

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФГБОУ ВПО МОСКОВСКИЙ АВИАЦИОННЫЙ ИНСТИТУТ  
(национальный исследовательский университет) «МАИ»

На правах рукописи  
УДК: 629.7.004.9

КОЗАЧЕНКО  
ДМИТРИЙ АЛЕКСАНДРОВИЧ

**МЕТОДИКА АВТОМАТИЗИРОВАННОГО  
ОПРЕДЕЛЕНИЯ СЛОЖНОСТИ ГЕОМЕТРИИ  
ЭЛЕКТРОННОЙ МОДЕЛИ ИЗДЕЛИЯ**

Специальность 05.13.12  
«Системы автоматизации проектирования»  
(авиационная и ракетно-космическая техника)

Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Москва – 2012

Работа выполнена в ФГБОУ ВПО Московском авиационном институте (национальном исследовательском университете) на кафедре 904 «Инженерная графика»

Научный руководитель - кандидат технических наук, доцент кафедры 904 ФГБОУ ВПО «МАИ» **Бодрышев В.В.**

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор кафедры 203 ФГБОУ ВПО «МАИ» **Абашев В.М.;**

кандидат технических наук, доцент кафедры «Приборостроение» ФГБОУ ВПО "КГТА им. В.А. Дегтярева", начальник научно-исследовательской лаборатории **Багаев Д.В.**

Ведущая организация - ОАО РКК “Энергия” им. С.П. Королева

Защита состоится « 30 » мая 2012 г. в 13:00 часов на заседании диссертационного Совета Д 212.125.13 Московского авиационного института (национального исследовательского университета) по адресу 125993, Москва, Волоколамское шоссе, д.4, главный административный корпус, зал заседания ученого Совета.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВПО «МАИ».

Автореферат разослан «    » \_\_\_\_\_ 2012 г.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность проблемы.** Самым ответственным этапом выполнения проекта является стадия конструкторской подготовки производства изделия, именно на ней решаются многие финансовые и технические вопросы, совершаются самые грубые ошибки. С целью предотвращения подобных ошибок в процессе разработки, производства и эксплуатации изделий—промышленные предприятия перешли на PLM ориентированную стратегию в области внедрения информационных технологий. Одной из проблем для построения эффективного PLM-решения являются устаревшие методы работы, основанные на бумажном документообороте. Часто происходит ситуация, когда предприятие потратило огромные усилия и средства на внедрение PLM-решения, но не получает требуемого эффекта от этих действий. Основной причиной являются специализированные методики расчета различных технико-экономических параметров, влияющие на функционирование промышленного предприятия в целом.

Одним из таких параметров является трудоемкость изготовления изделий, на основе которого предприятия производят трудовое нормирование. В основе трудоемкости изготовления изделия лежит расчет конструктивно-технологической сложности (КТС) изделия. Значительный вклад в изучение и анализ сложных систем внесли такие ученые как: Н.П. Бусленко, Дж. Касти, Дж. Клир, А.Н. Колмогоров, Г.Н. Поваров, И. Пригожин, Т. Саати, Г. Саймон, Д. Сэвидж, Г. Хакен и др. Фундаментальные исследования в области теории сложности машиностроительного изделия проверили Б.А. Якимович, А.И. Коршунов, А.П. Кузнецов, Ю.С. Шарин, В.Г. Толмачев, В.А. Саранчин, А.С. Широбоков, А.В. Саранчин.

На основе проведенного анализа методик и автоматизированных систем расчета КТС критерии, влияющие на трудоемкость изготовления, делятся на две группы: 1) *критерии конструктивной сложности*; 2) *критерии технологической сложности*. В исследуемых работах уделялось больше внимания автоматизации расчета критериев технологической сложности, а критерии конструктивной сложности рассматривалась в качестве экспертно-определяемых характеристик Деталей и Сборочных Единицы (ДСЕ). Анализ также выявил, в разработанных методиках нет единого подхода к описанию характеристик конструктивной сложности, определяемых автоматизированным путем.

Анализ методик расчета КТС изделий убеждает в **актуальности проблемы** автоматизации (без привлечения человеческого труда) расчета критерия конструктивной сложности. Решение данной проблемы относится к информационно-телекоммуникационным технологиям в авиационных и ракетно-космических системах.

Для поиска способов решения проблемы произведен анализ методологий и теоретических основ систем разработки изделий авиационных предприятий, представленных в работах: А.Г. Братухина, Ю.В. Давыдова, Ю.С. Елисеева, Ю.Б. Павлова, В.И. Сурова, Д. Левина, В.Малюха, Д. Ушакова, Ли К., Аверчинкова В.И., Камаева В.А, Р.А. Бирбраера, И.Г. Альтшулера , В.Г. Елиферова, В.В.Репина, Майкла Дж. Д. Саттона и др.

Анализ работ в направлении информационных технологий подтверждает необходимость разработки рекомендаций и подходов к созданию информационного комплекса, обеспечивающего инвариантный метод расчета конструктивной сложности изделия. При этом необходимо определять единый показатель конструктивной сложности, выраженный в понятных человеку логических терминах. За основными показателями конструктивной сложности принимается геометрия детали и топологические связи изделия. При этом алгоритм расчета конструктивной сложности должен внедряться в бизнес-процессы, инфраструктуру проектных и машиностроительных предприятий авиакосмической отрасли, и быть экспертно независимым.

**Цель работы.** Целью диссертационной работы является разработка научно-методического обеспечения автоматизированного определения единого критерия сложности геометрии электронной модели изделия (ЭМИ), а также разработка методических рекомендаций по внедрению и применению предложенного единого критерия сложности в работе проектных и промышленных предприятий.

Достижение поставленной цели диссертационной работы осуществлено на основе решения следующих задач:

1. анализа влияния основных методов создания ЭМИ, с целью выявления основных критериев влияющих на сложность геометрии деталей и сборочных единиц (ДСЕ);
2. разработке математического аппарата по расчету единого критерия сложности геометрии ДСЕ;
3. разработке математического аппарата по адаптации единого критерия сложности геометрии ЭМИ на предприятии;
4. разработке методических рекомендаций по автоматизации процесса расчета единого критерия сложности ЭМИ;
5. выявлению технологических ограничений применимости автоматического метода расчета единого критерия сложности ЭМИ;
6. выполнению проектных исследований;
7. верификации алгоритма, на примере реализации бизнес-процесса «аутсорсинг чертежных работа» на основе автоматического расчета единого критерия сложности геометрии ЭМИ;
8. верификации алгоритма, на примере оптимизации бизнес-процесса «разработка УП и ТП для СЧПУ» на основе автоматического расчета единого критерия сложности геометрии ЭМИ.

**Методика исследования.** Декомпозиция задач, разработка сущностей и алгоритмов базируются на принципах системного подхода. Предметом исследования является автоматизация расчета конструктивной сложности изделия. В работе использованы методы теории систем, теории сложности машиностроительного изделия, методы комплексного исследования, включающего в себя теоретический анализ и экспериментальную проверку полученных результатов в производственных условиях. Математически задача поставлена, как задача многокритериальной оптимизации.

**Научная новизна.** Заключается в разработке новой методики оценки

сложности геометрии ЭМИ, внедрения единого критерия сложности геометрии ЭМИ в работе проектных и машиностроительных предприятий авиакосмической отрасли.

В ходе работы были получены следующие новые результаты:

- Выявлены 59 признаков, влияющих на сложность геометрии детали.;
- Выявлены 4 признака, влияющие на сложность геометрии сборочной единицы.
- Разработан математический аппарат многоуровневой последовательной скаляризации показателей сложности ДСЕ в единый критерий сложности.
- Разработан инвариантный алгоритм автоматического расчета единого критерия сложности геометрии ЭМИ. Методика расчета не зависит от системы твердотельного моделирования, в которой были разработаны электронные модели ДСЕ.
- Выявлены 7 технологических ограничений применимости методики.
- При реализации бизнес-процесса «аутсорсинг чертежных работ» на основе единого критерия сложности ЭМИ срок оформления КД сократился на 52%.
- При оптимизации бизнес-процесса «разработка УП и ТП для СЧПУ» на основе единого критерия сложности ЭМИ срок КТПП изделия сократился на 16%.

**Практическая ценность.** Предложенная в диссертационной работе математическая модель и алгоритм расчета единого критерия сложности ЭМИ позволяют автоматизировать различные процессы работ, выполняемые в электронном архиве технической документации и основанные на конструктивной сложности изделия. Использование единого критерия сложности приводит к переходу на безбумажные сетевые формы документооборота и интеграции САПР в общую архитектуру автоматизированной проектно-производственной среды. В качестве примера в работе приведены реализация процессов аутсорсинга чертежных работ и разработка управляющих программ для станков с ЧПУ на основе единого критерия сложности ЭМИ.

**Результаты работы** могут быть использованы:

- для автоматизации расчета трудоемкости изготовления изделия;
- для автоматизации планирования работ по проектам оформления конструкторской документации в зависимости от квалификации привлекаемого специалиста;
- для расчета стоимости реинжиниринга чертежей в ЭМИ;
- в технологических подразделениях машиностроительных предприятий аэрокосмической отрасли, для автоматического определения необходимости проведения предварительных испытаний управляющей программы для станков с ЧПУ.

**Внедрение результатов работы.** Разработанная методика автоматизированного расчета единого критерия сложности геометрии электронной модели изделия внедрена на заводе ОАО «Калужский Двигатель», в инженерных компаниях «АНХ-Инжиниринг» и «Про-Технолоджиз», что подтверждается соответствующими актами о внедрении.

**Публикации.** Основные теоретические положения и некоторые результаты исследования опубликованы автором в трех научных статьях, в рецензируемых научных журналах [1-3]. Описания применяемых технологий, опубликованы в работах [4, 5], а также содержатся в тезисах докладов на научно-технических конференциях всероссийского и международного значения.

**Структура и объем диссертационной работы.** Диссертационная работа состоит из введения, трех разделов, заключения, списка литературы (75 работ отечественных и зарубежных авторов) и четырех приложений. Общий объем диссертации – 165 страниц, включая 15 таблиц, 55 рисунков и 140 формул.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**В первой главе** проведен анализ СГМ при помощи, которых создается электронная модель изделия. Технологию проектирования на основе ЭМИ применяют огромное число проектных и машиностроительных предприятий ракетно-космической отрасли по все миру. Наибольшей востребованностью стали пользоваться системы твердотельного моделирования, так как содержат наиболее полное количество данных об изделии (геометрии, дереве построения, структуре).

В рамках дальнейшего исследования был произведен анализ основных методов создания трехмерной модели в системах твердотельного моделирования с целью выявления их влияния на сложность геометрии ЭМИ. Анализ методов построения электронной модели изделия в системах твердотельного моделирования показал следующее:

1. существует деление на две сущности с разными локальными критериями – сборочные единицы и детали;
2. для деталей, построенных в системах твердотельного моделирования, выявлены 10 локальных критериев;
3. для сборочных единиц выявлено 4 локальных критерия;
4. сложность геометрии сборочной единицы зависит от сложности и количества деталей, 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 многокритериальная задача. Ее в общем виде можно сформулировать так: определить единый критерий сложности геометрии ЭМИ, состоящий из локальных критериев сборочных единиц и деталей. Единый критерий позволяет упорядочить альтернативы по величине, выделив тем самым наилучшую (в смысле этого критерия). Вид функции определяется тем, как будет представлен вклад каждого критерия в суперкритерий. Существует логическое разделение на сборочные единицы и детали со своими собственными локальными критериями, поэтому целесообразно разделить задачу расчета на две части. Расчет единого критерия сложности ЭМИ сборочных единиц -  $X_a$  и деталей -  $X_d$ . Исходя из данного подхода, математической постановкой задачи исследования является скаляризация локальных критериев в суперкритерий.

Для сборочной единицы

$$X_a = \mathit{argmax} ((q_1(x), q_2(x), q_3(x), q_4(x))), \quad (1)$$
$$X_a \in [1..10], q_i \in [1..10]$$

где:

- $q_1$  - критерий количества деталей в сборочной единице;
- $q_2$  - критерий количества подборок в сборочной единице;
- $q_3$  - количество экземпляров в сборочной единице;
- $q_4$  - средний критерий сложности каждой детали и подборок, входящих в сборочную единицу.

Для детали

$$X_d = \mathit{argmax} ((u_1(x), u_2(x), u_3(x), u_4(x), \dots) \quad (2)$$
$$(\dots, u_5(x), u_6(x), u_7(x), u_8(x), u_9(x), u_{10}(x)),$$
$$X_d \in [1..10], u_i \in [1..10]$$

где:

- $u_1$  - критерий элементарных поверхностей;
- $u_2$  - критерий элементарных блоков;
- $u_3$  - критерий поверхностей, перемещенных по направлению;
- $u_4$  - критерий поверхностей, полученных вращением кривой вокруг оси;
- $u_5$  - критерий поверхностей, полученных перемещением кривой вдоль направляющей кривой;
- $u_6$  - критерий прямых линий;
- $u_7$  - критерий конических сечений;
- $u_8$  - критерий интерполяционных кривых;
- $u_9$  - критерий ограничений формы поверхностей;
- $u_{10}$  - критерий тел заданных в граничном представлении (B-гер).

**Вторая глава** посвящена математическому описанию инвариантного метода определения сложности геометрии ЭМИ в автоматическом режиме. **Суть метода** состоит в следующем: по анализу ЭМИ и её дерева построения пересчитать все общие характеристики, влияющие на сложность геометрии изделия, и на основе таблиц эталонных интервалов рассчитать локальные критерии сложности геометрии ЭМИ. Далее осуществить скаляризацию вектора локальных критериев в единый критерий сложности ЭМИ.

Представим выполненные последовательные шаги в сводной схеме. В качестве примера было выбрано изделие «Унифицированный агрегат стыковочный активный». Расчет выполнен на базе данных и ИТ-инфраструктуры ОАО РКК «Энергия» им. С.П. Королева (рисунок 1).

Для выполнения поставленной задачи создано математическое описание системы автоматического анализа геометрии ДСЕ. Под системой понимается реализация следующих методик: 1) расчет вектора локальных критериев ДСЕ; 2) расчет единого критерия сложности геометрии ЭМИ; 3) расчет «эталонных интервалов».

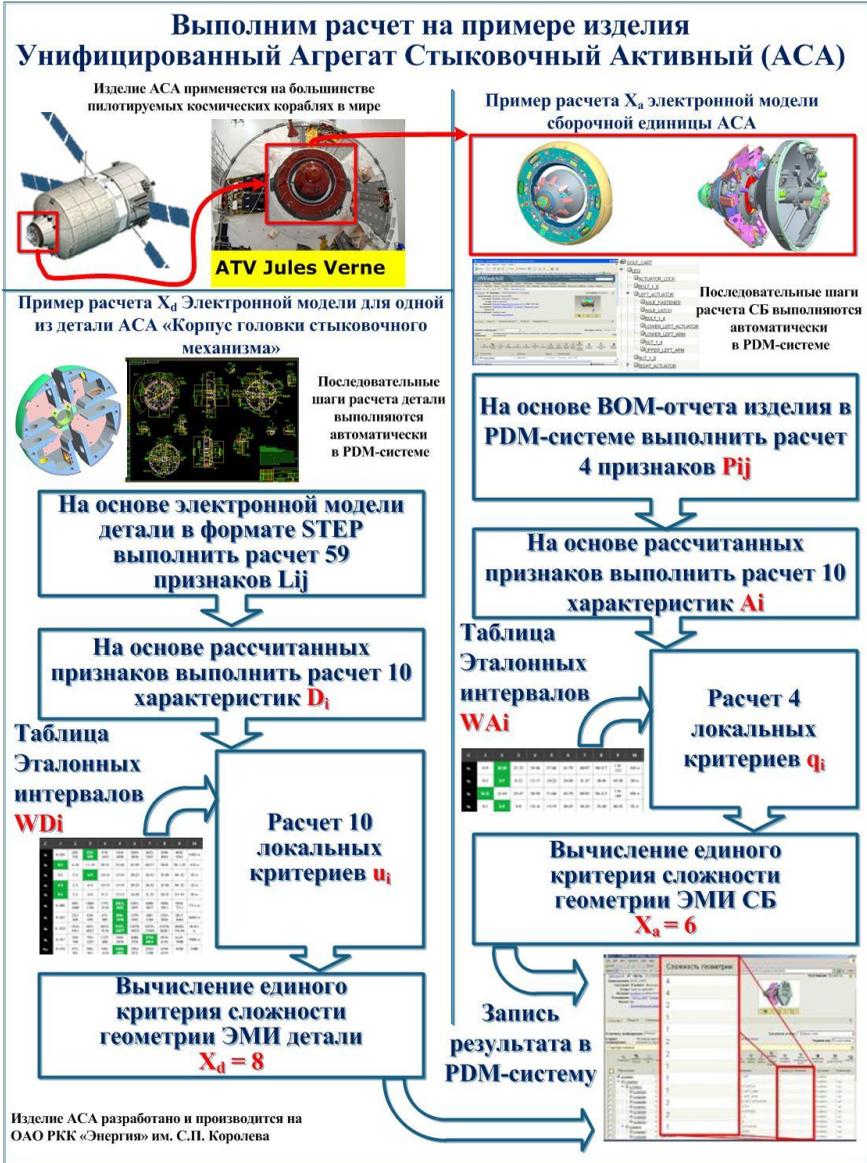


Рисунок 1. Последовательность автоматизированного расчета единого критерия сложности геометрии ЭМИ

**Расчет вектора локальных критериев ДСЕ.** В процессе изготовления детали и сборки постепенно, по мере приближения к последней операции, сложность и свойства детали и сборочных единиц увеличиваются, приобретая потребительские свойства, заложенные в чертеже и технических условиях. Таким образом, все чертежные параметры, характеризующие конструктивную

сложность, обладают высокой статистической устойчивостью. Основной характеристикой сложности геометрии изделия является трудоемкость оформления по ЭМИ чертежа. В работе под трудоемкостью оформления понимается параметр напрямую связанный с тем количеством размеров, которые необходимо поставить на чертеже в процессе его оформления. С качественной точки зрения получается, чем больше нам необходимо ставить размеров на чертеже, тем сложнее геометрия изделия. Именно такой был принят принцип при расчете локальных критериев деталей и сборочных единиц ЭМИ. Для понимания изложения методики вводятся следующие 3 определения:

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

*Характеристика* – величина, полученная на основе анализа сборочной единицы или детали. Данная величина отражает количество признаков детали или сборочной единицы.

*Признак* – метод расчета характеристики. Так как существует масса методов математического и программного описания одной той же характеристики 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, B-сплайном и т.д. Визуально кривые выглядят одинаково, а программный код разный.

Для дальнейшего описания необходимо привести обозначение и иерархии сущностей, вводимых в методике:

$X_a$  - единый критерий сложности геометрии сборочной единицы;

$q_i$  - локальный i-критерий сборочной единицы;

$A_i$  - характеристика сборочной единицы;

$P_{ij}$  - признак сборочной единицы;

$X_d$  - единый критерий сложности геометрии детали;

$u_i$  - локальный i-критерий детали;

$D_i$  - характеристика детали;

$L_{ij}$  - признак детали.

**Методика расчет вектора локальных критериев для сборочных единиц.** Вектором локальных критериев сборки называется одномерная матрица, состоящая из 4 значений локальных критериев

$$\{q_1; q_2; q_3; q_4\}. \quad (3)$$

В общем виде расчет локального критерия сборочной единицы представлен как зависимость

$$q_i = \mathcal{F}(A_i, WA_i, C), \quad (4)$$

где  $A_i$  – характеристика локального критерия (безразмерная величина, определяемая после анализа сборки);  $WA_i$  – эталонный интервал;  $C$  – категория по шкале от 1 до 10.

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

*Шаг 1. Анализ отчета ВОР (спецификации) сборочной единицы*

Отчет ВОР (Bill of Materials) - это перечень компонентов изделия с информацией о входимости деталей в сборочные единицы. Данный отчет формируется в любой современной PDM-системе (СУИД) автоматически. Под анализом ВОР (спецификации) отчета понимается автоматический расчет характеристик  $A_i$  и рассчитывается по формуле

$$A_i = \sum_{j=1}^n P_{ij}, \quad (5)$$

где  $A_i$  – характеристика локального критерия  $q_i$ ;  $P_{ij}$  – признаки характеристики. Механизм расчета признаков сборочных единиц подробно описан в диссертационной работе. Выявлено 4 признака.

### *Шаг 2. Расчет вектора локальных критериев сборочной единицы*

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

$$WA_iC_j \in A_i. \quad (6)$$

Значение характеристики  $A_i$  принадлежит одному из эталонных интервалов  $A_iC_j$  от 1 до 10, который в свою очередь имеет цифровое обозначение  $C=j$ . Таким образом, получаем значения локального критерия

$$q_i = j. \quad (7)$$

**Методика расчета вектора локальных критериев детали.** Вектором локальных критериев детали называется одномерная матрица, состоящая из 10 значений локальных критериев

$$\{u_1; u_2; u_3; u_4; u_5; u_6; u_7; u_8; u_9; u_{10}\}. \quad (8)$$

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

$$u_i = F(D_i, WD_i, C), \quad (9)$$

где  $D_i$ – характеристика локального критерия;  $WD_iC_j$ – эталонный интервал.

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

### *Шаг 1. Анализ STEP файла детали*

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

- данный формат является стандартом РФ ГОСТ Р ИСО 10303-42-2003;
- данный формат данных поддерживают все современные САПР системы;
- 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 детали. Пересчет выполняется по следующей формуле:

$$D_i = \sum_{j=1}^n L_{ij}, \quad (10)$$

где  $D_i$  – характеристика локального критерия  $u_i$ ;  $L_{ij}$  – признак характеристики. Механизм расчета признаков детали подробно описан в диссертационной работе. Определено 59 признаков для детали. Пример анализа твердотельной модели продемонстрирован на рисунке 2.

### *Шаг 2. Расчет вектора локальных критериев детали*

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

$$WD_i C_j \in D_i. \quad (11)$$

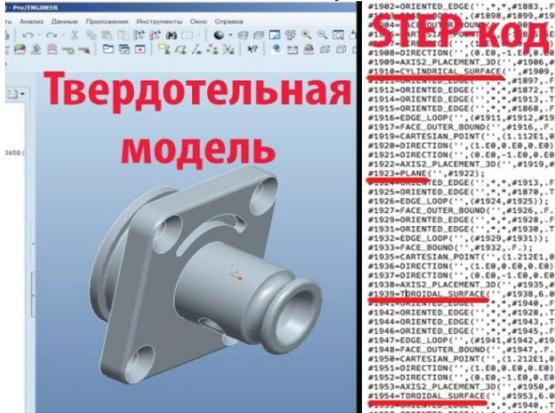


Рисунок 2.  
Твердотельная модель детали и ее интерпретация в STEP коде

Значение характеристики  $D_i$  принадлежит одному из эталонных интервалов  $WD_i$ ; от 1 до 10, который в свою очередь имеет цифровое обозначение  $C=j$ . Таким образом, получаем значения локального критерия

$$u_i = C. \quad (12)$$

*Примечание:* Эталонные интервалы  $WA_i$  и  $WD_i$  - экспертно рассчитанные 10 интервалов значений характеристик для типовых изделий предприятия.

Данный метод расчета дает численную оценку локальных критериев сборочной единицы и детали. При этом значения, которые могут принимать локальные критерия, четко определены границами логической переменной сложности.

**Скаляризация вектора локальных критериев ДСЕ 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 аспектов является степень влияния каждого локального критерия на общий критерий в целом. Следовательно, единый критерий сборочной единицы и детали рассчитывается по формулам:

$$X_a = \sum_{i=1}^4 q_i \alpha_i, \quad (13)$$

где  $\alpha_i$  – весовой коэффициент степени влияния локального критерия на единый критерий сложности сборочной единицы.

$$X_d = \sum_{i=1}^{10} u_i \beta_i, \quad (14)$$

где  $\beta_i$  – весовой коэффициент степень влияния локального критерия на единый критерий сложности детали.

На основе анализа сборочных единиц с различных машиностроительных заводов были определены следующие весовые коэффициенты:

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

Из анализа деталей с различных машиностроительных заводов были определены следующие весовые коэффициенты:

$$\beta_1 = 0, 1; \beta_2 = 0, 1; \beta_3 = 0, 1; \beta_4 = 0, 1; \beta_5 = 0, 1; \\ \beta_6 = 0, 1; \beta_7 = 0, 1; \beta_8 = 0, 1; \beta_9 = 0, 1; \beta_{10} = 0, 1. \quad (16)$$

Весовые коэффициенты важности влияния локального критерия на единый критерий сложности ЭМИ помогают в тонкой настройке всей методики под специфику производства, следовательно, изменяются при внедрении на предприятие.

**Расчет эталонных интервалов.** Любое промышленное предприятие является уникальным. Производимые продукты, специфика производства, квалификация персонала, применяемые технологии подтверждают факт, что двух полностью одинаковых предприятий не существует. Основные причины различий связаны напрямую с изделиями, которые они производят. Для предприятий, которые производят алюминиевые профили, их сортамент будет различаться по сложности. Но если такие профили будут рассматривать предприятия аэрокосмической отрасли, они будут простой геометрической сложности, без дополнительной градации. Это связано с тем, что аэрокосмическая отрасль работает с очень сложными ДСЕ. Следовательно, актуальной является задача создания методики расчета сложности геометрии ЭМИ адаптируемой под специфику производимой продукции на предприятии. Для дальнейшего описания необходимо ввести следующие определения:

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

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

Таблица 1

Логическое значение	Цифровое обозначение
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

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

Для деталей

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

$\min D_i C_j$  – минимальное значение эталонного интервала для детали;

$\max D_i C_j$  – максимальное значение эталонного интервала для детали;

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

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

Для сборочных единиц

$$A_i C_j = [\min A_i C_j \quad \dots \quad \max A_i C_j], \quad (18)$$

$\min A_i C_j$  – минимальное значение эталонного интервала для сборочной единицы;

$\max A_i C_j$  – максимальное значение 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:

$$\begin{pmatrix} D_1 C_1 & D_2 C_1 & \dots & D_i C_1 \\ D_1 C_2 & D_2 C_2 & \dots & D_i C_2 \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ D_1 C_j & D_2 C_j & \dots & D_i C_j \end{pmatrix}. \quad (19)$$

**Таблица эталонных интервалов сборочной единицы** - двухмерная матрица **WA** формата:

$$\begin{pmatrix} A_1 C_1 & A_2 C_1 & \dots & A_i C_1 \\ A_1 C_2 & A_2 C_2 & \dots & A_i C_2 \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ A_1 C_j & A_2 C_j & \dots & A_i C_j \end{pmatrix}. \quad (20)$$

Алгоритм расчета эталонных интервалов состоит из выполнения следующих этапов:

1. выбор характерных сборочных единиц;
2. экспертный анализ сборочных единиц;
3. группировка уникальных деталей;
4. расчет характеристик сложности геометрии ЭМИ детали;
5. расчет таблицы эталонных интервалов детали;
6. расчет единого критерия сложности для деталей;
7. расчет характеристик сложности геометрии ЭМИ сборочных единиц;
8. расчет таблицы эталонных интервалов для сборочной единицы.

В работе приводится подробное описание каждого из этапов расчетов значений эталонных интервалов. Предложенный алгоритм настройки эталонных интервалов решает задачу адаптации методики 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.

**Третья глава** посвящена реализации и применимости методики расчета единого критерия сложности геометрии ЭМИ.

В качестве 1-го примера для расчета была выбрана деталь «крышка отливка» с одного из машиностроительных заводов. ЭМИ детали можно увидеть

на рисунке 3. Результатом расчета стало вычисление единого критерия сложности геометрии

$$X_d = 4 \quad (21)$$

В соответствии с логической переменной сложности ЭМИ деталь «крышка отливка» **нормальной сложности.**

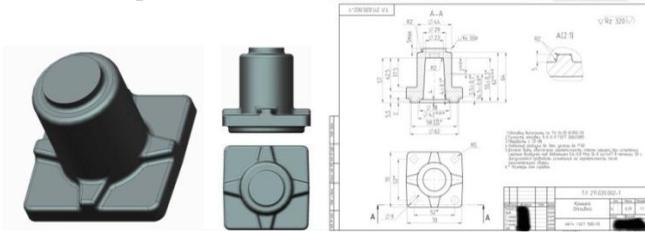


Рисунок 3. Изображение ЭМИ и чертежа детали «крышка отливка ТЛ 211.020.002-1»

В качестве 2-го примера выбрана сборочная единица «АНХ-М63-08.00.000 СБ Механизм прижатия заслонки». ЭМИ сборочной единицы, сборочный чертеж и фотография представлена на рисунке 4,5.

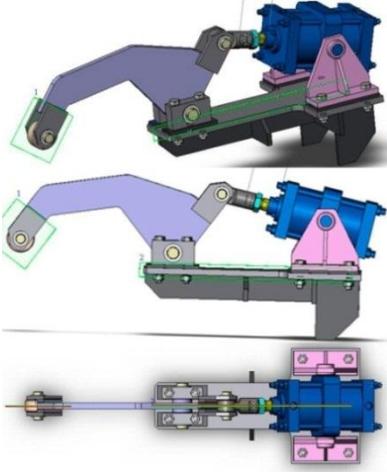


Рисунок 4. Изображение ЭМИ сборочной единицы АНХ-М63-08.00.000 СБ Механизм прижатия заслонки

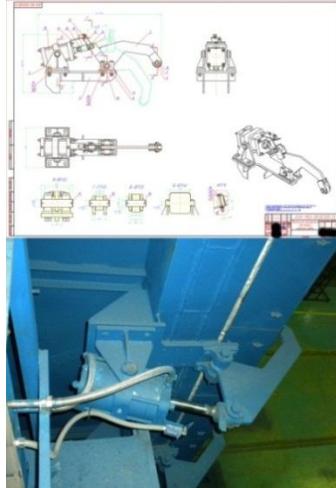


Рисунок 5. Сборочный чертеж и фотография АНХ-М63-08.00.000 СБ Механизм прижатия заслонки

Результатом расчета стало вычисление единого критерия сложности геометрии

$$X_a = 2 \quad (22)$$

В соответствии с логической переменной сложности геометрии ЭМИ сборочная единица «Механизм прижатия заслонки» **очень простой сложности.**

Методика расчета единого критерия сложности геометрии ЭМИ требует наличия современной инфраструктуры в области корпоративных систем автоматизации конструкторско-технологических служб на предприятии. Для определения основных ограничений необходимо привести требования на

программный комплекс расчета единого критерия сложности геометрии ЭМИ. Главным критерием при формировании требований стала недопустимость увеличения трудовых затрат при расчете единого критерия сложности ЭМИ.

Основные требования к автоматизации метода:

1. расчет для детали должен производиться в формате STEP по электронной модели изделия;
2. расчет для сборочных единиц должен производиться на основе отчета BOM;
3. расчет эталонных интервалов должен производиться автоматизировано с заполнения необходимых атрибутов;
4. расчет сложности геометрии ЭМИ должен производиться системно;
5. применение единого критерия сложности ЭМИ для решения последующих задач должно выполняться в едином интегрированном пространстве (ЕИП).

На основе изложенных требований сформированы основные ограничения применимости методики расчета единого критерия сложности геометрии ЭМИ. Функционально-архитектурная схема и таблица ограничений применимости методики представлены на рисунке 6, таблице 2.

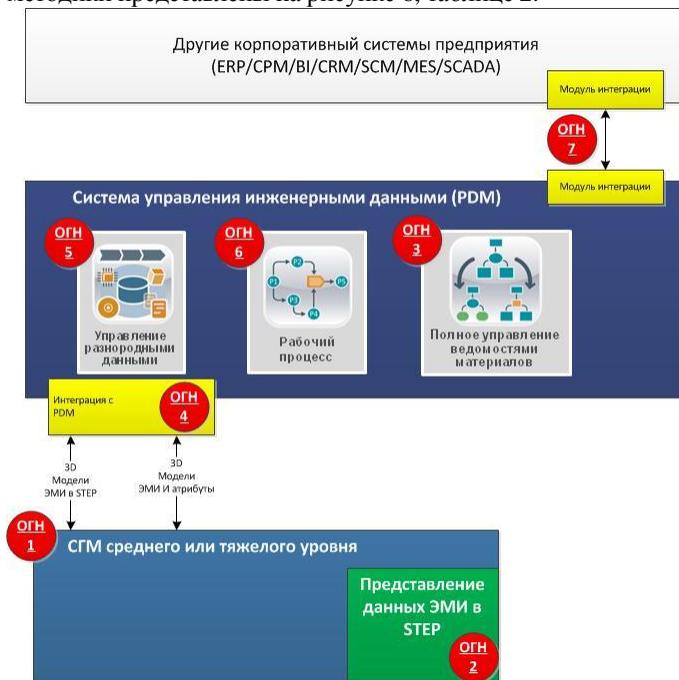


Рисунок 6. Функционально-архитектурная схема ограничений применимости методики

Таблица 2

Ограничение	Описание
ОГН 1	Электронная модель изделия должна быть создана в СГМ среднего или тяжелого уровня
ОГН 2	СГМ, используемая на предприятии для создания ЭМИ, должна иметь возможность выполнить экспорт в формате STEP по стандарту ГОСТ Р ИСО 10303-42-2003 в гибридном представлении данных

ОГН 3	Необходимо применять в работе PDM-систему с возможностью поддержки BOM-отчетов
ОГН 4	СГМ должна иметь возможность интеграции с PDM-системой на уровне передачи состава ЭМИ и атрибутов моделей
ОГН 5	Необходимо иметь возможности по настройке PDM-системы на уровне расчета атрибутов с зависимостями от других атрибутов с применением языка программирования
ОГН 6	PDM система предприятия должна поддерживать возможность создания и изменения потоков работ (WorkFlow)
ОГН 7	PDM система предприятия должна поддерживать развитый функционал по передаче данных в другие корпоративные системы предприятия

**Апробация** единого критерия сложности геометрии ЭМИ прошла при реализации бизнес-процесса «аутсорсинг чертежных работ». Сутью данного процесса является организация работ по оформлению чертежей по стандарту ЕСКД между проектной организацией и привлекаемыми на разовую работу специалистами, обладающими навыками оформления конструкторской документации. Основной бизнес стратегией является, привлечение внешних исполнителей на выполнение разовой работы по оформлению КД на этапе выпуска проектной документации. За счет участия большого количества специалистов срок оформления КД сокращается. Главной сложностью является организация данного процесса на основе большого количества автоматических действий без привлечения экспертных знаний при распределении работ. Ключевой технологией реализации процесса аутсорсинга чертежных работ стал автоматический расчет единого критерия сложности ЭМИ. На основе данного показателя производится расчет стоимости работ и автоматическое распределение задач на основе квалификации специалиста. Объектом автоматизации является ускорение выпуска КД на стадии оформления проектной документации за счет привлечения временных сотрудников на разовую работу. Схема реализации данного бизнес-процесса представлена на рисунке 7. В главе 3 и Приложении 4 приводится пошаговое описание процесса аутсорсинг чертежных работ. Единый критерий сложности геометрии ЭМИ рассчитывается по программному алгоритму (рисунок 8).

В качестве языка программирования выбран Java. Это связано с тем, что на языке Java можно непосредственно программировать в рабочем потоке PDM-системы Windchill 9.1. Реализация расчета единого критерия сложности геометрии ЭМИ была выполнена в «исполняемом роботе» в рабочем потоке. В зависимости от PDM системы реализация программного кода будет серьезно отличаться. Данная ситуация складывается из-за различной реализации API-интерфейсов, архитектуры и возможностей PDM-систем. Пример рассчитанного единого критерия сложности ЭМИ представлен на рисунке 9.

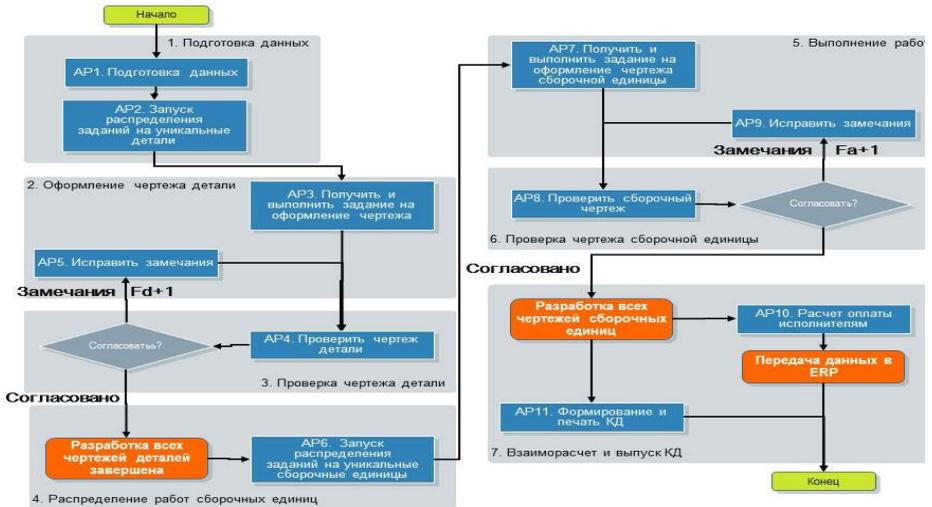


Рисунок 7. Рабочий поток аутсорсинга чертежных работ

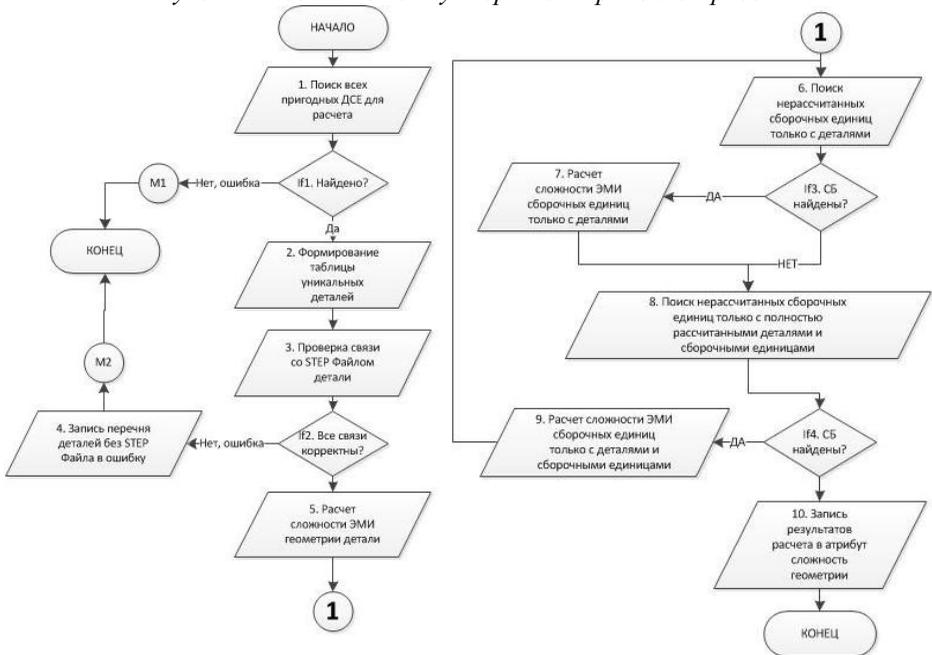


Рисунок 8. Программный алгоритм расчета единого критерия сложности геометрии ЭМИ

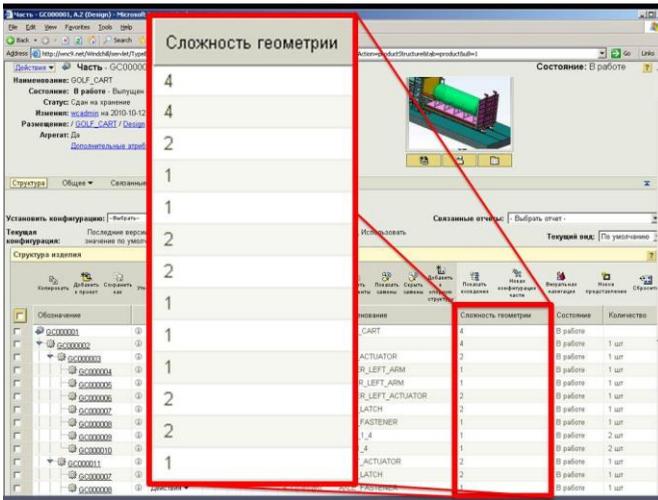


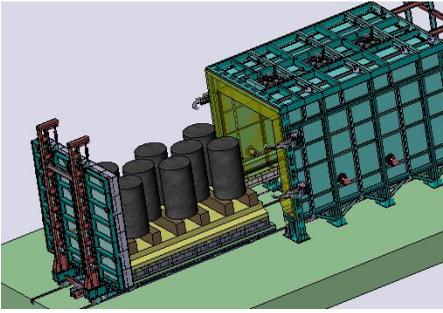
Рисунок 9.  
Структура изделия с рассчитанными значениями сложности геометрии ЭМИ

Верификация процесса аутсорсинга чертежных работ производилась в компании «АНХ-Инжиниринг» на типовом проекте АНХ-М8-00.00.00.000 СБ Печь с выкатным подом. Основными результатами рассматриваемого потока работ стало сокращение времени на этапе оформления проектной документации и выявление основных ограничений процесса. Для доказательств сокращения времени на этапе оформления проектной документации, при помощи процесса аутсорсинга чертежных работ, целесообразно сравнить два типовых (рисунки 10, 11) проекта (с применением процесса аутсорсинга чертежных работ и без). Численные данные проекта представлены в таблице 3.

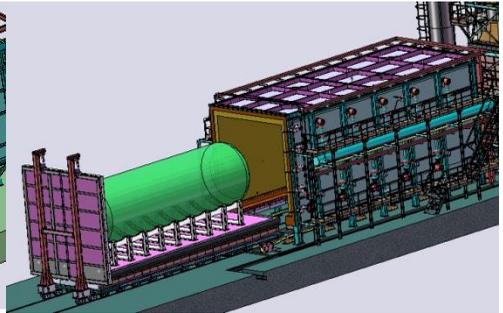
Таблица 3

	«ДО»	«ПОСЛЕ»
Наименование проекта	АНХ-М63-00.00.00.000 СБ Печь с выкатным подом	АНХ-М8-00.00.00.000 СБ Печь с выкатным подом
Общее число компонентов проекта	<b>15254</b>	<b>15719</b>
Общее число уникальных сборочных чертежей	<b>278</b>	<b>265</b>
Общее число уникальных чертежей деталей	<b>1267</b>	<b>1319</b>
Общее количество выпущенных чертежей ДСЕ	<b>1545</b>	<b>1584</b>

Результатом анализа завершенных проектов «АНХ-М63-00.00.00.000 СБ» и «АНХ-М8-00.00.00.000» стал вывод: **при сопоставимых ресурсных затратах время оформления проектной документации сократилось на 52%, что подтверждено соответствующим актом о внедрении.**



*Рисунок 10. ЭМИ проекта АНХ-М63-00.00.00.000 СБ Печь с выкатным подом.*



*Рисунок 11. ЭМИ проекта АНХ-М8-00.00.00.000 СБ Печь с выкатным подом.*

В результате применения процесса аутсорсинга чертежных работ было выявлено ограничение количества проверяемых чертежей на одного «проверяющего». Один «проверяющий» может проверить в среднем в день 38 чертежей ДСЕ разной категории сложности. Используя данный результат, можно рассчитать необходимое количество «проверяющих» в организации. Предложенный алгоритм процесса аутсорсинга чертежных работ позволил перейти на более совершенную технологию организации процесса оформления КД в рамках единой системы разработки изделий. Проектная организация, выпускающая конструкторскую документацию, смогла достичь феноменальной гибкости, т.е. возможность мгновенно расширить штат сотрудников для выполнения однотипной, но очень трудоемкой работы в минимальный отрезок времени, и также вернуться к обратному состоянию после завершения процесса выпуска КД, что значительно снижает срок оформления проектной документации.

**Апробация** единого критерия сложности геометрии ЭМИ прошла при оптимизации бизнес-процесса «Разработка УП для СЧПУ». Применение технологии производства на станках с ЧПУ позволяет с феноменальной точностью создавать сложнейшие детали. Высокотехнологичные виды техники, например, авиационные и ракетно-космические системы, невозможно создать без станков с ЧПУ. Одна из проблем процесса разработки УП для СЧПУ состоит в том, что руководители принимают решение о проведении предварительных испытаний УП даже для деталей с элементарной геометрией. Это связано с тем, что ошибки УП напрямую влияют на финансовые потери предприятия и руководитель снижает риск для самого себя. При этом получается следующая ситуация: технологи-программисты при помощи современных средств разработки и виртуальных испытаний УП для СЧПУ для простых деталей получают оптимальную программу, готовую к серийному производству, но вынуждены сначала испытывать ее на опытной детали, а потом уже на опытной партии. Такая ситуация всех устраивала бы, если станки с ЧПУ были свободны и простаивали в цехе. Но в условиях производства высокотехнологичных изделий станки с ЧПУ работают с постоянной загрузкой. Это связано с недостаточной оснащенностью современной техникой на промышленных предприятиях РФ. Следовательно, необходимо включить в план загрузки на станок производство опытной детали.

При этом все знают, что УП для геометрически простых деталей отработает корректно, а если и возникнут проблемы, то их можно исправить на производстве опытной партии. Сделаем вывод, если ограничить руководителя в принятии решения в проведении предварительных испытаний УП по деталям с элементарной геометрией, то можно ускорить разработку УП, сократить срок КТПП всего изделия в целом. При этом полностью запретить принимать решение руководителям по разработке УП для СЧПУ методологически неверно.

Решить приведенную проблему можно путем внедрения в процесс принятия решения экспертно-независимого показателя сложности геометрии, на основе которого, руководители по разработки УП и ТП для СЧПУ получат юридическое право не проводить предварительные испытания УП для деталей с элементарной геометрий. В качестве такого критерия применим единый критерий сложности геометрии ЭМИ, исследуемый в работе.

Разделим решения, которые может принимать алгоритм на три типа:

1) Если значение единого критерия сложности  $X_d=[1..3]$ , то проводить предварительные испытания не требуется.

2) Если значение единого критерия сложности  $X_d=[4..7]$ , то руководитель по разработке УП и ТП должен принять решение о необходимости в предварительных испытаниях.

3) Если значение единого критерия сложности  $X_d=[8..10]$ , то деталь считается сложной и необходимы предварительные испытания.

Внедрим в типовой бизнес-процесс разработки УП и ТП для СЧПУ автоматизированный подход к принятию решения в необходимости предварительных испытаниях на основе единого критерия сложности ЭМИ. Схема бизнес-процесса приведена на рисунке 12.

Процесс разработки УП и ТП для СЧПУ на основе единого критерия сложности геометрии был внедрен на базе PDM-системы Windchill PDMLink 9.1 на заводе ОАО «Калужский двигатель». Основное направление деятельности - это производство газотурбинных двигателей в интересах Министерства обороны РФ.

**Внедрение ряда процессов на основе единого критерия сложности геометрии ЭМИ, на заводе позволило сократить средние сроки КТПП изделий на 16%, что подтверждено соответствующим актом о внедрении.** Это стало возможным за счет ускорения делегирования работ внутри рабочих коллективов конструкторско-технологических служб завода. Применение процесса разработки УП и ТП для СЧПУ на основе единого критерия сложности ЭМИ позволит сократить сроки КТПП сложной наукоемкой продукции за счет ускорения подготовки к производству деталей с простой геометрической сложностью.

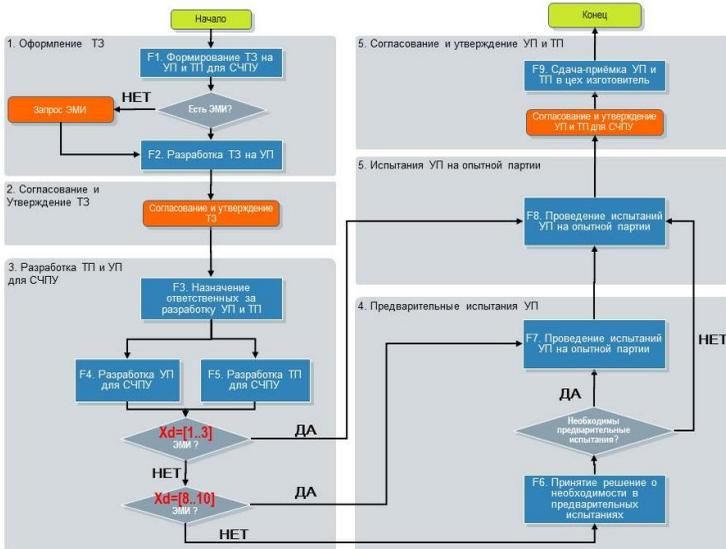


Рисунок 12. Рабочий поток разработки УП и ТП для СЧПУ

Для деталей и сборочных единиц различной градации сложности геометрии ЭМИ был выполнен сравнительные расчет конструктивной сложности по 4 различным методикам. В результате получены затраты времени на расчет сложности геометрии ДСЕ в зависимости от применяемого метода (см. рисунки 13, 14).

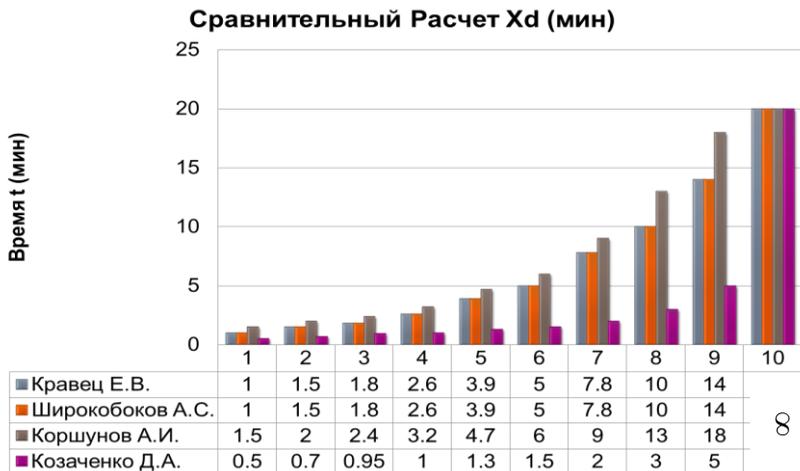


Рисунок 13. Сравнительный расчет  $X_d$  деталей

Наибольшее количество времени необходимо на расчет конструктивной сложности детали по методу Коршунова А.И. Это связано с тем, что необходимо каждый раз определять 6 характеристик детали вручную и не всегда это можно сделать однозначно правильно. Наименьшее количество времени затрачивается

при автоматизированном расчете по предлагаемому в данной работе методу. Хотя метод и автоматизирован, но затраты времени идут на подготовку электронных данных к расчету.



*Рисунок 14. Сравнительный расчет  $X_a$  сборочных единиц*

Наибольшее количество времени необходимо на расчет конструктивной сложности сборочной единицы по методу Широкобокова А.С. Это связано с тем, что необходимо вручную определять количество поверхностей вступающих в связь. Наименьшее количество времени затрачивается при автоматизированном расчете по предлагаемому в данной работе методу.

Применение, предлагаемого метода расчета конструктивной сложности, в методиках расчета КТС Коршунова А.И., Широкобокова А.С. и Кравец Е.В., позволит снизить временные затраты на расчет КС более чем 3 раза.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложена новая методика оценки сложности геометрии электронной модели изделия, выполненной в системах твердотельного моделирования. Оценка сложности реализуется через единый критерий сложности ЭМИ и рассчитывается в автоматическом режиме в PDM-системе (СУИД). Критерий сложности ЭМИ - это логическая переменная, которая может принимать логические значения от 1 до 10. Расчет единого критерия сложности ЭМИ относится к методам многокритериальной оптимизации. Математическая задача поставлена, как задача скаляризации вектора локальных критериев в суперкритерий.

1. Разработанный программный комплекс расчета единого критерия сложности геометрии ЭМИ позволил автоматически оценивать конструктивную сложность изделия, без привлечения экспертных знаний специалистов.
2. Разработанный математический аппарат многоуровневой последовательной скаляризации показателей сложности ДСЕ в единый критерий сложности, выявил 4 типа сущностей: единый критерий сложности ЭМИ; локальный критерий сложности ЭМИ; характеристика; признак.

3. Исследование методов твердотельного моделирования позволило выделить 10 локальных критериев для деталей и 4 локальных критерия для сборочных единиц.
4. Для расчета характеристик сборочных единиц выявлено 4 признака. Разработан математический аппарат расчета характеристик сборочных единиц, базирующийся на BOM-отчете в PDM-системе.
5. Для расчета характеристик детали выявлено 59 признаков. Разработан математический аппарат расчета характеристик детали, базирующийся на автоматическом определении признаков в нейтральном формате STEP.
6. Для обеспечения внедрения единого критерия сложности геометрии ЭМИ в работу промышленных предприятий разработан математический аппарат методики «эталонных интервалов». Данная методика должна применяться для настройки метода расчета единого критерия сложности ЭМИ в зависимости от специфики выпускаемой продукции на предприятии.
7. Исследование по ограничению применимости расчета единого критерия сложности геометрии ЭМИ выявило 7 технологических ограничений, что позволило создать функционально-архитектурную схему ИТ-инфраструктуры предприятия, пригодной для внедрения методики в автоматическом режиме.
8. Применение единого критерия сложности геометрии ЭМИ при реализации процесса «аутсорсинга чертежных работ», позволило получить следующий результат: при сопоставимых ресурсных затратах время оформление проектной документации сократилось на 52%, что подтверждено соответствующими актами о внедрении. А также проведенный эксперимент показал, что один проверяющий может проверить в среднем в день 38 чертежей ДСЕ разной категории сложности.
9. Оптимизация процесса разработки УП и ТП для СЧПУ на основе единого критерия сложности геометрии ЭМИ позволила сократить средние сроки КТПП изделий на 16%, что подтверждено соответствующим актом о внедрении.

Применение нейтрального формата STEP позволило создать инвариантный метод оценки сложности геометрии детали, работоспособный в гетерогенных средах разработки изделий. Внедрение программного алгоритма расчета единого критерия сложности ЭМИ в бизнес-процессы КТПП в PDM-систему, позволяет использовать метод на всех предприятиях аэрокосмической отрасли РФ с минимальными временными затратами на адаптацию. 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.

**Основные положения диссертации опубликованы в работах:**

1. **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. — С. 270–275.
2. **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. — С. 265–269.
3. **Козаченко Д.А.**, Григорьев Е.В., Бодрышев В.В. Инвариантный метод расчета сложности геометрии электронной модели изделия // Электронный журнал «Труды МАИ» №47, год 2011 <http://www.mai.ru/science/trudy/published.php>.
4. **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 29-35, CAD/CAM Media Publishing:2011.
5. **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 20-25, CAD/CAM Media Publishing:2011.
6. **Козаченко Д.А.** Создание инженерного интернет портала на основе технологий Microsoft Sharepoint и Windchill Productpoint, реализующие метод аутсорсинга чертежных работ // Труды VII Всероссийской конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Технологии Microsoft в теории и практике программирования». — 2010. — С. 75–76.
7. **Козаченко Д.А.** Методика определения сложности геометрии математической модели изделия // Тезисы докладов 9-й международной конференции «Авиация и космонавтика — 2010». — 2010. — С. 71–72.