

УДК 658.512, 004.942

**Идентификация объектов структуры электронной модели изделия с помощью выявленных формализованных параметров из конструкторско-технологической среды**

**Лаврентьева М.В.\*, Говорков А.С.\*\***

*Иркутский национальный исследовательский технический университет,  
ул. Лермонтова, 83, Иркутск, 664074, Россия*

*\*e-mail: [mira.amazon@gmail.com](mailto:mira.amazon@gmail.com)*

*\*\*e-mail: [govorkov\\_as@istu.edu](mailto:govorkov_as@istu.edu)*

**Аннотация**

Исследование относится к области автоматизации конструкторско-технологической подготовки производства в самолетостроении. Предложена методика идентификации объектов структуры электронной модели изделия по формализованным параметрам. Для этого применяется метод контурного распознавания образов, позволяющий выделить геометрические примитивы ограничивающие поверхности, образующие контур каждого конструктивного элемента. Таким образом возникает необходимость в разработке структурно-геометрической модели изделия. Далее необходимо выявить формальные параметры объектов структуры детали. Рассмотрена последовательность работы с электронной моделью изделия, в которой применяются правила продукции элементы теории множеств, а также аппарат математической логики. Полученные

конструктивно-технологические параметры детали, позволяют отнести ее к определенному типу, то есть идентифицировать. Идентификация детали, ее структура и данные о поверхностях сопряжения, позволяет определить технологические параметры, конструктивной формой которых, устанавливаются геометрические требования к базированию. Приведены несколько основных правил для установления связи между отдельными деталями, которые могут быть использованы при оценке технологичности конструкции изделий, разработке маршрутов изготовления и сборки, а также разработке средств технологического оснащения. Таким образом применение систем распознавания значительно повысит эффективность производства, путем унификации решения конструктивных и технологических задач, и послужит платформой для развития интеллектуальных систем поддержки принятия решений различной направленности в пределах отрасли, что позволит снизить влияние субъективного фактора при принятии решений, благодаря использованию формальных критериев.

**Ключевые слова:** базирование, дискретная модель, опорная точка, сборка изделия.

Многообразие технической литературы, рекомендации справочников по анализу конструкции изделий машиностроения [2] отражают основные сведения о структуре, составе и особенностях частных показателей анализа. На сегодняшний день при разработке изделия в CAD/CAM/CAE/PDM – системах рациональным решением при проектировании и технологической подготовке производства

изделий авиационной техники является проведение анализа структуры изделия на начальных этапах производства продукции. Таким образом, для снижения цикла подготовки документации и запуска изделия, перед конструктором и технологом ставятся следующие задачи:

- выбор современных конструктивных решений, оптимального варианта изготовления и конструктивной компоновки изделия;
- рациональный выбор конструкции изделия в зависимости от функциональности изделия (выполняемой функции);
- использование стандартных, библиотечных конструктивных элементов при моделировании изделий (например, в системе NX).

Отсутствие как таковых средства формализованного анализа состава и структуры конструкции изделия, не позволяет перекладывать принятие решений, связанных с задачами конструкторской и технологической подготовки производства, с инженера на машину. Это существенно повышает вероятность принятия неоптимальных решений, а также повышает трудоёмкость и цикл производства.

Для решения различных задач, связанных с автоматизацией технологической подготовки производства, возникает необходимость в разработке структурно-геометрической модели изделия.

Применяя метод контурного распознавания, возможно выделить геометрические примитивы ограничивающие поверхности, образующие контур каждого конструктивного элемента.

Чтобы распознавание было достоверным, на основе аппарата математической логики, был разработан комплект правил, позволяющий классифицировать конструктивные элементы из которых состоит деталь, определить их пространственную ориентацию, поверхности, выходящие на аэродинамический обвод, габаритные размеры и многое другое. На первоначальном этапе работы с деталью число правил больше, так как установить связи сложнее. С точки зрения конструкции и геометрии деталь едина и неразделима и ее отдельные элементы не могут существовать самостоятельно, однако с точки зрения технологии, каждый конструктивный элемент индивидуален и его формообразование может происходить независимо от других.

Полученный набор данных дает возможность рассматривать деталь в целом и определить характер ее связей с другими деталями, входящими в сборочную единицу. То есть определить поверхности сопряжения и выбрать ограничивающие связи, используя правила продукции.

Формирование комплекта правила первого уровня включает следующие этапы [2].

### **1. Присваивание кода в зависимости от типа линий.**

Линии разделяются на прямые, которым присвоено значение line, кривые – curve, окружности замкнутые – circle и дуги – arc. Для создания структурной комбинации присвоим каждому типу линий свой код (рисунок 1), где:

Arc – a;

Line – b;

Circle – c;

Curve – d.

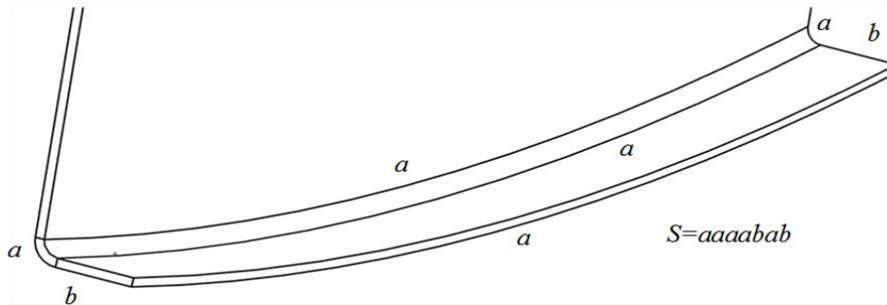


Рисунок 1 – Составляющие кода конструктивного элемента - борт

## 2. Определить точки ограничения и сопряжения (пересечения) линий.

Определить точки  $g_i$ , являющиеся общими для различных линий  $l_i$  (минимум две точки, начала  $g_{is}$  и конца  $g_{ic}$ ) и для каких конструктивных элементов  $a_i$  эти точки являются совпадающими. Каждая точка имеет координаты  $x, y, z$ , соответственно, если координаты точек одной из линий ограничивающей поверхность пересекаются с координатами точек линии, ограничивающей другую поверхность, эти поверхности пересекаются:

$$g_{is} = g_{js} \rightarrow \{x_{is}, y_{is}, z_{is}\} = \{x_{js}, y_{js}, z_{js}\};$$

$$g_{ic} = g_{jc} \rightarrow \{x_{ic}, y_{ic}, z_{ic}\} = \{x_{jc}, y_{jc}, z_{jc}\};$$

$z_{jc}$ };

где  $g_{is}$  и  $g_{js}$  – начальные точка линий;

$g_{ic}$  и  $g_{jc}$  – конечные точка линий

$$g_{is}, g_{ic} \in l_i;$$

$$g_{js}, g_{jc} \in l_j;$$

где  $l_i$  и  $l_j$  – линии;

$$l_j \in p_i;$$

$$l_j \in p_j;$$

где  $p_i$  и  $p_j$  – поверхности;

$$l_j = l_i \Rightarrow p_i \cap p_j;$$

$$p_i \subseteq a_i, p_j \subseteq a_j \Rightarrow a_i \cap a_j.$$

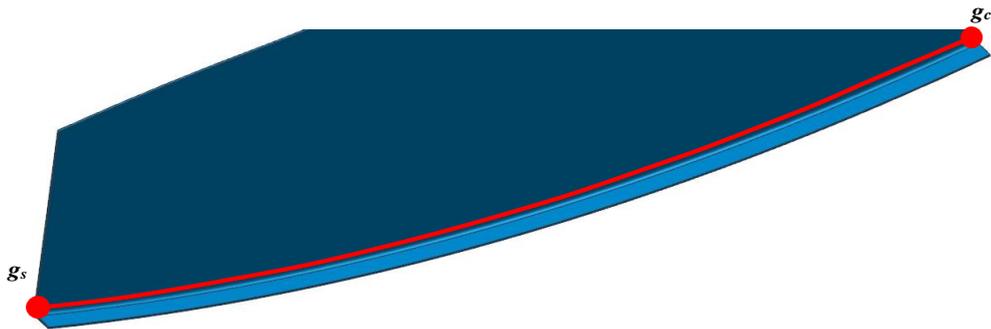
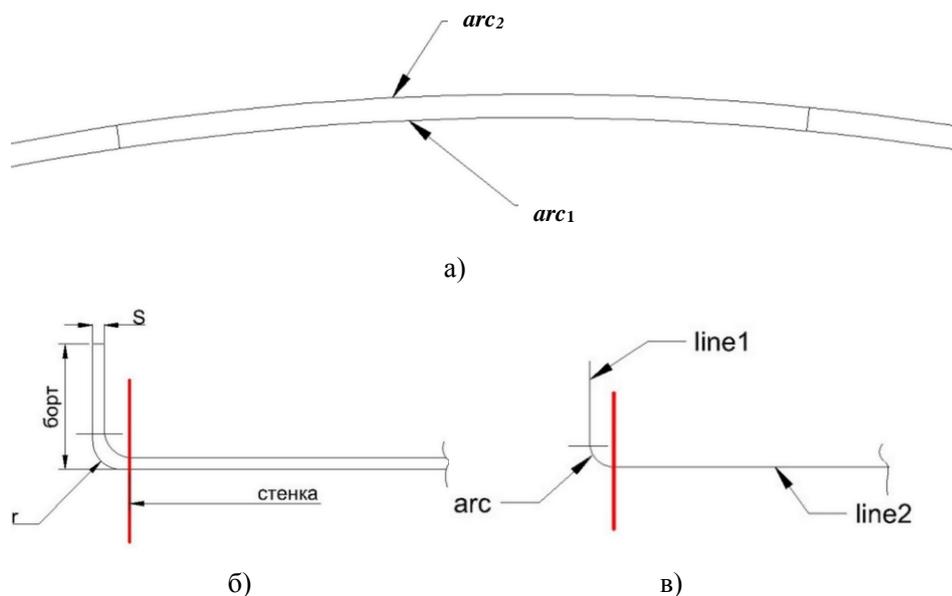


Рисунок 2 - Общая линия с начальной и конечной точками

### 3. Определить необходимые проекции $t_n$ .

Для однозначного определения некоторых конструктивных элементов необходимо рассмотреть контур в различных проекциях, то есть для некоторых изделий набор линий может состоять из нескольких комплектов. Это означает, что, если при извлечении примитивов код одного элемента будет совпадать с кодом другого, а конструктивные характеристики не будут соответствовать, для этих элементов используются дополнительные комплекты примитивов из других проекций.



а) продольный контур, ограничивающий поверхность борта; б) поперечный контур, ограничивающий поверхность борта; в) элементарный контур, без учета толщины, расчлененный на составляющие типы линий.

Рисунок 3 – Набор параметров элемента борт

#### 4. Определить размеры линий $t_p$ .

В зависимости от типа линий определяются числовые параметры: длина  $l$ , диаметр  $D$ , радиус  $R$ , количество сегментов сплайна. Каждый элемент содержит множество точек, как уже было сказано выше каждая точка имеет свои координаты, значит, длина прямой измеряется расстоянием между координатами крайних точек:

$$g_{is} = \begin{Bmatrix} X_{is} \\ Y_{is} \\ Z_{is} \end{Bmatrix}, g_{ic} = \begin{Bmatrix} X_{ic} \\ Y_{ic} \\ Z_{ic} \end{Bmatrix};$$

$$dt_p = \sqrt{(dx)^2 + (dy)^2 + (dz)^2},$$

где  $g_{is}$  – начальная точка линий;

$g_{ic}$  – конечная точка линий;

$t_p$  – расстояние между точками.

Преобразуем это выражение, умножив и поделив его на  $dt$ :

$$dt_p = \sqrt{\frac{(dx)^2 + (dy)^2 + (dz)^2}{(dt)^2}} dt;$$

Затем разделим каждое слагаемое в числителе на знаменатель и представим результат в виде

$$dt_p = \sqrt{\left(\frac{dx}{dt}\right)^2 + \left(\frac{dy}{dt}\right)^2 + \left(\frac{dz}{dt}\right)^2} dt \Rightarrow$$
$$dt_p = \sqrt{(x')^2 + (y')^2 + (z')^2} dt,$$

где  $x'$ ,  $y'$  и  $z'$  – производные функций  $x(g)$ ,  $y(g)$  и  $z(g)$  по переменной  $g$ .

Тогда

$$t_p = \int_{g_{is}}^{g_{ic}} \sqrt{(x')^2 + (y')^2 + (z')^2} dt.$$

## 5. Определить базовый конструктивный элемент.

Базовый конструктивный элемент  $a_0$  является точкой отсчета для расположения конструктивных элементов  $a_0$  и характеризуется превосходящими габаритными размерами  $S$ , наибольшим количеством связей  $t_c$  с другими конструктивными элементами, отсутствием связей с висячими вершинами, так же является платформой для остальных конструктивных элементов, входящих в состав детали:

$$S_0 > S_i,$$

где  $S_0$  – площадь базового конструктивного элемента;

$S_i$  – площадь конструктивного элемента,

$$t_c(a_0) > t_c(a_i)$$

где  $t_c(a_0)$  – число связей базового конструктивного элемента;

$t_c(a_i)$  – число связей конструктивного элемента.

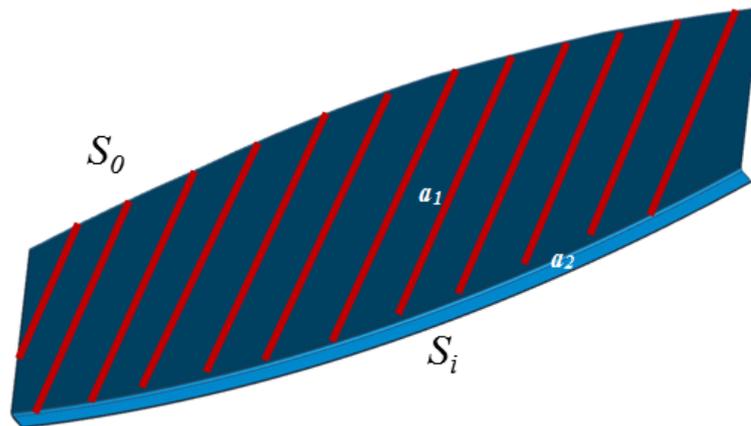


Рисунок 4 - Определение базового конструктивного элемента

## 6. Ориентация конструктивных элементов относительно базового.

Так как найден базовый конструктивный элемент  $a_0$  то ориентация оставшихся конструктивных элементов  $a_i$  будет вычисляться относительно базового, взятого за нулевую точку отсчета:

$$A_i = \{x_1, x_2, \dots, x_j\};$$

$$X_i = \{g_1, g_2, \dots, g_i\};$$

$$G_i = \{x, y, z\}.$$

Тогда найти вектор перемещения  $\bar{k}_1$  конструктивного элемента  $a_i$  относительно  $a_0$  можно согласно формуле:

$$\bar{k}_1 = \{g_0 - g_i\} = \begin{Bmatrix} x_0 - x_i \\ y_0 - y_i \\ z_0 - z_i \end{Bmatrix},$$

где  $g_0$  – точка базового конструктивного элемента;

$g_i$  – точка сравниваемого конструктивного элемента.

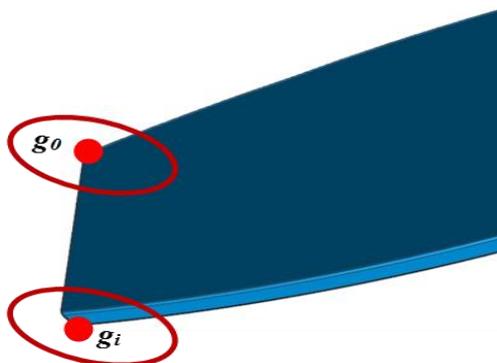


Рисунок 5 – Точки базового и сравниваемого конструктивных элементов

## 7. Выход на аэродинамический обвод.

Под обводом понимается поверхность планера самолёта, обтекаемая воздушным потоком в полете. При этом теоретический обвод – это обвод, заданный теоретическим чертежом или математической моделью поверхности. Для удобства записи обозначим обвод –  $w$ . Поверхность обвода образована поверхностями конструктивных элементов, принадлежащих деталям, формирующим действительный обвод, в результате сборки узлов.

Определить принадлежность того или иного конструктивного элемента  $a_i$  к аэродинамическому обводу  $w$ , взятому из теоретического электронного макета (ТЭМ) изделия можно согласно формуле:

$$a_i \in w \text{ если } p(a_i) \cap p(w).$$

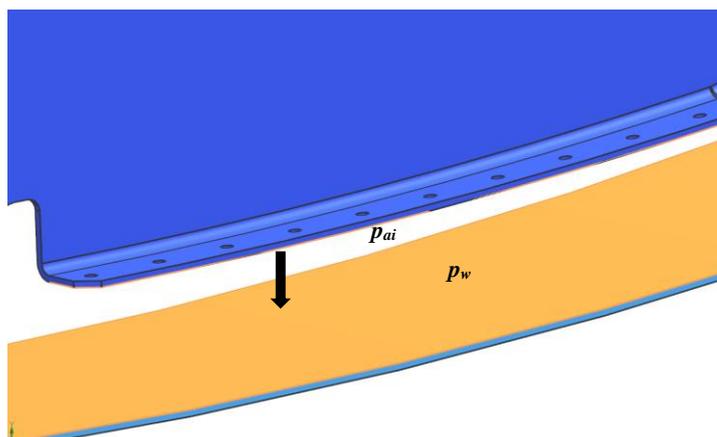


Рисунок 6 – Поверхность обвода и сопрягаемая с ней поверхность борта

Как уже было сказано выше, здесь использован метод распознавания по контуру, что и легло в основу разработки данного перечня правил. Эти правила являются необходимым минимумом для дальнейшего перехода к формированию правил второго уровня, поскольку позволяет определить типы конструктивных элементов детали, их расположение друг относительно друга, при помощи связи примитивов, количество элементов одного типа и общее количество конструктивных элементов детали.

Чтобы получить более широкое представление о структуре детали, ее конструктивные элементы классифицируются, это проводится с целью оптимизации процесса моделирования за счет выявленных особенностей построения. [1]

Таким образом, выявленные конструктивно-технологические параметры соответствуют конкретному конструктивному элементу, в данном случае это криволинейный борт. Так же идентификация проходит для каждого

конструктивного элемента, входящего в деталь, что позволяет в дальнейшем классифицировать саму деталь.

Классификатор деталей предназначен для выбора определенной группы или семейства на основании наличия или отсутствия определенных свойств детали.

Что касается второго уровня работы с изделием, то при разработке данного перечня правил, не применяется распознавание как таковое, так как по результатам решения первой задачи, применяя правила продукции, можно рассматривать деталь в контексте сборочной единицы. В таком случае необходимо сформировать лишь несколько основных правил для установления связи между отдельными деталями.

Правила второго уровня состоят из следующих этапов [1, 10].

### **1. Определение базовой детали.**

От того какая из деталей будет является базовой (жесткая/маложесткая), во многом зависит последовательность сборки и даже метод сборки, отсюда определяются критерии выявления базового элемента.

Как и в случае с базовым конструктивным элементом, базовая деталь имеет наибольшее количество связей  $t_c$  и, как правило, имеет превосходящие по сравнению с другими элементами габариты  $S_{бэ}$ .

$$S_{бэ} > S_э$$

где  $S_{бэ}$  – площадь базового элемента;

$S_э$  – площадь элемента,

$$t_c(m_0) > t_c(m_i)$$

где  $t_c(m_0)$  – число связей базовой детали;

$t_c(m_i)$  – число связей детали.

## 2. Определение всех поверхностей сопряжения различных элементов.

Необходимо выявить все поверхности сопряжения для каждого элемента, чтобы принять окончательное решение относительно типа конструктивного элемента определенного в ходе решения задачи первого уровня. Для того чтобы определить являются ли поверхности сопрягаемыми, как минимум три точки каждой поверхности должны иметь общие координаты.

$$g_{i1} = g_{j1} \rightarrow \{x_{is}, y_{is}, z_{is}\} = \{x_{js}, y_{js}, z_{js}\};$$

$$g_{i2} = g_{j2} \rightarrow \{x_{ic}, y_{ic}, z_{ic}\} = \{x_{jc}, y_{jc}, z_{jc}\};$$

$$g_{i3} = g_{j3} \rightarrow \{x_{ic}, y_{ic}, z_{ic}\} = \{x_{jc}, y_{jc}, z_{jc}\};$$

где  $g_{is}$  и  $g_{js}$  – начальные точка линий;

$g_{ic}$  и  $g_{jc}$  – конечные точка линий;

$$g_{i1}, g_{i2}, g_{i3} \in p_i;$$

$$g_{j1}, g_{j2}, g_{j3} \in p_j;$$

где  $p_i$  и  $p_j$  – поверхности;

$$p_i \cap p_j.$$

## 3. Идентификация элементов.

После окончательного определения состава конструктивных элементов и сопряжений поверхностей каждого конструктивного элемента, можно идентифицировать и тип детали, к которому относится данный элемент.

$$m_i = m_1 \rightarrow m_i = \{a_{1-1}, a_{1-2}, a_{1-i}\},$$

где  $m_i$  – любая деталь;

$m_1$  – идентифицируемая деталь.

#### 4. Пространственная ориентация элементов относительно базового.

Так как все детали идентифицированы и установлены поверхности их сопряжения, можно установить их координатное положение друг относительно друга и получить представление об общем контуре и габаритах изделия в целом. В отличие от конструктивных элементов, каждая деталь имеет одну точку, которую можно использовать для установления определенности положения деталей в пространстве – точка центра масс  $g_{ц}$ , используя матрицу перемещения  $M_{пер}$  относительно рабочей системы координат файла сборщика.

$$M_{пер} = M_r \times M_v,$$

где  $M_{пер}$  – матрица перемещения;

$M_r$  – матрица поворота;

$M_v$  – матрица переноса.

$$M_{пер} = \begin{vmatrix} xx_0 & xy_0 & xz_0 \\ yx_0 & yy_0 & yz_0 \\ zx_0 & zy_0 & zz_0 \end{vmatrix} \times \begin{vmatrix} x_v \\ y_v \\ z_v \end{vmatrix},$$

$$\begin{vmatrix} x_v \\ y_v \\ z_v \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} x_0 + x_i \\ y_0 + y_i \\ z_0 + z_i \end{vmatrix}.$$

Решение задачи второго уровня позволит иметь представление об изделии в целом, структуре и составе каждой входящей детали. С точки зрения методики не существует привычной семантической привязки к какому-либо конкретному наименованию, а лишь отнесение к типу деталей, таким образом, в итоге будет

определено изделие, состоящее из  $n$ -ного числа деталей с установленным составом и структурой.

Для целей автоматизации обработки данных о конструктивных элементах деталей разумно отталкиваться от разработанных в нашей стране общероссийских классификаторов технологических процессов и технологических переходов.

Набор элементов таких деталей будет отличаться, а, следовательно, будут отличаться и способы их моделирования и изготовления.

Определение конструктивно-технологических параметров детали и отнесение ее к определенному типу, оказывает существенное влияние на ее последующее базирование. Введем несколько правил.

### **1. Определение состава конструктивных элементов $a_i$ .**

Согласно прецедентной практике типовые детали содержат определенные конструктивные элементы характерные только для данного типа детали:

$$a_{i1}, a_{i2}, a_{i3} \in m_i;$$

$$a_{j1}, a_{j2}, a_{j3} \in m_j,$$

где  $m_i$  –деталь  $i$ -го типа;

$m_j$  –деталь  $j$ -го типа.

### **2. Определение полуфабриката.**

Для определения конструктивно-технологических свойств детали важным параметром является выбор полуфабриката заготовки, по умолчанию профильный полуфабрикат считается более жестким чем листовой, так же стенка, выполненная из плиты будет более жесткой чем выполненная из листа.

### 3. Определение постоянной толщины $s$ детали.

Помимо физико-механических свойств полуфабриката часть которых закладывается в электронную модель при проектировании, большое влияние оказывает толщина материала, как правило постоянная толщина присуща деталям, выполненным из листового полуфабриката, тогда как выполненная из плиты может иметь значительные перепады толщины

### 4. Определение точки центра масс $g_{ц}$ .

Точка центр масс каждой отдельной детали имеет собственные координаты. Относительно точки центра масс можно судить о расположении и сопряжение деталей, входящих в сборочную единицу. Наиболее близкое значение координат центров масс будет иметь две детали со сходными габаритами и полным сопряжением одной из поверхностей:

$$g_{ц} = \{x_{ц}, y_{ц}, z_{ц}\},$$

где  $\{x_{ц}, y_{ц}, z_{ц}\}$  – координаты точки центра масс.

Таким образом, благодаря классификации деталей, появляется четкое разделение групп деталей, что позволяет на их основе создать базовые модели, проанализировать их типовое построение и выявить наиболее рациональное. Как уже было отмечено выше, все анализируемые детали, составляющие конструкцию узлов и агрегатов самолета, можно и рационально представить, как сочетание типовых конструктивных элементов. Выбор состава этих элементов, вариантов их исполнения, анализ сочетаемости этих элементов позволяет формализовать процесс распознавания не только каждой детали, но и всей сборочной единицы.

## Выводы

Таким образом, на выходе мы получаем классифицированное изделие, без привязки к семантике, со сформированным списком параметров, селекция которых проводится согласно разработанному списку правил [10]. Правила отбора значимых параметров в свою очередь формируются в зависимости от конечной цели и в дальнейшем позволяют передавать полученные данные для определенного результата.

Существующий аналог, например DFMPro, позволяет производить оценку технологичности изделий, а разрабатываемая методика в программном модуле распознавания реализует автоматизированный конструктивно-технологический анализ для оценки технологичности и проектирования технологической (сборочной) оснастки, а также с последующей возможностью разработки маршрута изготовления деталей. Процесс распознавания в DFMPro - по клику пользователя, а в предлагаемой методике процесс полностью автоматизирован. Создание технологических правил в DFMPro - технологические правила могут настраиваться с помощью менеджера правил; а в предлагаемой авторами - полностью формализованный набор правил. Принципиальная инновационность заключается в том, что используя программный модуль распознавания будет устанавливаться состав и структуру изделия, выявлять значимые конструктивно-технологические параметры, необходимые и достаточные только в рамках реализации поставленной задачи. Без участия, но под контролем конструктора, технолога.

*Представленная в рамках данной статьи работа проводится при финансовой поддержке фонда содействия развития малых форм предприятий в научно-технической сфере в рамках проекта: «Разработка системы автоматизированного анализа изделия авиационной техники при технологической подготовке производства» конкурс УМНИК 16-10, договор 0025320 от 11.10.2016г.*

### **Библиографический список**

1. Aksenov S.A., Chumachenko E.N., Kolesnikov A.V., Osipov S.A. Determination Of Optimal Conditions For Gas Forming Of Aluminum Sheets // Procedia Engineering. 2014. Vol. 81, pp. 1017-1022.
2. Aksenov S.A., Zakhariev I.Y., Kolesnikov A.V., Osipov S.A. Characterization of superplastic materials by results of free bulging tests // Materials Science Forum. 2016. Vol. 838-839, pp. 552-556.
3. Gozbenko V.E., Kargapol'tsev S.K., Kornilov D.N., Minaev N.V., Karlina A.I. Ddefinition of the main coordinates of the car with two-level spring suspension // International Journal of Applied Engineering Research. 2016. Vol. 11. no. 20, pp. 10367-10373.
4. Grechishnikov V.A., Khusainov R.M., Akhkiyamov D.R., Yurasov S.Y., Yurasova O.I. Identifying the primary rigidity axes in the elastic system of a metal-cutting machine // Russian Engineering Research. 2016. Vol. 36, no. 8, pp. 673–676.

5. Ирзаев Г.Х. Экспертные методы управления технологичностью промышленных изделий. - М.: Инфра-Инженерия, 2010. – 192 с.
6. Khusainov R.M., Sharafutdinov I.F. Methods of assessing the dynamic stability of the cutting process using Unigraphics NX // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 134 (2016) 012042. URL: <http://dspace.kpfu.ru/xmlui/handle/net/105605>
7. Krastyaninov P.M., Khusainov R.M. Selection of equipment for machining processing of parts using NX and TEAMCENTER programs // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 134 (2016) 012041. URL: <http://dspace.kpfu.ru/xmlui/handle/net/105601>
8. Митин А.А. Применение механизма продукционных правил для вывода ограничений целостности в графических редакторах АСТПП // Известия Орловского государственного технического университета. Серия: Информационные системы и технологии. 2007. № 4-2/268 (535). С. 186-194.
9. Shmakov A.K., Mironenko V., Kirishina K.K., Stanislavchik A.S., Kotov V.V. Effect of the average velocity of the free part of the semifinished product on the process of pneumothermal forming in the superplastic regime // Metallurgist. 2013. Vol. 57, no. 1-2, pp. 8-12.
10. Денискин Ю.И., Дубровин А.В., Подколзин В.Г. Управление качеством процессов жизненного цикла инновационной продукции на основе компьютерной системы менеджмента качества // Труды МАИ. 2017. № 95. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=84603>

11. Ирзаев Г.Х. Исследование и моделирование информационных потоков конструкторско-технологических изменений на этапах освоения и серийного производства изделий // Организатор производства. 2012. Т. 52. № 1. С. 131-135.
12. Ахатов Р.Х., Однокурцев К.А. Формализованный метод выбора и анализа сборочных баз в самолетостроении // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета им. академика М.Ф. Решетнева. 2009. № 2 (23). С. 232-237.
13. Кабанов А.А. Объектная модель анализа изделий ЛА с учетом явления наследования для оценки и управления эффективностью производственных систем дискретного машиностроения в ходе их организационно-технического проектирования и модернизации // Научно-технический вестник Поволжья. 2014. №6. С. 161-168.
14. Однокурцев К.А. Лабораторное техническое оснащение для автоматизированного управления элементами сборочной оснастки // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2011. № 12 (59). С. 41-47.
15. Чимитов П.Е. Формирование образа изделия для задач проектирования технологического процесса сборки планера самолета сборки // Материалы XII Международной научно-практической конференции «Решетнёвские чтения», Красноярск, 10-12 ноября 2008, С. 183-184.

16. Шмелев В.В. Решение оптимизационной задачи на сетевой модели технологического процесса // Труды МАИ. 2016. № 88. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=70696>