

**КОНЦЕПТУАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ СИНТЕЗА  
ЦЕЛЕУСТРЕМЛЁННЫХ СИСТЕМ И ПРОЦЕССОВ ПРОИЗВОДСТВА  
СЛОЖНОЙ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОЙ ПРОДУКЦИИ**

Приоритетные направления научно-технического развития производств сложной машиностроительной продукции предусматривают решение задач создания как новых, так и совершенствование существующих, используемых в текущем времени производственных комплексов.

С этих позиций под обобщённой постановкой задачи проектирования (ЗП) в данной работе понимается трёхкомпонентная система

$$(P_a, P_b, P_{усл}), \quad (1)$$

где  $P_a$  – некоторый предмет задачи, заявка на объект проектирования, представляющая потребность и мотивы, относящиеся к некоторому фрагменту действительности, в частности, опытному серийному производству сложной продукции машиностроения (ПМ);  $P_b$  – виртуальная модель или модель потребного будущего производства ПМ, которая отвечает требованиям определённых стандартов;  $P_{усл}$  – условия реализации задачи или ограничения на временные, трудовые, материальные ресурсы  $Q$ .

Под ЗП любых объектов в дальнейшем понимается задача построения продуктивной модели объекта  $M(O)_{пр}$ , для которого определена целевая модель  $M(O)_ц$  и установлены условия или ресурсы  $Q$  решения задачи. ЗП в обобщённой постановке может быть представлены коротжеами

$$ЗП = \langle M(O)_ц, M(O)_{пр}, Q \rangle = \langle \langle F_n M'(O), Z', Y', X', G \rangle, M(O)_{пр}, Q \rangle, \quad (2)$$

где компоненты  $Z', Y', X', G$  являются в общем случае векторами, имеющими свои размерности.

Требования к функциональным свойствам объектов производства (ОП) задаются в постановке ЗП в форме модели  $F_n M \subseteq Y_{II} \times Z$ . Требования к условиям функционирования ОП  $Z'$  задаются допустимыми областями множества возможных состояний среды (внешних  $Z_x$  или окрестностных  $Z_o$  условий), а также продолжительностью функционирования  $Y_{II}$ .

Требования к свойствам ОП помимо  $F_n M(O)$  ограничивают:

а) допустимую область множества возможных значения внешних (существенных и утилитарных) свойств ОП  $Y'$  для всех  $z \in Z$ ;

б) допустимую область множества возможных значения внутренних (сущностных) свойств объекта  $X'$ , которые характеризуют принципы его построения/действия и обуславливают обладание множеством внешних свойств  $Y$ , согласованных с  $FnM(O)$ .

Опыт участия в решении задач совершенствования производства ПМ и проектирования отдельных систем производства (СП), выполненных авторами в последние годы, привёл к построению достаточно общих аспектов теории синтеза и анализа объектов производства и их СП, которые сформулированы в рамках предложенной концептуальной модели.

Современные системы производства сложной продукции машиностроения представляют собой корпоративные комплексы, состоящие из отдельных хозяйствующих субъектов, связанных структурой сложных отношений. В каждом из субъектов совместного производства, занятых, как правило, серийным производством ПМ, для изготовления опытных, а затем и серийных образцов этой продукции должны быть созданы и включены в общую сеть дополнительные технологические цепочки, обладающие сложной структурой и составом. Реализация такого подхода требует развития технологий и, как следствие, приводит к изменению не только содержания процессов производства, но и структуры связей, изменение которых оказывает наибольшее воздействие на состояние технологических, технических и, в общем случае, экономических систем.

Для решения задач системно-агрегативного проектирования разработана методология и методы представления преобразования ОП и СП, осуществляемое на апостериорном представлении проектируемого объекта, реализуемого в рамках единой концептуальной модели, в основу которой положено математическое изучение понятия «образ», рассматриваемого в рамках точного формализма, который использован в качестве концептуальной основы для синтеза и анализа ОП и СП ПМ как совокупности элементов операционного комплекса, объединённых общей целью [1].

В качестве базовых принципов формального представления процессов порождения, преобразования и обработки ОП, систем производства (СП), технологического процесса производства (ТПП), технологии производства (ТП) используются следующие формализмы:

1. Любая структура порождается с использованием определённых непроеизводных объектов, характер которых меняется от задачи к задаче, – в общем случае, образующих  $a$ , совокупность которых для решения конкретных задач есть множество  $A$ ,  $a \in A$ .

Так множество всех образующих  $A$  для агрегатно-сборочного производства

состоит из непересекающихся классов образующих  $A^\alpha$ ,  $A^\alpha \subset A$ , где  $\alpha$  – индекс класса образующих.

$$A = \bigcup A^\alpha, A^\alpha - \text{непересекающиеся классы.} \quad (3)$$

2. В качестве образующих, с общих позиций, выбираются множества, отношения или функция. Реальные образующие, например в ОП или СП, представляют структурное объединение этих образующих по определённым правилам  $\mathfrak{R}$  в регулярные конфигурации для решения отдельных задач, являющиеся на этом этапе рассмотрения абстрактными конструкциями ОП или СП.

3. Формализм теории образов требует введения принципа наблюдаемости, позволяющий перевести регулярные конфигурации в наблюдаемые объекты (изображения) путём введения идеального наблюдателя, снабжённого системой наблюдения.

С формальных позиций изображения  $I$  являются классами эквивалентности, индуцированными на множестве регулярных конфигураций  $b(\mathfrak{R})$  правилом идентификации  $R$ , и представляют собой объекты, поддающиеся наблюдению, а множество всех изображения  $\mathcal{T}$  – алгеброй изображений:

$$\mathcal{T} = b(\mathfrak{R}) / R = \langle A, S, \Sigma, \rho \rangle / R. \quad (4)$$

Следующим естественным уровнем абстрагирования является образ, под которым будем подразумевать некоторое подмножество множества  $\mathcal{T}$ .

В заключение отметим, что оба процесса формирования «конфигурация – изображение» и «изображение – образ» предполагает разбиение множеств.

4. С помощью идеального наблюдателя и системы наблюдения получаем абстрактную логическую конструкцию, описываемую алгеброй изображений. Для построения реалистического формализма теории образов необходимы математические средства, чтобы определить связь логической конструкции, описанной выше и изображением, полученное реальным наблюдателем.

Для решения задач системного синтеза (проектирования), анализа и управления развитием производства ПМ использована единая методология представления образов для математического моделирования их компонентов (образующих), технологических целей (конфигураций), систем производства (образов), полученных из изображений.

В качестве такой методологии в работе применена тензорная методология, в рамках которой использован метод двойственных сетей для построения сетевых моделей, расчёта и анализа трудоёмкости ОП и СП с переменной структурой.

Математической основой представления образов и их компонентов является пространство-структура, состоящее из различных видов подпространств-структур: комбинаторная топология и тензорная методология, рассматриваемая как удобный набор взаимно и однозначно самосогласованных математических формализмов, предназначенных для решения уравнений, определяющих связи между подпространствами-структурами-преобразованиями и компонентами. В качестве фундаментального уравнения используется зависимость между сильными компонентами графа  $G=(A^0, \Gamma)$  ОП или СП, АСП, представляемыми порождёнными подграфами

$$G' = \{A^0 - R(a_k^0) \cap Q(a_k^0)\}, \quad (5)$$

где  $A^0$  – множество точек,  $\Gamma$  – отображение множества  $A^0$  в  $A^0$ ,  $R(a_k^0)$  – достижимые множества точек  $A^0$ ,  $a_k^0 \in A^0$ ,  $Q(a_k^0)$  – контрдостижимое множество и конечными ориентированными простыми цепями  $C_i = \sum_{i=1}^y m_i a_i'$ , которые представляют систему координат:

$$U\{A^0 - R(a_k^0) \cap Q(a_k^0)\} = \sum_{\#} \left\{ \sum_{i=1}^y m_i a_i' \right\}. \quad (6)$$

Предложенная зависимость, рассмотренная в разных подпространствах-структурах, введённых выше для представления структур ОП и СП, формирует систему уравнений

$$U\{A^{0(q)} - R(a_k^{0(q)}) \cap Q(a_k^{0(q)})\} = \sum_{\#} \left\{ \sum_{i=1}^y m_i a_i^{0(q)} \right\}, \quad (7)$$

где  $q$  – индекс данного подпространства-структуры.

Для решения задач, в частности, переподготовки производства, где необходимы расчёты изменения процессов при изменении структуры, требуется формализация описания структуры производства.

Для полного описания состава и структуры ОП или СП введён следующий математический формализм представления пространств-структур. Всё пространство сборочных единиц (СЕ) и сборочных частей (СЧ) изделия – континуальное множество точек  $N$ . Носителем физических свойств этого пространства служит дискретное подмножество  $M$ , каждая точка которого является не только геометрической, но и вещественной

$$N = S_q \cup M_q; S_q \cap M_q = \emptyset; q = 1, 2, 3, \quad (8)$$

где  $S_q$  – подмножество, дополнительное к  $M_q$ .

Индекс  $q$  имеет следующий смысл. Описание всего пространства через подпространства  $S_1$  и  $M_1$ , оказывается только необходимым, но недостаточным, т.к. связность подпространства  $S_1$  нарушается тем, что дополняется подпространством  $M_1$  (точек соединения). Число подпространств, необходимых для полного описания пространства, например, СП, определяется одним критерием: в конкретных задачах, например, сборки, последнее из них  $(S_n \cup M_n)$  должно описывать все соединения компонентов, т.е. отражать сетевую структуру СП (двойственная сеть).

Оптимальным числом подпространств-структур, необходимым и достаточным для полного описания ОП или СП в рамках предложенной теории представлений, является число три, т.е.  $q=1, 2, 3$ . Тогда полная система уравнений, описывающих ОП или СП для указанных целей, имеет вид:

в подпространстве-структуре  $S_1 \cup M_1$

$$\text{для } M_1: \quad A^{0(1)} = \delta_{ij}, \quad (9)$$

$$\text{для } S_1: \quad U\{A^{0(1)} - R(A_i^{0(1)}) \cap Q(A_i^{0(1)})\} = \sum_{n=1}^{\beta} \left\{ \sum_{k=1}^{\alpha} m_k S_k^{1(1)} \right\}; \quad (10)$$

в подпространстве-структуре  $S_2 \cup M_2$

$$\text{для } M_2: \quad A^{0(2)} = \delta_{\alpha\beta}, \quad (11)$$

$$\text{для } S_2: \quad U\{A^{0(2)} - R(a_i^{0(2)}) \cap Q(a_i^{0(2)})\} = \sum_{\beta} \left\{ \sum_{\alpha=1}^{\alpha} m_{\alpha} S_{\alpha}^{2(2)} \right\}; \quad (12)$$

в подпространстве-структуре  $S_3 \cup M_3$

$$\text{для } M_3: \quad A^{0(3)} = C_{\alpha\beta}^{\alpha} \delta_{\alpha\beta}, \quad (13)$$

$$\text{для } S_3: \quad U\{A^{0(3)} - R(a_i^{0(3)}) \cap Q(a_i^{0(3)})\} = \sum_M \{m_i S_i^{3(2)}\}. \quad (14)$$

Решая уравнения (9), (11), (13), получаем информацию о составе СП, а решая уравнения (10), (12), (14) – об её структуре, которая позволяет рассмотреть лишь определённый класс соединений, в рамках концептуальной модели образа, например, СП. При этом в состав с общих позиций и для использования тензорной методологии введён фундаментальный математический объект – символ Кронекера  $\delta_{mk}$ . Так, тензорное представление различных сборочных пространств в общем случае  $n$ -мерного евклидова пространства со слоем  $S_1$  записывается в виде компанд-тензора

$$\delta_{ij} =$$

	1	2	3	...
1	$(\delta_{\alpha\beta})_1$			
2		$(\delta_{\alpha\beta})_2$		
3			$(\delta_{\alpha\beta})_3$	
...				
n				$(\delta_{\alpha\beta})_n$

где  $(\delta_{\alpha\beta})_n$  – единичный тензор для базовых компонент объект.

Тип соединений  $\Sigma$ , то есть множество графов, представляющих, например, сеть СП является совокупностью соединённых элементов (участков, цехов, производств или с общих позиций – ветвей), в которых протекают процессы (для АСП – соединения).

Процесс синтеза СП, который математически представляется  $n$ -мерной матрицей, тензором преобразования  $C$  и формулой преобразования (уравнением), описывается введёнными абстрактными действиями, которым даётся определённая физическая и геометрическая интерпретация.

В предлагаемой теории отождествление математических формул с физической реальностью осуществлено с помощью системы аксиом, составляющих основу прикладной математической теории представлений ОП, СП, ТП. Система аксиом, включающая 10 аксиом, разбитых на три группы, используется для определения триединства «пространство-преобразования-компоненты», создающие ОП, СП, ТП.

Первая группа аксиом – единство трёх структур на базе общей цепи, состоящей из отдельных звеньев, обрабатывает любой рассматриваемый ОП в геометрический комплекс  $K$ , который определяется, в зависимости от этого объекта, одной или несколькими формально составленными суммами ориентированных симплексов.

Вторая группа аксиом служит для формализаций структур связности, где каждое соединение ОП или СП рассматривается как точка, представляющая собой чаще всего узел связей в структуре.

Третья группа аксиом описывает полную структуру связей, в которой учитываются все механические свойства этих связей ОП и логические – СП.

Для построения сетевой модели СП как двойственной сети устанавливаются аналогии между процессами сети и СП, структурой сети и системы в целом.

Вводится инвариант двойственных сетей, который связывает процессы и структуру, обеспечивает возможность расчёта СП по частям с использованием процедур параллельного инжиниринга.

Для этого сетевая модель системы разделяется на подсистемы (сильный компонент – конфигурация), которые рассчитывают отдельно, а затем объединяют. Получены алгоритмы расчёта, например, трудоёмкости изготовления отдельных агрегатов и их компонент.