

УДК: 629.7.004.9

## **Инвариантный метод расчета сложности геометрии электронной модели изделия**

Козаченко Д.А., Григорьев Е.В., Бодрышев В.В.

Рассматривается математический алгоритм расчета единого критерия сложности геометрии электронного макета изделия (ЭМИ). Приведены результаты анализа методов создания твердотельной модели в виде локальных критериев, влияющих на сложность геометрии изделия. Приведен математический аппарат, предназначенный для автоматического расчета единого критерия сложности геометрии деталей и сборок. Данный критерий позволит ускорить бизнес-процессы конструкторско-технологической подготовки производства (КТПП) на машиностроительных предприятиях авиационной отрасли.

**Ключевые слова:** сложность ЭМИ; автоматизация КТПП; PLM; PDM; STEP; CALS; распределение работ; сложность твердотельной модели; проектирование авиакосмических изделий.

### **Введение**

Рынок предъявляет все более жесткие требования к создаваемым изделиям. Это и сокращение времени выхода на рынок, и снижение стоимости, и повышенные требования, к качеству создаваемого изделия, снижение затрат на эксплуатацию. Сегодня главным конкурентным преимуществом компаний, разрабатывающих новые изделия, является гарантированный результат с минимальными затратами времени на выполняемые работы. Другими словами требуется увеличить скорость КТПП с повышением качества. Одним из способов увеличения скорости КТПП является автоматизация однотипной, часто повторяющейся работы, характеризующейся большими объемами и трудоемкостью, при помощи внедрения PLM-решения.

### **Актуальность проблемы**

Одной из проблем для построения эффективного PLM-решения является, устаревшие методы работы, основанные на бумажном документообороте. Если не меняются методы работы, не меняется и предприятие. Часто происходит ситуация, когда предприятие потратило огромные усилия и деньги на внедрение PLM-решения, но не получает эффект от этих действий. Одной из основных причин является специализированные методики расчета различных технико-

экономических параметров, влияющие на функционирование промышленного предприятия в целом. Одним из таких параметров является трудоемкость изготовления изделий авиационных, ракетно-космических систем, на основе которого на некоторых предприятиях производится трудовое нормирование и как следствие взаиморасчет с сотрудниками. В основе трудоемкости изготовления изделия лежит расчет конструктивно-технологической сложности изделия. Анализ методик расчета для двух критериев сложности изделия показал: авторы уделяли больше внимания автоматизации расчета критериев технологической сложности. Это можно объяснить тем, что их целью работы были новые методы взаиморасчетов и мотивации сотрудников промышленных предприятий. Критерии конструктивной сложности рассматривались в качестве экспертно определяемых количества измерений по заданным характеристикам. Анализ также выявил, в разработанных методиках нет единого подхода к описанию характеристик конструктивной сложности определяемых автоматическим путем по ЭМИ без привлечения экспертных знаний. Можно сделать вывод, что в области методик расчета трудоемкости изготовления изделий актуальна проблема автоматического (без привлечения человеческого труда) расчета их конструктивной сложности и решение данной проблемы относится к информационно-телекоммуникационным технологиям в авиационных и ракетно-космических системах.

### **Постановка задачи**

В данной статье описан инвариантный метод определения сложности геометрии ЭМИ в автоматическом режиме. Суть метода состоит в следующем: по анализу ЭМИ и её дерева построения пересчитать все общие критерии, влияющие на сложность геометрии изделия, и на основе таблиц соответствия рассчитать локальные критерии сложности геометрии ЭМИ. Далее осуществить скаляризацию вектора локальных критериев в единый критерий сложности ЭМИ.

Анализ методов построения ЭМИ в системах твердотельного моделирования показал следующие:

1. Существует деление на две сущности с разными локальными критериями – сборочные единицы и детали;
2. Для деталей, построенных в системах твердотельного моделирования, определены 10 локальных критериев;
3. Для сборочных единиц, построенных в системах твердотельного моделирования, определены 4 локальных критерия;
4. Сложность геометрии сборочной единицы зависит от сложности и количества деталей и подборок, входящих в нее;
5. Сложность геометрии детали не зависит от сложности геометрии сборочной единицы.

Эти данные демонстрируют, что определение единого критерия сложности геометрии ЭМИ есть сложная многокритериальная задача. Ее в общем виде можно сформулировать так: определить единый критерий сложности геометрии ЭМИ, состоящий из локальных критериев сборочных единиц и деталей.

В общем виде единый критерий (1) представлен как:

$$q_0(x) = q_0((q_1(x), q_2(x), \dots, q_n(x),)) \quad (1)$$

Единый критерий позволяет упорядочить альтернативы по величине  $q_0$ , выделив тем самым наилучшую (в смысле этого критерия). Вид функции  $q_0$  определяется тем, как конкретно будет представлен вклад каждого критерия в суперкритерий. Так как существует логическое разделение на сборочные единицы и детали со своими собственными локальными критериями, целесообразно разделить задачу на определение каждого из двух единых критериев, сборочные единицы -  $X_a$  и детали  $X_d$ .

Исходя из данного подхода математической постановкой задачи работы является скаляризация локальных критериев в суперкритерий.

Для сборки (2):

$$X_a = \mathit{argmax} (q_0(q_1(x), q_2(x), q_3(x), q_4(x))), \quad (2)$$

$$X_a \in [1..10], q_i \in [1..10]$$

где:

- q1 - Критерий количества деталей в сборочной единицы;
- q2 - Критерий количества подборок в сборочной единицы;
- q3 - Количество экземпляров в сборке;
- q4 - Средний критерий сложности каждой детали и подборок, входящих в сборочную единицу.

Для детали (3):

$$x_d = \mathit{argmax} (u_0(u_1(x), u_2(x), u_3(x), u_4(x), \dots) \quad (3)$$

$$(\dots, u_5(x), u_6(x), u_7(x), u_8(x), u_9(x), u_{10}(x)))$$

$$x \in [1..10] u_i \in [1..10]$$

где:

- u1 - Критерий элементарных поверхностей;
- u2 - Критерий элементарных Блоков;
- u3 - Критерий Поверхностей перемещенных по направлению;
- u4 - Критерий Поверхностей, полученных вращением кривой вокруг оси;
- u5 - Критерий Поверхностей, полученных, перемещением кривой вдоль направляющей кривой;
- u6 - Критерий прямых линий;
- u7 - Критерий конических сечений;
- u8 - Критерий интерполяционных кривых;
- u9 - Критерий ограничений формы поверхностей;
- u10 - Критерий тел заданных в граничном представлении (B-rep).

### Механизм расчета локальных критериев

Лучшими показателями сложности геометрии изделия является трудоемкость оформления по ней чертежа. В данной работе под трудоемкостью оформления понимается следующее: это параметр, напрямую связанный с тем количеством размеров, которое необходимо поставить на чертеже в процессе его оформления. С качественной точки зрения получается следующее: чем больше нам необходимо ставить размеров на чертеже тем сложнее геометрия изделия. Именно такой принцип был принят при расчете локальных критериев деталей и сборок ЭМИ.

Для дальнейшего описания необходимо привести описание сущностей, вводимых в методике (рис. 1).

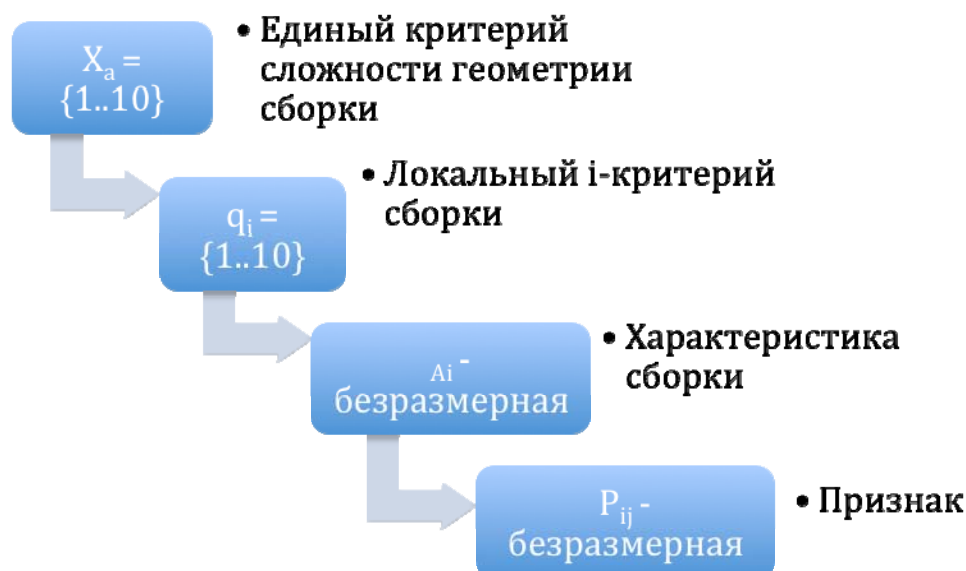




Рис. 1. Основные сущности примененные в методике.

Вводятся следующие 3 понятия:

*Локальный критерий* – логическая переменная сложности, которая может принимать 10 логических значений. Измеряется в целых числах от 1 до 10.

*Характеристика* – величина, полученная на основе анализа сборочной единицы или детали. Может быть как безразмерной, так и иметь единицы измерения. Данная величина это только целое число, так как описывается с количеством искомых параметров детали или сборочной единицы.

*Признак* – метод поиска и расчета характеристики. Так как существует масса методов математического и программного описания одной и той же сущности, необходимо иметь разные методы их расчёта. Например, интерполяционная кривая, нарисованная на обычном листе, имеет лишь характеристики, но такая кривая, реализованная на компьютере может быть линией Безье, В-сплайном и т.д., но визуально выглядит одинаково, а программный код разный. Именно для этого и вводится понятие – признак.

### Методика расчет вектора локальных критериев для сборочных единиц

Вектором локальных критериев сборочных единиц называется одномерная матрица, состоящая из 4 значений локальных критериев (4):

$$\{q_1; q_2; q_3; q_4\} \quad (4)$$

В общем виде расчет локального критерия сборки (5) представлен как зависимость

$$q_i = \mathcal{F}(A_i, WA_i, C) \quad (5)$$

где:

$A_i$  – характеристика локального критерия. Безразмерная величина, определенная после анализа сборки;

$WA_i$  – эталонный интервал;

$C$  – категория по шкале от 1..10.

Методика расчета локальных критериев для сборки делится на следующие последовательные шаги:

Шаг 1. Анализ отчета BOM (спецификации) файла сборки;

Отчет BOM (Bill of Materials) – это перечень компонентов изделия с информацией о входимости деталей в сборку. Данный отчет формируется в любой современной PDM-системе автоматически по требованию. Под анализом BOM (спецификации) отчета понимается автоматический расчет характеристик  $A_i$ . Пример характеристика – количество деталей в сборке ( $A_1$ ) и определяется по формуле (6):

$$A_i = \sum_j^{j=1} P_{ij} \quad (6)$$

где:

$A_i$  – характеристика локального критерия  $q_i$ ;

$P_{ij}$  – признаки характеристики. Безразмерная величина. Для расчета характеристик сборочных единиц выявлено 4 признака. Для расчета характеристик  $A_i$  принимается следующая модель данных и терминов:

$A_1$  - Характеристика количества уникальных деталей в сборке;

$P_{11}$  - Признак количества уникальных деталей в сборке;

$A_2$  - Характеристика количества уникальных подборок в сборке;

$P_{21}$  - Признак количества уникальных подборок в сборке;

$A_3$  - Характеристика количества повторяющихся деталей и подборок в сборке;

$P_{31}$  - Признак количества повторяющихся деталей и подборок в сборке;

$A_4$  - Средняя характеристика сложности каждой детали и подборок входящих в сборку;

$P_{41}$  - Признак общей суммы сложности ЭМИ деталей и подборок входящих в сборку.

Шаг 2. Расчет локальных критериев сборочной единицы.

На основе характеристик  $A_i$  и таблицы эталонных интервалов ( $W$ ) присваивается категория сложности ( $C$ ) локальному критерию (7). Математически это можно записать следующим образом:

$$WA_i[C] \in A_i \quad (7)$$

Значение характеристики  $A_i$  принадлежит одному из эталонных интервалов  $W$  от 1 до 10, который, в свою очередь, имеет цифровое обозначение  $C$ . Таким образом получаем значения локального критерия  $u_i$  (8):

$$q_i = C \quad (8)$$

### Методика расчета вектора локальных критериев для деталей

Вектором локальных критериев детали называется одномерная матрица, состоящая из 10 значений локальных критериев:

$$\{u_1; u_2; u_3; u_4; u_5; u_6; u_7; u_8; u_9; u_{10}\} \quad (9)$$

В общем виде расчет локального критерия детали представлен (10) как зависимость:

$$u_i = \mathcal{F}(D_i, WD_i, C) \quad (10)$$

где:

$D_i$  – характеристика локального критерия; с качественной точки зрения означает, то количество размеров, которое необходимо поставить на чертеже;

$WD_i$  – эталонный интервал;

$C$  – категория по шкале от 1..10.

Методика расчета локальных критериев для детали делится на следующие последовательные шаги:

Шаг 1. Анализ STEP файла детали;

Геометрия любой детали и сборочных единиц описываются набором, параметрически заданных кривых и поверхностей. Современные системы автоматизированного проектирования оперируют сложнейшим программным ядром, которое реализует построение электронной модели изделия (ЭМИ) на экране компьютера. Файл детали состоит из управляющих команд к ядру САД-системы. Управляющая команда - это уникальный оператор определяющий действия, которые необходимо произвести с ДСЕ в системе автоматизированного проектирования. Выполнения всех

управляющих команд ядром САД-системы приводит к генерации геометрии твердотельных моделей на экране компьютера. Любая САПР оперирует собственным графическим языком программирования для формирования управляющих команд. Это приводит к несовместимости форматов данных между САПР системами. Для решения данной проблемы существуют нейтральные форматы данных, которые поддерживают большинство САПР в мире. К таким форматам относятся - STEP, IGES, VRML и др. Все нейтральные форматы исторически созданы для разных целей.

Для решения поставленной задачи в качестве основного стандарта параметризации геометрии деталей был выбран нейтральный формат STEP. К основным причинам такого выбора можно отнести следующие:

1) Данный формат является стандартом РФ ГОСТ Р ИСО 10303-42-2003 «Системы автоматизации производства и их интеграция. Представление данных об изделии и обмен этими данными. Часть 42. Протокол прикладной программы: Интегрированные родовые ресурсы. Геометрическое и топологическое представление»;

2) Данный формат данных поддерживают большинство современных САПР систем;

3) Формат представления данных поддается анализу (данные представлены в текстовом виде с понятными логическими ключами).

Анализ STEP файла – это автоматический пересчет величин характеристик  $D_i$  в твердотельной модели изделия. Пересчет выполняется по следующей формуле (11):

$$D_i = \sum_j^{j=1} L_{ij} \quad (11)$$

где:

$D_i$  – характеристика локального критерия  $u_i$ ;

$L_{ij}$  – метод поиска и расчет характеристики  $D_i$ . Для расчета характеристик детали выявлено 59 признаков.

Для расчета характеристик  $D_i$  принимается следующая модель данных и терминов:

D1 - Характеристика количества размеров элементарных поверхностей;

L11 - Признак плоскостей в геометрии детали;

L12 - Признак цилиндрических поверхностей в геометрии детали;

L13 - Признак конических поверхностей в геометрии детали;

L14 - Признак сферических поверхностей в геометрии детали;

L15 - Признак тороидальных поверхностей в геометрии детали;



- L16 - Признак вырожденных тороидальных поверхностей в геометрии детали;
- L17 - Признак циклидов в геометрии детали;
- L18 - Признак твердотельных цилиндров в геометрии детали;
- L19 - Признак твердотельных сфер в геометрии детали;
- L110 - Признак твердотельных усеченных конусов в геометрии детали;
- L111 - Признак твердотельных тороидов в геометрии детали;
- L112 - Признак твердотельных эллипсоидов в геометрии детали;
- L113 - Признак твердотельных сфер в CSG представлении в геометрии детали;
- L114 - Признак твердотельных усеченных конусов в CSG представлении геометрии детали;
- L115 - Признак твердотельных цилиндров в CSG представлении в геометрии детали;
- L116 - Признак твердотельных скошенных конусов в CSG представлении в геометрии детали;
- L117 - Признак твердотельных торов в CSG представлении в геометрии детали;
- L118 - Признак твердотельных эллипсоидов в CSG представлении в геометрии детали;
- L119 - Признак твердотельных циклидных сегментов в CSG в геометрии детали;
- D2 - Характеристика количества размеров элементарных блоков;
- L21 - Признак твердотельных параллелепипедов в геометрии детали;
- L22 - Признак твердотельных пирамид в геометрии детали;
- L23 - Признак твердотельных тетраэдров в геометрии детали;
- L24 - Признак твердотельных прямых равносторонних шестигранников в геометрии детали;
- L25 - Признак твердотельных параллелепипедов в CSG представлении в геометрии детали;
- L26 - Признак твердотельных пирамид в CSG представлении в геометрии детали;
- L27 - Признак твердотельных тетраэдров в CSG представлении в геометрии детали;
- L28 - Признак твердотельных прямых равносторонних шестигранников в CSG представлении в геометрии детали;
- L29 - Признак твердотельных многогранников в CSG представлении в геометрии детали;
- D3 - Характеристика количества размеров поверхностей перемещенных по направлению;

- L31 - Признак твердотельных тел полученных перемещением ограниченной плоскости по направлению в геометрии детали;
- L32 - Признак твердотельных тел полученных перемещением плоского эскиза в геометрии детали;
- D4 - Характеристика количества размеров поверхностей полученных вращением кривой вокруг оси;
- L41 - Признак твердотельных тел, полученных вращением кривой вращением вокруг оси;
- L42 - Признак твердотельных тел, сформированные вращением плоского эскиза вокруг оси;
- L43 - Признак твердотельных тел, сформированные вращением вокруг оси плоской ограниченной поверхности;
- D5 - Характеристика количества размеров поверхностей полученных перемещением кривой вдоль направляющей кривой;
- L51 - Признак твердотельных тел, полученных перемещением кривой вдоль направляющей кривой;
- L52 - Признак твердотельных тел, которые являются результатом протягивания плоского эскиза по направляющей кривой;
- L53 - Признак твердотельных тел, которые являются результатом протягивания плоской ограниченной поверхности по направляющей кривой;
- L54 - Признак твердотельных тел, полученных перемещением круглого диска вдоль трехмерной кривой;
- D6 - Характеристика количества размеров прямых линий;
- L61 - Признак линий;
- L62 - Признак плоских прямоугольников;
- L63 - Признак плоских многогранников;
- D7 - Характеристика количества размеров кривых, образованные коническими сечениями;
- L71 - Признак плоских окружностей;
- L72 - Признак плоских эллипсов;
- L73 - Признак плоских гипербол;
- L74 - Признак плоских парабол;
- L75 - Признак плоских спиралей;
- L76 - Признак плоских эвольвент;
- L77 - Признак плоских окружностей CSG представлении;

- L78 - Признак плоских эллипсов CSG представлении;
- D8 - Характеристика количества размеров интерполяционных кривых;
- L81 - Признак плоских полиномиальных кривых;
- L82 - Признак неоднородных B-сплайн кривых;
- L83 - Признак однородных B-сплайн кривых;
- L84 - Признак квазиоднородных B-сплайн кривых;
- L85 - Признак плоских кривых Безье;
- L86 - Признак плоских рациональных B-сплайн кривых;
- L87 - Признак обрезанных кривых;
- L88 - Признак трехмерных интерполяционных кривых;
- L89 - Признак неоднородных B-сплайн поверхностей;
- L810 - Признак однородных B-сплайн поверхностей;
- L811 - Признак квазиоднородных B-сплайн поверхностей;
- L812 - Признак поверхностей Безье;
- L813 - Признак рациональных B-сплайн поверхностей.
- D9 - Характеристика количества размеров ограничений формы поверхностей;
- L91 - Признак прямоугольно обрезанных поверхностей;
- L92 - Признак поверхностей, ограниченных криволинейными границами;
- D10 - Характеристика количества размеров тел заданных в граничном представлении (B-rep);
- L101 - Признак тел заданных методом «Path»;
- L102 - Признак петель с прямыми ребрами;
- L103 - Признак ребер каркасных оболочек;

Пример анализа твердотельной модели продемонстрирован на рис. 2.

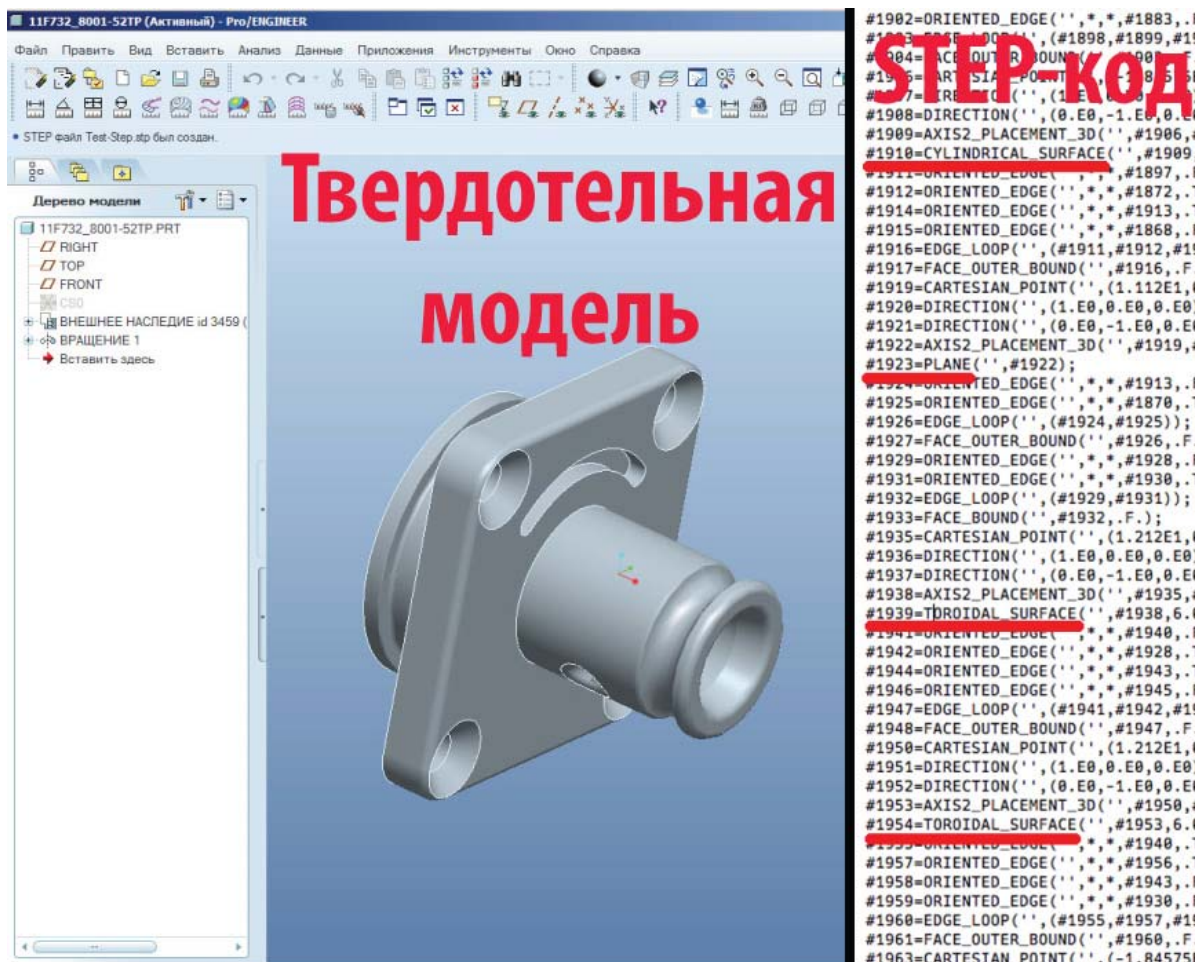


Рис. 2. Твердотельная модель детали и ее интерпретация в STEP коде. На рисунке помечены признаки, которые пересчитываются в автоматическом режиме.

Шаг 2. Расчет вектора локальных критериев детали.

На основе характеристик  $D_i$  и таблицы эталонных интервалов ( $WD_i$ ) присваивается категория сложности ( $C$ ) локальному критерию. Математически это можно записать (12) следующим образом:

$$WD_i[C] \in D_i \quad (12)$$

Значение характеристики  $D_i$  принадлежит одному из эталонных интервалов  $WD_i$  от 1 до 10, который, в свою очередь, имеет цифровое обозначение  $C$ . Таким образом, получаем (13) значения локального критерия  $u_i$ :

$$u_i = C \quad (13)$$

*Примечание:* Эталонные интервалы  $WA_i$  и  $WD_i$  - экспертно рассчитанные 10 интервалов значений характеристик для типовых изделий предприятия. Для расчета эталонных интервалов применяется методика эталонных интервалов или, другими словами, методика внедрения единого критерия сложности ЭМИ в работу предприятий.

Данный метод расчета дает численную оценку локальных критериев сборочных единицы и детали, при этом значения, которые могут принимать локальные критерии, четко определены границами логической переменной сложности (см. таблица 1).

### **Скаляризация вектора локальных критериев сборочной единицы и детали в единый критерий сложности ЭМИ**

Для получения единого критерия сложности ЭМИ необходимо выполнить сведение вектора локальных критериев сборочной единицы и детали. В задачах скаляризации важным аспектом является степень влияния каждого локального критерия на общий критерий в целом. Следовательно, единый критерий сборочных единиц (14) и детали (15) рассчитывается по следующим формулам:

$$X_a = \sum_{i=1}^4 q_i \alpha_i \quad (14)$$

где

$X_a$  – единый критерий сложности геометрии сборочной единицы;

$q_i$  – значение локального критерия сборочной единицы;

$\alpha_i$  – весовой коэффициент степени влияния локального критерия на единый критерий сложности сборки.

$$X_d = \sum_{i=1}^{13} u_i \beta_i \quad (15)$$

где

$X_d$  – единый критерий сложности геометрии детали;

$q_i$  – значение локального критерия сборки;

$\beta_i$  – весовой коэффициент степени влияния локального критерия на единый критерий сложности сборки.

Принимаются следующие весовые коэффициенты для сборки:

$$\alpha_1 = 0, 2; \alpha_2 = 0, 25; \alpha_3 = 0, 15; \alpha_4 = 0, 4.$$

Принимаются следующие весовые коэффициенты для детали:

$$\beta_1 = 0,1; \beta_2 = 0,1; \beta_3 = 0,1; \beta_4 = 0,1; \beta_5 = 0,1.$$

$$\beta_6 = 0,1; \beta_7 = 0,1; \beta_8 = 0,1; \beta_9 = 0,1; \beta_{10} = 0,1.$$

Весовые коэффициент степени влияния локального критерия на единый критерий сложности ЭМИ помогают тонко настроить методику применительно к специфике производства.

### **Расчет эталонных интервалов (адаптация методики на предприятии)**

Любое промышленное предприятие является уникальным. Производимые продукты, специфика производства, персонал и применяемые технологии - подтверждают этот факт. Двух полностью одинаковых предприятий не существует. Основные причины различий связаны напрямую с изделиями, которые они производят. Например, изделие алюминиевый профиль различных конфигураций, широко представленный сегодня на рынке. Для предприятий, которые производят алюминиевые профили, все варианты профилей будут различаться по сложности. Есть профили, которые они считают простыми, есть которые сложными. Но если такие профили будет рассматривать предприятия аэрокосмической отрасли, данные профили будут простым без дополнительной градации. Это связано с тем, что аэрокосмическая отрасль работает с очень сложными ДСЕ.

Следовательно, актуальной является задача создание методики расчета сложности ЭМИ адаптируемой под специфику производимой продукции на предприятии.

Для решения данной задачи необходимо описать методику адаптации технологии расчета сложности ЭМИ в инфраструктуру предприятия.

Для дальнейшего описания необходимо ввести следующие определения:

**Критерий сложности ЭМИ** – это логическая переменная, которая может принимать логические значения, приведенные в таблице 1.

Таблица 1.

<b>Логическое значение</b>	<b>Цифровое обозначение</b>
Элементарная	1
Очень простая	2
Простая	3
Нормальная	4
Умеренная	5
Сложная	6
Сверх-сложная	7

Гипер-сложная	8
Определённо высокая	9
Неопределённо высокая	10

Например, после расчета единого критерия сложности геометрии детали, мы получаем значение – 5. Логически выбор алгоритма методики означает: сложность геометрии детали – умеренная. Цифровое обозначения удобно для автоматизации данной методики, а логическое значения для пользователей.

**Эталонный интервал** – это интервал характеристик ДСЕ, рассчитанный на основе характерных изделий предприятия.

Определение эталонного интервала для деталей (16):

$$D_i C_j = [\min D_i C_j \quad \dots \quad \max D_i C_j] \quad (16)$$

где:

$\min D_i C_j$  – Минимальное значения эталонного интервала для детали;

$\max D_i C_j$  – Максимальное значения эталонного интервала для детали;

$i$  – может принимать значения от 1 до 10;

$j$  – может принимать значения от 1 до 10.

Определение эталонного интервала для сборочных единиц (17):

$$A_i C_j = [\min A_i C_j \quad \dots \quad \max A_i C_j] \quad (17)$$

где:

$\min A_i C_j$  – Минимальное значения эталонного интервала для детали;

$\max A_i C_j$  – Максимальное значения эталонного интервала для сборочной единицы;

$i$  – может принимать значения от 1 до 4;

$j$  – может принимать значения от 1 до 10.

Таблица эталонных интервалов детали - двухмерная матрица WD, формата (18):

$$\begin{pmatrix} D_1 C_1 & D_2 C_1 & \dots & D_l C_1 \\ D_1 C_2 & D_2 C_2 & \dots & D_l C_2 \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ D_1 C_j & D_2 C_j & \dots & D_l C_j \end{pmatrix} \quad (18)$$

Таблица Эталонных интервалов сборочной единицы - двумерная матрица двумерная матрица WA, формата (19):

$$\begin{pmatrix} A_1 C_1 & A_2 C_1 & \dots & A_l C_1 \\ A_1 C_2 & A_2 C_2 & \dots & A_l C_2 \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ A_1 C_j & A_2 C_j & \dots & A_l C_j \end{pmatrix} \quad (19)$$

Общая схема алгоритма методики расчета эталонных интервалов состоит из следующих шагов:

1. Выбор характерных сборочных единиц;
2. Экспертный анализ сборочных единиц;
3. Группировка уникальных деталей;
4. Расчет характеристик сложности ЭМИ детали;
5. Расчет таблицы эталонных интервалов детали;
6. Расчет единого критерия сложности ЭМИ для детали;
7. Расчет характеристик сложности геометрии ЭМИ сборочных единиц;
8. Расчет таблицы эталонных интервалов сборочных единиц.

Шаг 1. Выбор характерных сборочных единиц.

Экспертным путем необходимо определить минимум 8 характерных сборочных единиц предприятия различной сложности. Для каждой категории сложности должно быть выбрано минимально по одной сборочной единице. Экспертным путем необходимо присвоить уникальным сборочным единицам на всех уровнях входимости логическое значение сложности ЭМИ от 1 до 8 (20).

$$NA = CE \quad (20)$$

Где

**NA** – конструкторское обозначение, выбранной характерной сборочной единицы;



**CE** – Категория сложности сборочной единицы присвоенная экспертным путем.

Выбор осуществляется в соответствии с логическими значения переменной сложности ЭМИ. Например, для самой легкой на предприятии сборочной единице будет присвоена категория 1 - Элементарная. Для самой тяжелой на предприятии сборочной единице будет присвоена категория 8 - Гипер-сложная.

Шаг 2. Экспертный анализ сборочных единиц.

Для каждой сборочной единицы рассчитать количество уникальных деталей на всех уровнях входимости. Определить все экземпляры на всех уровнях входимости. Экспертным путем необходимо присвоить уникальным деталям логическое значение сложности ЭМИ от 1 до 8 (21).

$$ND = CE \quad (21)$$

Где

**ND** – Порядковый номер или конструкторское обозначение уникальной детали;

**CE** – Категория сложности детали присвоенная экспертным путем.

Шаг 3. Группировка уникальных деталей.

Выполнить группировку уникальных деталей, определенных на шаге 2, по категориями сложности.

Шаг 4. Расчет характеристик сложности геометрии ЭМИ детали.

Выполнить автоматический анализ сложности геометрии ЭМИ. Результаты представить для каждой уникальной детали в таблице 2 следующего формата:

Таблица 2

ND	CE	D1	D2	...	Di
----	----	----	----	-----	----

Шаг 5. Расчет таблицы эталонных интервалов детали.

Выполнить автоматический расчет эталонных интервалов для таблицы соответствия детали. Расчет эталонного интервала осуществляется по следующим формулам:

Для категории сложности 1:

Для категории сложности 1 минимальным значением эталонного интервала будет минимальное значение характеристики Di среди группы уникальных деталей со значением CE=1. Математически можно записать следующим образом (22):

$$\mathit{min}D_iC_1 = \mathit{min}D_i(CE_1) \quad (22)$$

Для категории сложности 1 максимальным значением эталонного интервала будет максимальное значение характеристики  $D_i$  среди группы уникальных деталей со значением  $CE=1$  (23).

$$\mathit{max}D_iC_1 = \mathit{max}D_i(CE_1) \quad (23)$$

Для категорий сложности 2-8:

Для категории сложности от 2 до 8 включительно минимальным значением эталонного интервала будет максимальное значение эталонного интервала предыдущей категории сложности плюс 1 (24):

$$\mathit{min}D_iC_j = \mathit{max}D_iC_{j-1} + 1 \quad (24)$$

$$j \in [2..8]$$

Для категории сложности от 2 до 8 включительно максимальным значением эталонного интервала будет максимальное значение характеристики  $D_i$  среди группы уникальных деталей со значением  $CE=j$  (25).

$$\mathit{max}D_iC_j = \mathit{max}D_i(CE_j) \quad (25)$$

$$j \in [2..8]$$

Для категории сложности 9:

Для категории сложности 9 минимальным значением эталонного интервала будет максимальное значение эталонного интервала сложности 8 плюс 1 (26):

$$\mathit{min}D_iC_9 = \mathit{max}D_iC_8 + 1 \quad (26)$$

Для категории сложности 9 максимальным значением эталонного интервала будет минимальное значение эталонного интервала категории 9 умноженное на ставку определенности (27):

$$\mathit{max}D_iC_9 = \mathit{min}D_iC_9 * S \quad (27)$$

S – ставка определенности. Стандартная ставка принята S=1,3. Ставка определенности используется для адаптации методики на предприятие.

Для категории сложности 10:

Для категории сложности 10 минимальным значением эталонного интервала будет максимальное значение эталонного интервала сложности 9 плюс 1 (28):

$$\mathit{min}D_iC_{10} = \mathit{max}D_iC_9 + 1 \quad (28)$$

Для категории сложности 10 максимальным значением эталонного интервала будет бесконечность (28):

$$\mathit{max}D_iC_{10} = +\infty \quad (28)$$

Шаг 6. Расчет единого критерия сложности для деталей.

Выполнить автоматический расчет единого критерия сложности (C) для деталей.

Шаг 7. Расчет характеристик сложности геометрии ЭМИ сборочных единиц.

Выполнить автоматический анализ сложности геометрии ЭМИ сборочных единиц. При этом рассчитываются характеристики сборочных единиц на всех уровнях входимости. Результаты представить для каждой сборочной единицы в таблице 3 следующего формата:

Таблица 3

NA	CE	A1	A2	...	Ai
----	----	----	----	-----	----

Шаг 8. Расчет таблицы эталонных интервалов сборочной единицы.

Выполнить автоматический расчет эталонных интервалов для таблицы соответствия сборочной единицы. Расчет эталонного интервала осуществляется по следующим формулам:

Для категории сложности 1:

Для категории сложности 1 минимальным значением эталонного интервала будет минимальное значение характеристики Ai среди группы уникальных сборочных единиц со значением CE=1. Математически можно записать следующим образом (29):

$$\mathit{min}A_iC_1 = \mathit{min}A_i(CE_1) \quad (29)$$

Для категории сложности 1 максимальным значением эталонного интервала будет максимальное значение характеристики Ai среди группы уникальных сборочных единиц со значением CE=1 (30).

$$\mathit{max}A_iC_1 = \mathit{max}A_i(CE_1) \quad (30)$$

Для категорий сложности 2-8:

Для категории сложности от 2 до 8 включительно минимальным значением эталонного интервала будет максимальное значение эталонного интервала предыдущей категории сложности плюс 1 (31):

$$\mathbf{minA_iC_j = maxA_iC_{j-1} + 1} \quad (31)$$

$$\mathbf{j \in [2..8]}$$

Для категории сложности от 2 до 8 включительно максимальным значением эталонного интервала будет максимальное значение характеристики Di среди группы уникальных сборочных единиц со значением CE=j (32).

$$\mathbf{maxA_iC_j = maxA_i(CE_j)} \quad (32)$$

$$\mathbf{j \in [2..8]}$$

Для категории сложности 9:

Для категории сложности 9 минимальным значением эталонного интервала будет максимальное значение эталонного интервала сложности 8 плюс 1 (33):

$$\mathbf{minA_iC_9 = maxA_iC_8 + 1} \quad (33)$$

Для категории сложности 9 максимальным значением эталонного интервала будет минимальное значение эталонного интервала категории 9 умноженное на ставку определенности (34):

$$\mathbf{maxA_iC_9 = minA_iC_9 * S} \quad (34)$$

S – ставка определенности. Стандартная ставка принята S=1,3. Ставка определенности используется для адаптации методики на предприятии.

Для категории сложности 10:

Для категории сложности 10 минимальным значением эталонного интервала будет максимальное значение эталонного интервала сложности 9 плюс 1 (35):

$$\mathbf{minA_iC_{10} = maxA_iC_9 + 1} \quad (35)$$

Для категории сложности 10 максимальным значением эталонного интервала будет бесконечность (36):

$$\max A_1 C_{10} = +\infty \quad (36)$$

Предложенный выше алгоритм настройки методики расчета сложности геометрии ЭМИ решает задачу адаптации решения в зависимости от специфики выпускаемой продукции на предприятии. В расчете эталонных интервалов принимают участие эксперты со стороны предприятия, что позволяет достичь точных значений. Эталонные интервалы с течением времени могут быть откорректированы, для этого нужно повторить алгоритм настройки. Все действия по экспертной оценке могут быть проведены методом опроса большой группы экспертов. Данная методика может быть автоматизирована технологией электронных таблиц MS Excel без дополнительного программирования. Для автоматической настройки методики целесообразно использовать технологию хранения состава изделия в PDM-системе.

### **Выводы**

1. Анализ методов построение электронной модели изделия в системах твердотельного моделирования показал следующее:
  - Существует деление на две сущности с разными локальными критериями – сборочные единицы и детали;
  - Для деталей построенных к системам твердотельного моделирование выявлены 10 локальных критериев;
  - Для сборочных единиц, построенных к системам твердотельного моделирование выявлены 4 локальных критерия;
  - Сложность геометрии сборочной единицы зависит от сложности и количества деталей, входящих в нее.
  - Сложность геометрии детали не зависит от сложности геометрии сборки.
2. Описан инвариантный метод определения сложности геометрии ЭМИ в автоматическом режиме;
3. Для автоматизации методике определения сложности ЭМИ введены 4 типа сущностей:
  - Единый критерий сложности ЭМИ;
  - Локальный критерий сложности ЭМИ;
  - Характеристика;
  - Признак.
4. Разработан математический аппарат по расчету локальных критериев сборочных единиц и деталей;
5. Для расчета характеристик сборочных единиц выявлено 4 признака. Разработан математический аппарат расчета характеристик сборочных единиц;

6. Для расчета характеристик детали выявлено 59 признаков. Разработан математический аппарат расчета характеристик детали;
7. Для обеспечения внедрения единого критерия сложности геометрии ЭМИ в работу промышленных предприятий, разработан математический аппарат методики «эталонных интервалов». Данная методика должна применяться для настройки единого критерия сложности ЭМИ в зависимости от специфики, выпускаемой продукции предприятием;
8. Разработан математический аппарат по расчету единого критерия сложности ЭМИ для сборочных единиц и деталей.

Предложенный в данной статье инвариантный метод расчета единого критерия сложности геометрии ЭМИ реализуется в современных информационных системах в автоматическом режиме, т.е. без участия человека. На основе приведенного критерия возможна реализация большого количества потоков работы в КТПП машиностроительных предприятий авиакосмической отрасли. Применение единого критерия сложности ЭМИ позволит увеличить скорость КТПП предприятиям, разрабатывающим и производящим, сложную наукоёмкую продукцию.

*Работа выполнена при финансовой поддержке ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 годы по лоту «Проведение научных исследований коллективами научно-образовательных центров в области конструирования летательных аппаратов и авиационных материалов» гос. контракт № 02.740.11.0504 от 16 марта 2010 года, а также Совета по грантам Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых и по государственной поддержке ведущих научных школ код проекта НШ-64683.2010.8.*

### **Библиографический список**

1. Комаров Ю.Ю., Новиков О.А., «Формализованное описание проектных задач технологичной подготовки машиностроительного производства» журнал «Прикладная Геометрия, Инженерная Графика, Компьютерный Дизайн».
2. Братухин А.Г., Давыдов Ю.В., Елисеев Ю.С., Павлов Ю.Б., Суров В.И., «CALS в авиастроении», Изд-во МАИ, 2000.
3. Р.А. Бирбраер, И.Г. Альтшулер «Основы инженерного консалтинга»: Технология, экономика, организация. М.: Дело. 2007. – 232с.
4. David E. Weisberg. The Engineering Design Revolution. <http://www.cadhistory.net/>
5. Ли К., «Основы САПР (CAD/CAM/CAE)», СПб.: Питер, 2004 – 560 с.:ил.
6. ISO 10303-42:1994/Cor.3:2001 «Industrial automation systems and integration. Product data representation and exchange. Part 42. Integrated generic resources: Geometric and topological representation. Technical Corrigendum 3», 12.07.2001.

7. Козаченко Д.А., Григорьев Е.В., Бодрышев В.В., Методика определения сложности геометрии электронной модели изделия, журнал «Вестник Московского авиационного института», номер 2, том 18, год: 2011;
8. Козаченко Д.А., Григорьев Е.В., Бодрышев В.В., Методология поискового проектирования как развитие концепции CALS, журнал «Вестник Московского авиационного института», номер 2, том 18, год: 2011;
9. Dmitry A Kozachenko, Denis F. Tolstov. PLM system's implementation project at IG UPEK company Episode 3. Windchill and Vertical systems integration at the stage of production planning automation, International professional magazine «CAD/CAM/CAE Observer», Release #3(63)/2011 page 29, CAD/CAM Media Publishing:2011.
10. Dmitry A Kozachenko, Pavel V. Strelkov. PLM system's implementation project at IG UPEK company Episode 4. PDM-ERP integration – everybody speaks about it, but very few has seen it, International professional magazine «CAD/CAM/CAE Observer», Release #5(65)/2011 page 20, CAD/CAM Media Publishing:2011.

Авторы:

Козаченко Дмитрий Александрович, аспирант Московского авиационного института (национальный исследовательский университет).

МАИ, Волоколамское ш., 4, Москва, А-80, ГСП-3, 125993;

тел.: (916) 752-0553; e-mail: [kozachenko@me.com](mailto:kozachenko@me.com)

Григорьев Евгений Вячеславович, аспирант Московского авиационного института (национальный исследовательский университет).

МАИ, Волоколамское ш., 4, Москва, А-80, ГСП-3, 125993;

тел.: (926) 565-20-95; e-mail: [grif8686@mail.ru](mailto:grif8686@mail.ru)

Бодрышев Валерий Васильевич, доцент Московского авиационного института (национальный исследовательский университет), к.т.н.

МАИ, Волоколамское ш., 4, Москва, А-80, ГСП-3, 125993;

тел.: (499) 158-41-23; e-mail: [soplom@mail.ru](mailto:soplom@mail.ru)