  на ось  $x_{Ai}$ , собственное уникальное имя « $(A_i^*)_1$ », а к множеству его атрибутов отнесём выражение « $(A_i)_1 \pm \Delta(A_i)_1$ », которое далее будем считать значением ППТ  $(A_i^*)_1$ .

Систему  $\langle (M1)_{Ai}; (A_i^*)_1; (A_i)_1 \pm \Delta(A_i)_1; ((M2)_{Ai}) \rangle$ , в которой:

-  $(M1)_{Ai}$  и  $(M2)_{Ai}$  – две БТ, на проекции которых замыкается ППТ;

-  $(A_i^*)_1$  – имя ППТ в выбранной системе обозначений;

-  $(A_i)_1 \pm \Delta(A_i)_1$  – значение ППТ  $(A_i^*)_1$ ,

назовём типовым проектным параметром точности (ТППТ) и дадим ему следующее определение.

**Определение 3.** «Типовым проектным параметром точности называется идентифицированный (поименованный) параметризованный параметр точности, определяющий взаимное положение двух идентифицированных точек относительно друг друга, имеющий номинальное значение и допуски, выраженные в единой метрической системе измерений».

Введённый таким образом ТППТ  $\langle (M1)_{Ai}; (A_i^*)_1; (A_i)_1 \pm \Delta(A_i)_1; ((M2)_{Ai}) \rangle$  становится неотъемлемым атрибутом ЭМИП и сохраняется в ней в неизменном виде на всех последующих этапах ЖЦС изделия.

Процедуру обеспечения требований по точности изделия на этапе разработки КД будем формально рассматривать как процесс структурного и параметрического синтеза неизвестного множества элементов КППТ, реализующих в ЭМИК требования по точности, заданные ТППТ  $\langle (M1)_{Ai}; (A_i^*)_1; (A_i)_1 \pm \Delta(A_i)_1; ((M2)_{Ai}) \rangle$ .

Будем считать, что:

- структурный синтез множества КППТ – это определение множества имён КППТ, которые в совокупности должны замыкаться на проекции  $((M1)_{Ai})_{x_{Ai}}$  и  $((M2)_{Ai})_{x_{Ai}}$  БТ  $(M1)_{Ai}$  и  $(M2)_{Ai}$  на соответствующую ось (в рассматриваемом случае – на ось  $x_{Ai}$ );

- параметрический синтез множества КППТ – это определение численных значений всех КППТ, которые были определены по результатам структурного синтеза.

Полученное таким образом множество КППТ автоматически становится множеством параметризованных КППТ.

Рассмотрим процесс обеспечения точности изделия на этапе разработки КД для ТППТ

$\langle (M1)_{Ai}; (A_i^*)_1; (A_i)_1 \pm \Delta(A_i)_1; ((M2)_{Ai}) \rangle$ , который приведён на рис. 2.

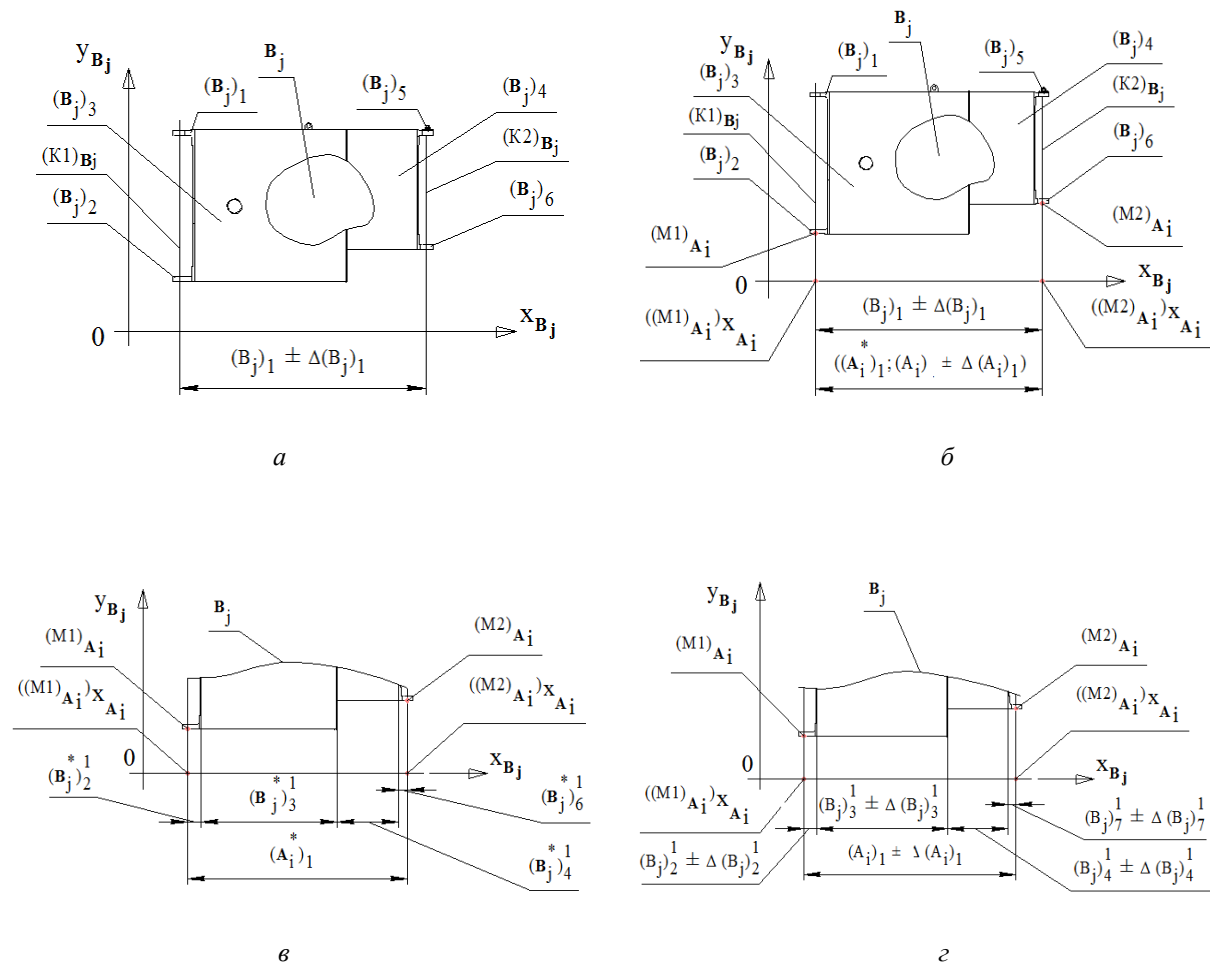


Рис. 2. Обеспечение точности изделия на этапе разработки КД:  
 а – без использования ТППТ; б – с использованием ТППТ; в – на стадии структурного синтеза точности изделия с использованием ТППТ; г – на стадии параметрического синтеза точности изделия с использованием ТППТ

На рис. 2, а показана ЭМСЕ  $\mathbf{B}_j$ , полученная на этапе разработки КД по исходным данным, заданным с помощью ЭМПМ  $\mathbf{A}_i$  и ППТ  $(\mathbf{A}_i)_1 \pm \Delta(\mathbf{A}_i)_1$ , взятым из рис. 1, а.

В состав ЭМСЕ  $\mathbf{B}_j$  входят детали  $(\mathbf{B}_j)_1, (\mathbf{B}_j)_2, (\mathbf{B}_j)_3, (\mathbf{B}_j)_4, (\mathbf{B}_j)_5, (\mathbf{B}_j)_6$ , которые разрабатывались отдельно, а затем компоновались в сборочную единицу  $\mathbf{B}_j$  в рамках единого файла. Роль осей  $(\mathbf{H}1)_{\mathbf{A}_i}$  и  $(\mathbf{H}2)_{\mathbf{A}_i}$  в сборочной единице  $\mathbf{B}_j$  выполняют оси  $(\mathbf{K}1)_{\mathbf{B}_j}$  и  $(\mathbf{K}2)_{\mathbf{B}_j}$ , расстояние между которыми представлено параметризованным КППТ  $(\mathbf{B}_j)_1 \pm \Delta(\mathbf{B}_j)_1$ . Здесь КППТ  $(\mathbf{B}_j)_1 \pm \Delta(\mathbf{B}_j)_1$  представляет

собой сборочную РЦ, звеньями которой являются поддетальные параметризованные КППТ, входящие в состав деталей  $(\mathbf{B}_j)_2, (\mathbf{B}_j)_3, (\mathbf{B}_j)_4$  и  $(\mathbf{B}_j)_6$ .

Как следует из рис. 2, а, между размерами  $(\mathbf{B}_j)_1 \pm \Delta(\mathbf{B}_j)_1$  и ППТ  $(\mathbf{A}_i)_1 \pm \Delta(\mathbf{A}_i)_1$  отсутствует прямая связь. Для того, чтобы обеспечить процедуру верификации, необходимо обратиться к ЭМИП и получить из неё данные по ППТ  $(\mathbf{A}_i)_1 \pm \Delta(\mathbf{A}_i)_1$ , выполнив при этом ряд неформализованных процедур.

На рис. 2, б показана ЭМСЕ  $\mathbf{B}_j$ , полученная на этапе разработки КД по ис-



ходным данным, заданным ЭМПМ  $A_i$  и ТППТ  $\langle (M1)_{Ai}; (A_i^*)_1; (A_i)_1 \pm \Delta(A_i)_1; ((M2)_{Ai}) \rangle$ .

Здесь БТ  $(M1)_{Ai}$  и  $(M2)_{Ai}$  автоматически становятся принадлежностью ЭМИК, а ТППТ

$\langle (M1)_{Ai}; (A_i^*)_1; (A_i)_1 \pm \Delta(A_i)_1; ((M2)_{Ai}) \rangle$ , заключённый между ними, становится моделью распределения пространства для множества КППТ, которые в совокупности должны замыкаться на проекции  $((M1)_{Ai})_{X_{Ai}}$  и  $((M2)_{Ai})_{X_{Ai}}$  БТ  $(M1)_{Ai}$  и  $(M2)_{Ai}$  на соответствующую ось координат.

Как видно из рис. 2, в, между размерами  $(B_j)_1 \pm \Delta(B_j)_1$  и  $(A_i)_1 \pm \Delta(A_i)_1$  появляется прямая связь. Однако, чтобы перейти к выполнению процедуры верификации, необходимо сначала подтвердить, что параметризованный ПКТ  $(B_j)_1 \pm \Delta(B_j)_1$  действительно соответствует тому значению, которое указано для него для ЭМСЕ  $B_j$ .

Процесс структурного и параметрического синтеза параметризованных ПКТ, входящих в качестве звеньев в сборочную РЦ, образованную ПКТ  $(B_j)_1 \pm \Delta(B_j)_1$ , в настоящей работе не рассматривается. Он представляет собой ряд неформальных процедур, которые выполняются вручную. Но при этом процесс структурного и параметрического синтеза звеньев РЦ и их значений происходит в интерактивном режиме на экране компьютера с прямым доступом к САД-информации, заложенной в ЭМСЕ  $B_j$ .

На рис. 2, в показаны результаты структурного синтеза множества парамет-

ризованных КППТ, которые входят в состав размерных баз деталей  $(B_j)_2, (B_j)_3, (B_j)_4$  и  $(B_j)_6$ , и в совокупности образуют сборочную РЦ  $(B_j)_1 \pm \Delta(B_j)_1$ , представленную параметризованными КППТ  $(B_j^*)_2^1, (B_j^*)_3^1, (B_j^*)_4^1$  и  $(B_j^*)_7^1$ .

На рис. 2, г показан параметрический синтез множества параметризованных ПКТ, значения которых определяются из размерной базы соответствующих деталей  $(B_j)_2, (B_j)_3, (B_j)_4$  и  $(B_j)_6$ .

Как следует из рис. 2, г, в результате параметрического синтеза получим следующее множество параметризованных КППТ:

$$\begin{aligned} & (B_j)_2^1 \pm \Delta(B_j)_2^1; \\ & (B_j)_3^1 \pm \Delta(B_j)_3^1; \\ & (B_j)_4^1 \pm \Delta(B_j)_4^1; \\ & (B_j)_7^1 \pm \Delta(B_j)_7^1. \end{aligned}$$

Данное множество КППТ замыкается на БТ  $(M1)_{Ai}$  и  $(M2)_{Ai}$  и образует кортеж

$$\langle (M1)_{Ai}; (((B_j)_2^1 \pm \Delta(B_j)_2^1) + ((B_j)_3^1 \pm \Delta(B_j)_3^1) + ((B_j)_4^1 \pm \Delta(B_j)_4^1) + ((B_j)_6^1 \pm \Delta(B_j)_6^1)); ((M2)_{Ai}) \rangle.$$

Значение множества параметризованных КППТ, включённых в данный кортеж, должно соответствовать значению ПКТ  $(B_j)_1 \pm \Delta(B_j)_1$ .

Процедура верификации должна подтвердить соответствие друг другу значений, представленных кортежами

$$\begin{aligned} & \langle (M1)_{Ai}; (((B_j)_2^1 \pm \Delta(B_j)_2^1) + ((B_j)_3^1 \pm \Delta(B_j)_3^1) + \\ & + ((B_j)_4^1 \pm \Delta(B_j)_4^1) + ((B_j)_6^1 \pm \Delta(B_j)_6^1)); ((M2)_{Ai}) \rangle \end{aligned}$$

и

$$\langle (M1)_{Ai}; (A_i^*)_1; (A_i)_1 \pm \Delta(A_i)_1; ((M2)_{Ai}) \rangle.$$

Здесь под соответствием будет пониматься выполнение следующих условий:

- $\langle (A_i)_1 \rangle = \langle (B_j)_2^1 + (B_j)_3^1 + (B_j)_4^1 + (B_j)_6^1 \rangle$ ;
- $\langle +\Delta(A_i)_1 \rangle \leq \langle (+\Delta(B_j)_2^1) + (+\Delta(B_j)_3^1) + (+\Delta(B_j)_4^1) + (+\Delta(B_j)_6^1) \rangle$ ;
- $\langle +\Delta(A_i)_1 \rangle \geq \langle (-\Delta(B_j)_2^1) + (-\Delta(B_j)_3^1) + (-\Delta(B_j)_4^1) + (-\Delta(B_j)_6^1) \rangle$ .

### **Компьютерная визуализация метода контроля над точностью изделия**

Обращаясь к процедуре верификации КД на соответствие требованиям ТЗ, сложно рассчитывать на полноту анализа, поочередно обращаясь непосредственно к ЭМИП и ЭМИК, поскольку мощность множества размеров, определяющих точность изделия в ЭМИП, может иметь второй и более порядки, а мощность множества размеров, определяющих точность изделия в ЭМИК, – третий и более порядки.

Поэтому предлагается создать матрицу точности, которая представляет собой таблицу, состоящую из трёх разделов и ограниченного множества строк.

Левый и правый разделы содержат в себе информацию по точности изделия на этапах разработки ТЗ и КД, а средний раздел содержит информацию о результатах процедуры верификации КД на соответствие требованиям ТЗ по точности изделия.

Каждая строка матрицы точности включает в себя информацию по одному ТППТ и множеству КППТ, которые располагаются в ЭМИП и ЭМИК между соответствующими двумя БТ, являющимися общими для обеих моделей.

Число столбцов в среднем разделе может быть разным, в зависимости от формы представления результатов верификации. В простейшем случае раздел может иметь один столбец, в котором результат верификации может быть представлен качественно в виде оценки типа «да-нет».

На этапе разработки ТЗ заполняется левый раздел матрицы точности.

Заполнение раздела должно проводиться представителями проектного отдела, которые являются авторами требований по точности изделия. Процедура заполнения матрицы точности проводится индивидуально путём введения конкретным исполнителем (коллективом исполнителей) в отдельную строку соответствующей информации по каждому ТППТ с последующим подтверждением завершения операции электронной подписью. Число строк в матрице точности должно соответствовать числу ТППТ, приведённых в ЭМИП.

Порядок заполнения матрицы может быть различным. Важно, чтобы каждый ТППТ, представленный в ЭМИП, нашёл своё отображение в левом разделе матрицы точности. Факт полного заполнения матрицы точности на этапе ТЗ также должен обязательно подтверждаться электронной подписью.

Заполнение правого раздела матрицы точности может выполняться либо по мере разработки КД, либо после её завершения. Процесс заполнения матрицы точности на этапе разработки КД аналогичен процессу её заполнения на этапе разработки ТЗ и также должен обязательно подтверждаться соответствующими электронными подписями.

Будет считаться, что заданная точность конструкции изделия на этапе разработки КД обеспечивается, если мера точности каждой сборочной РЦ из правого раздела матрицы точности соответствует требованиям соответствующего ТППТ из левого раздела. Если хотя бы для одного из ТППТ требования по точности не соответствуют своему заданному значению, то точность изделия не обеспечивается.

| Имя первой точки | Имя ТППТ    | Значение ТППТ               | Имя второй точки | Значение верификации | Имя первой точки | Множество имён КПП                                       | Значение сборочной РЦ   | Имя второй точки |
|------------------|-------------|-----------------------------|------------------|----------------------|------------------|--|---|------------------|
| •                | •           | •                           | •                | •                    | •                | •  | •   | •                |
| •                | •           | •                           | •                | •                    | •                | •  | •   | •                |
| •                | •           | •                           | •                | •                    | •                | •  | •   | •                |
| $(M1)_{Ai}$      | $(A_i^*)_1$ | $(A_i)_1 \pm \Delta(A_i)_1$ | $(M2)_{Ai}$      | «ДА-НЕТ»             | $(M1)_{Ai}$      | $(B_j^*)_2$<br>$(B_j^*)_3$<br>$(B_j^*)_4$<br>$(B_j^*)_6$ | $((B_j)_2^1 \pm \Delta(B_j)_2^1) + ((B_j)_3^1 \pm \Delta(B_j)_3^1) + ((B_j)_4^1 \pm \Delta(B_j)_4^1) + ((B_j)_6^1 \pm \Delta(B_j)_6^1)$ | $(M2)_{Ai}$      |
| •                | •           | •                           | •                | •                    | •                | •  | •   | •                |
| •                | •           | •                           | •                | •                    | •                | •  | •   | •                |
| •                | •           | •                           | •                | •                    | •                | •  | •   | •                |

Рис. 3 Пример матрицы точности

На рис. 3 показан один из возможных вариантов структуры матрицы точности и показан пример её заполнения для ТППТ:

$$\langle (M1)_{Ai}; (A_i^*)_1; (A_i)_1 \pm \Delta(A_i)_1; ((M2)_{Ai}) \rangle.$$

Необходимо отметить, что при заполнении матрицы точности можно использовать САД-информацию из ЭМПМ  $A_i$  и ЭМСЕ  $B_j$ , выделив информацию, представленную на рис. 1, б, рис. 2, в, рис. 2, з, в виде отдельных слайдов.

### Заключение

Предлагаемый метод контроля над точностью изделия на этапе разработки КД не требует доработки используемых

САПР и не требует адаптации к нему существующей методологии РА.

При проведении верификации метод обеспечивает контроль каждого ТППТ из матрицы точности и может быть использован на практике при условии разработки метода **постпараметризации** (введение БТ и присвоение индивидуальных имён для каждого ТППТ), при помощи которого должна быть обеспечена подготовка и формализация информации, связанной с оформлением матрицы точности.

Матрица точности позволяет проводить контроль точности (в том числе аудиторский) путём проведения верификации точности вручную или (при минимальной адаптации аппарата расчёта РЦ) с использованием компьютерной техники.

### Библиографический список

1. РД 50-635-87. Цепи размерные. Основные понятия. Методы расчёта линейных и угловых цепей: метод. указания. М.: Изд-во стандартов, 1987. 45 с.
2. Солонин И.С., Солонин С.И. Расчёт сборочных и технологических размерных цепей. М.: Машиностроение, 1980. 110 с.
3. Корчак С.Н., Гузеев В.И., Буторин Г.И., Выбойщик В.Н., Кулыгин В.Л., Шамин В.Ю. Размерно-точностное проектирование технологических процессов обработки на основе расчёта технологических размерных цепей: учеб. пособие. Челябинск: ЮУрГУ, 2006. 101 с.
4. ГОСТ 2.051-2006. Электронные документы. Общие положения. М.: Стандартинформ, 2011.
5. ГОСТ 2.052-2006. Электронная модель изделия. Общие положения. М.: Стандартинформ, 2011.
6. ГОСТ 2.053-2006. Электронная структура изделия. Общие положения. М.: Стандартинформ, 2007.
7. Шехонин А.А., Домненко В.М., Гаврилина О.А. Методология проектирования оптических приборов: учеб. пособие. СПб.: СПбГУ ИТМО, 2006. 91 с.
8. ГОСТ ISO 9000 – 2011. Системы менеджмента качества. Основные положения и словарь. М.: Стандартинформ, 2012. 32 с.
9. ГОСТ 21778-81. Система обеспечения точности геометрических параметров в строительстве. Основные положения. М.: Издательство стандартов, 1989.
10. Шамин В.Ю. Теория и практика решения конструкторских и технологических размерных цепей: компьютерная версия учеб. пособия. Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2005. 530 с.
11. Платонов К.К. Структура и развитие личности. М.: Наука, 1986. 256 с.

### Информация об авторах

**Еленев Валерий Дмитриевич**, доктор технических наук, профессор кафедры космического машиностроения, декан фа-

культета заочного обучения, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва

(национальный исследовательский университет). E-mail: [astra@ssau.ru](mailto:astra@ssau.ru). Область научных интересов: автоматизация проектирования летательных аппаратов.

**Шупляк Юрий Петрович**, ведущий инженер-конструктор, ОАО «РКЦ

«Прогресс», г. Самара. E-mail: [yuashuplyak@mail.ru](mailto:yuashuplyak@mail.ru). Область научных интересов: инженерный анализ механического взаимодействия составных частей космических комплексов.

## ACCURACY CONTROL METHOD FOR SPACE COMPLEX PRODUCTS AT THE STAGE OF DESIGN ENGINEERING

© 2014 V. D. Yelenev<sup>1</sup>, Yu. P. Shuplyak<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Samara State Aerospace University, Samara, Russian Federation

<sup>2</sup>Joint Stock Company “Space Rocket Center “Progress”, Samara, Russian Federation

The paper discusses the tasks of controlling the required accuracy of space complex products at the stage of design engineering.

The product accuracy at the stage of design engineering is viewed as a system characteristic encompassing the whole set of singular requirements for product accuracy defined at the stage of the draft proposal.

The method is based on the concept of a standardized accuracy design property which is used to fix the whole number of singular requirements for product accuracy defined by the draft proposal. All the requirements for the product accuracy implemented at the stage of design engineering are reduced to a reference quantity of standardized accuracy design properties defined in the draft proposal to confirm (or disconfirm) their matching each other.

*Accuracy, dimensional analysis, calculation of dimensional chains, verification, digital mock-up, standardized accuracy design property, metric space.*

### References

1. RD 50-635-87. Dimensional chain. Basic concepts. Methods of calculation of linear and angular chains. Moscow: Izdatel'stvo standartov Publ., 1987. 45 p. (In Russ)
2. Solonin I.S., Solonin S.I. Raschet sborochnykh i tekhnologicheskikh razmernykh tsepey [Calculation of assembly and technological dimension chains]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1980. 110 p.
3. Korchak S.N., Guzeev V.I., Butorin G.I., Vyboyshchik V.N., Kulygin V.L., Shamin V.Yu. Razmerno-tochnostnoe proektirovanie tekhnologicheskikh protsessov obrabotki na osnove rascheta tekhnologicheskikh razmernykh tsepey. Uchebnoe posobie [Size-precision design of technological processes on the basis of calculation of technological dimensional chains]. Chelya p.
4. GOST 2.051-2006. Electronic documents . General provisions. Moscow: Standartinform Publ., 2011. (In Russ.)
5. GOST 2.052-2006. Electronic product model . General provisions. Moscow: Standartinform Publ., 2011. (In Russ.)
6. GOST 2.053-2006. Electronic structure of the product. General provisions. Moscow: Standartinform Publ., 2007. (In Russ.)
7. Shekhonin A.A., Domnenko V.M., Gavrilina O.A. Metodologiya proektirovaniya opticheskikh priborov. Uchebnoe posobie [Methodology of designing optical instruments]. SPb.: St.-Petersburg ITMO Univ. Publ., 2006. 91 p.
8. GOST ISO 9000 – 2011. Quality management system. Fundamentals and vocabulary. Moscow: Standartinform Publ., 2012. 32 p. (In Russ)
9. GOST 21778-81. System of ensuring the accuracy of geometrical parameters in civil engineering. Fundamentals. Moscow: Izdatel'stvo standartov Publ., 1989. (In Russ)
10. Shamin V.Yu. Teoriya i praktika resheniya konstruktorskikh i tekhnolog-

icheskih razmernykh tsepey. Komp'yuternaya versiya uchebnogo posobiya [Theory and practice of design and technological dimension chains. Computer version of the training manual]. Chelyabinsk: South Ural St. Univ. Publ., 2005. 530 p.

11. Platonov K.K. Struktura i razvitie lichnosti [Structure and development of the individual]. Moscow: Nauka Publ., 1986. 256 p.

#### **About the authors**

**Valeriy Dmitriyevich Yelenev**, Doctor of Science (Engineering), Professor of the Department of Space Engineering, Dean of the Faculty of Correspondence and Distant Learning, Samara State Aerospace University, Samara, Russian Federation. E-mail: [astra@ssau.ru](mailto:astra@ssau.ru). Area of Research: computer-aided design of spacecraft.

**Yuriy Petrovic Shuplyak**, Leading Design Engineer, Joint Stock Company "Space Rocket Center "Progress", Samara, Russian Federation. E-mail: [yuashuplyak@mail.ru](mailto:yuashuplyak@mail.ru). Area of Research: engineering analysis of mechanical interaction between the constituent elements of space complexes.