УДК 621.015

ИССЛЕДОВАНИЕ И СИНТЕЗ ОПТИМАЛЬНЫХ СТРУКТУР ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ ПРОИЗВОДСТВА ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

© 2020 С.Ф. Тлустенко

Национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва

Статья поступила в редакцию 02.12.2020

Исследованы структуры технологических систем (ТС) производства на разных уровнях иерархии с целью их системного анализа для возможности в условиях автоматизации технологических процессов проектировать оптимальные по целевым критериям проекты производства и вычислять оценку эффективности. Предложена методика описания и построения структур образующих в своем подпространстве, что позволяет обосновывать процедуры формирования функциональных подмножеств, которые посредством связей образуют комбинаторную структуру в топологии комплексной ТС. Предложенная методика взаимного отображения одного множества на второе позволяет формировать требуемые характеристики и свойства узлов связи структуры по её связности, назначению и условиям оптимизации в реальных условиях работы по задаваемым правилам вхождения любой образующей системы в сеть связей общей системы производства летательных аппаратов.

Ключевые слова: множества, технологическая система, формализованное преобразование, комбинаторная структура, топология, инициализация-деструктуризация, тензор преобразования.

DOI: 10.37313/1990-5378-2020-22-6-43-47

Развитие современных информационных систем производства летательных аппаратов (ЛА) на базе представлений и терминологии теории множеств связано, в частности, с методами выделения в составе некоторой системы логически и функционально связанных между собой значений параметров, определяющих локальные образующие Ci общей структуры производства, и представляющие собой системные подмножества, относящиеся к остальным образующим общей структуры как самостоятельным подмножествам по иерархии системных связей в общей структуре.

В связи с тем, что образующие такого системного состава входят в сеть связей системы с вполне определенной структурой, то для любой пары образующих системы можно установить наличие и характер связи. Это дает возможность определить, какие образующие второго множества поставлены в соответствие образующей первого множества, или как на первое множество отражено второе. Такое отображение одного множества на второе позволяет формировать требуемые характеристики и свойства узлов связи структуры по её связности, которые соответствуют правилам вхождения любой образующей системы в сеть связей общей системы по схеме Ci=1, Ci=2 $\in$ b(P), где b(P) – подструктура более высокого порядка иерархии в системе P [3].

Исследование и упорядочивание в проекте общей системы таких зависимостей позволяет формализовать процессы проектирования производственных систем на основании оптимизируемых правил соединения образующих, построения теоретико-множественной модели пространства-структуры, состоящей из множества узлов связей mi, абстрактных образующих, множества соединений σ и на основании системы ограничений ввести теоретико-графовую модель упорядочения конечного множества технологических σ-операций в полной структуре производственной системы.

Следовательно, для описания полной структуры ПС необходимо и сходное описание для ее образующих, так как каждая образующая является в своем подпространстве некоторой структурой, а некоторое множество их посредством связей образует саму систему, на основании которой рассмотрим также понятие комбинаторной структуры в топологии системы P. Для этого рассмотрим две системы C $\in$ b(P) и адекватные им подмножества N(c1) и N(c2), образованные отношениями согласования ν для системы Ci=1,Ci=2 соответственно. Введем обозначение σ12(i=1,i=2) как систему соединений внешних связей, принадлежащих множеству N(c1), со связями, принадлежащими множеству N(c2) при условии, что устанавливаются только парные соединения. Тогда объединенная система может быть представлена как Ci=1 σ12 Ci=2, при этом должны выполняться условия:

состав Ci=1 σ12 Ci=2 = состав Ci=1 $\cup$ состав Ci=2;

соответственно структура из Ci=1σ12Ci=2= структура Ci=1 $\cup$ структура Ci=2.

Из этого следует, что Ci=1σ12Ci=2 $\in$ b(P) в том и только в том случае, если:

Тлустенко Станислав Федорович, кандидат технических наук, доцент. E-mail: titan250@mail.ru

а) структура $Ci=1\sigma12Ci=2 \in C$;

б) условие $\beta\nu\beta'$ выполняется для всех новых связей, соединенных в соответствии с $\sigma12$ по признаку βi, где ν – отношения согласования связей для $\beta\nu\beta'$.

Отметим, что таким способом на подсистемах $Ci=1\sigma12Ci=2 \in C$ можно задавать бинарные операторы, которые в общем случае определены лишь на некотором подмножестве, определяемом типом соединения и отношением согласования. Относительно свойств b(P) представленной в пространстве системы можно сделать следующие утверждения:

1) Применение преобразований подобия к регулярным системам приводит к получению также регулярных систем.

2) Если $Ci=1\sigma12Ci=2 \in$ b(P), то S (Ci=1) $\sigma12$ S(Ci=2) $\in$ b(P), где S – формализованное преобразование в системе по функционированию. Доказательство утверждения (1) заключается в том, что структура

(SCi) = структуре (Ci) $\in$ C, а так как отношение согласования ν является S -вариантным, то все согласования связей $\beta\nu\beta'$ остаются в системе С истинными после применения преобразования S ко всем Ci - образующим, входящим в состав структуры (C).

При доказательстве утверждения (2) отметим, что преобразование подобия (S) не затрагивает соединений, поэтому на основании соотношения состав (SC)= {sa1, sa2, …, san} имеем

состав [S(Ci=1σ12Ci=2)]=состав (SC1) $\cup$ состав (SC2)=состав (SC1) σ12 SC2)]

Таким образом, в утверждении (2) равенство справедливо.

Как указывалось выше, некоторые допустимые сети встречаются в виде подсетей, которые в некоторых случаях удобно рассматривать в качестве исходных компонент как образующих производственной подсистемы с заданными фиксированными внутренними связями, которые описываются своим набором $\sigma1 \subseteq \sigma$ подматрицей соединения $C1 \subseteq C$.

В этом случае можно утверждать, что сеть с элементами Ci является подсетью сети С, что вводит в структуру bn(P) локальный порядок. Построение такой сети и её оптимизация может быть представлена моделью в виде диаграмм событий (ДС) с зависимыми, независимыми или другими по характеру взаимосвязей событиями.

Если $C2=C1\sigma12C'$, где C'- составная подсистема, $Ci=1\sigma12Ci=2 \in b(P)$, то $C1 \subseteq C2$, и, следовательно, композиция конфигураций является монотонной операцией относительно заданного локального порядка. Эта операция приводит всегда к увеличению информации и ее упорядочению. При построении модели ПС, исходим из понятия пространства-структуры, введенного в общей теории и используемого в качестве основы при изучении свойств упорядоченности соединения элементарных компонент в допустимые структуры, множество которых определим как математическую структуру, записанную в виде набора из четырех элементов: b(P)={A,S,C, ν), где A – набор компонент системы, S - множество отображений P: $X \to \overline{X}$, образующее множество преобразований подобия; C - матрица соединений, описывающая множество всех допустимых множеств соединений σ; ν – отношение согласования.

Рассмотрим сложный объект (объектно-ориентированную модель) A, в состав которого входят объекты-компоненты $A_1, A_2, A_3 \ldots$ и т.д. Если S_0 есть пара событий «инициализация-деструктуризация» экземпляра объекта A, то в числе других пар событий, происходящих в опорном (p_0)-базисе, можно выделить также пары «инициализация-деструктуризация» экземпляров компонентов $A_1, A_2, A_3 \ldots$.Эти пары в свою очередь образуют (p_0) p_1-базисы событий, где возникают события, присущие этим объектам-компонентам. Очевидно, что появление в любом из новых базисов (p_0) (p_1)-й пары событий приводит к появлению нового опорного базиса - (p_0)(p_1) p_2- базиса. Дальнейшее порождение опорных базисов теоретически не ограничивается и практически может возникать, например, если объекты-компоненты $A_1, A_2, A_3 \ldots$ сами являются сложными.

Таким образом, при моделировании реальной предметной области диаграмма событий может быть довольно сложной. На рисунке 1 показан абстрактный пример ДС, в которой в результате ветвления появляются сначала пары S_0, S_1, S_2, S_3, потом - S_{21} и далее S_{211}.

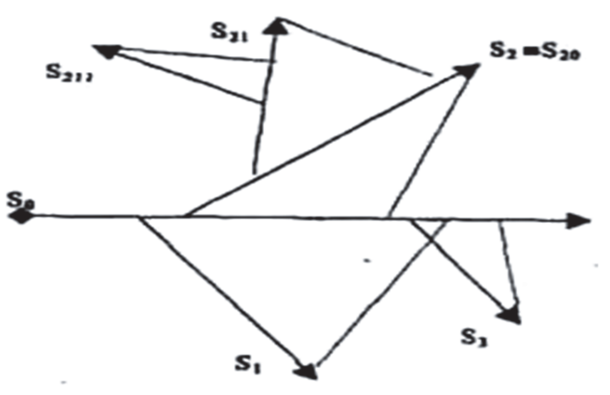

Рисунок 1. Пример сложной ДС с порождением опорного (p_0)(p_1)(p_2) p_3 - базиса событий (ребро S_{211})

Все множество идентификаторов событий в сложной ДС есть уже встречавшееся ранее множество (*P*), которое позволяет обратиться к конкретной паре (мультивектору) событий. Заменяя (*P*) на *P*, получим множество плавающих индексов

$$P = \{p_0, p_0p_1; p_0p_1p_2; \ldots; p_0p_1\ldots p_i; \ldots\}.$$

События в каждой паре рассматриваются как события преобразования опорного базиса, которым соответствует свой тензор преобразования *C*. Представление всей сложной ДС с помощью введенных понятий (в частности, с помощью тензоров *C*) выполняется путем обобщения:

$$C^{(p)}_{(p)(0)} \to C^{(p)}_{(p)(p_1=0)},$$

где $p \in P$.

Фактически это означает, что множеству ребер ДС сопоставляется множество тензоров преобразований, которые в данной системе координат есть:

$$C_p = \left\{C^{p_0}_{p_0(p_1=0)}, C^{p_0p_1}_{p_0p_1(p_2=0)}, \ldots, C^{p_0p_1p_2\ldots p_{n-1}}_{p_0p_1p_2\ldots p_{n-1}(p_n=0)}\right\},$$

где первый элемент множества – набор всех тензоров преобразований p_o – базиса (исходного опорного ребра); второй - всех тензоров преобразований всех (p_o) p_1 базисов, третий – всех (p_0)(p_1) p_2 – базисов и т.д.

Для формального представления ДС введем новое, производное понятие – базовый геометрический объект (БГО), который в исходной системе координат задается парой

$$< \delta_{\alpha\beta}, C_p >,$$

где $\delta_{\alpha\beta}$ есть представление исходного опорного базиса событий (центрального ребра в диаграмме событий). В терминах событий задание базового геометрического объекта может быть выполнено с помощью пары

$$< \delta_{\alpha\beta}, S_p >,$$

где

$$S_p = \left\{S^{\alpha\beta p_0}, S^{\alpha\beta p_0 p_1}, \ldots, S^{\alpha\beta p_0 p_1 \ldots p_{n-1}}\right\}$$

- множество мультивекторов событий БГО.

Так как каждый мультивектор однозначно представляет некоторую пару событий, то множество S_p можно назвать также множеством событий (пар событий).

Введенные правила образования собственного базиса событий (перехода из одного базиса в другой) при известных компонентах БГО позволяют последовательно перейти из одного базиса в другой с помощью формулы:

$$S^{\alpha\beta(r_0)\ldots(r_j=0)} = C^{(r_0)\ldots(r_j=0)}_{(p_0)} C^{(p_0)}_{(p_0)\ldots(p_i=0)} S^{\alpha\beta(p_0)\ldots(p_i=0)}, \quad (1)$$

где сложный индекс $(r_0)\ldots(r_j = 0) \in (P)$ и вместо ро-базиса, через который осуществляется переход, может быть любой другой базис, который является общим для той и другой пар событий.

Чтобы определить компоненты БГО в новой системе координат, применим введенные правила *PQ*-преобразований ко всем этим компонентам:

$$S^{\alpha\beta q} = T^q_p S^{\alpha\beta p},$$

где $p \in P, q \in Q \Leftrightarrow P$.

Обозначив все множество тензоров *PQ*-преобразований при переходе в новую *Q*-систему координат как $T^P_{(Q)}$ можно записать формулу для определения БГО в этой системе координат:

$$< \delta_{\alpha\beta}, C_{(Q)} >= T^P_{(Q)} < \delta_{\alpha\beta}, C_{(P)} > \quad (2)$$

или

$$< \delta_{\alpha\beta}, S_{(Q)} >= T^P_{(Q)} < \delta_{\alpha\beta}, S_{(P)} >. \quad (3)$$

Все множество тензоров преобразований при переходе из исходной *P*-системы во все возможные *Q*-системы обозначим

$$T_Q = \{T^p_{(Q)} | (Q) = 1,2,3,\ldots\}.$$

Задание БГО в исходной *P*-системе координат, формул (2) или (3) и множества T_Q эквивалентно полному математическому заданию геометрического объекта [2]. Это же позволяет говорить о задании всех его компонентов, которые также являются геометрическими объектами.

Упорядочение *PQ*-преобразований и обеспечение возможности последовательного перехода от одной (Q)-системы координат к другой (Q)-системе достигается определением группы преобразований [2]. Эту группу G_{PQ} *PQ*-преобразований составляет набор матриц тензора *T*, каждая из которых является выражением *T* для частных систем координат:

$$G_{PQ} =< \left\{T^P_P, T^P_{(Q_0)}, T^{(Q_0)}_{(Q_1)}, \ldots, T^{(Q_{j-1})}_{(Q_j)}, \ldots\right\}, (\bullet) >,$$

где T^P_P – единичный элемент группы - матрицы тождественного преобразования; $(\bullet)$ – операция умножения.

Использование G_{PQ} позволяет, с одной стороны, организовать важные процедуры получения представлений одних экземпляров объекта через представления других и, с другой стороны, позволяет выполнить переход в некоторую (Q)-систему с помощью последовательности преобразований

$$T^P_{(Q_j)} = \left\{T^{(Q_{j-1})}_{(Q_j)} \ldots T^{(Q_0)}_{(Q_1)} T^P_{Q_0}\right\}.$$

Введение понятия БГО, как формального представления ДС экземпляра объекта, и формул для определения его компонентов в разных системах координат позволяет получить формальное событийное представление экземпляров объекта. Однако полученная система понятий не является достаточной, так как не отражает возможных взаимосвязей между событиями внутри ДС, происходящими в разных опорных базисах. Для исследования и учета таких взаимосвязей введем понятия зависимого события и ситуации.

При имитации поведения различных систем целесообразно выделить два вида отношений между воспроизводимыми событиями: отношение порядка (в частном случае, хронологического) и отношение «причина-следствие» [5].

Взаимосвязь между событиями, которые порождают опорный базис, и событиями, происходящими в этом базисе, также может быть представлена этими отношениями. Отношение порядка устанавливает необходимые условия возникновения события, и в терминах введенных понятий может трактоваться так: « событие из пары $S_{(p_0)}$ может возникнуть в опорном базисе, образованном парой событий $S_{(0)}$, но не вне него». В символьной форме запишем это следующим образом:

$$S_{(p_0)} \leftarrow S_{(0)}.$$

Отношение «причина-следствие» можно трактовать так: «событие из пары $S_{(p_0)}$ обязательно возникает в опорном бизнесе, но не вне него». Если в первом случае считается, что событие возможно, то во втором - событие обязательно. Эту обязательность отобразим в записи с помощью знака « $\Leftarrow$ »:

$$S_{(p_0)} \Leftarrow S_{(0)}.$$

В более общем случае этими же отношениями могут быть связаны и события, происходящие в разных базисах. Очевидно, что отношения $S \leftarrow_{(\Leftarrow)} S_{(p)}$ некоторым образом накладывают ограничения на координаты *S* в опорном базисе. Эти ограничения можно охарактеризовать не только качественно (например, «*S* может произойти только после $S_{(p)вх}$» или «S обязательно происходит между $S_{(p)вх}$ и $S_{(p)вых}$»), но и количественно.

Дадим следующее определение.

Определение: Событие называется зависимым, если его координаты в том опорном базисе, где оно происходит, зависят от других событий не входящих в пару, которая образует этот опорный базис.

Если координаты события в опорном базисе не зависят от других событий, то оно является независимым.

Пусть в ДС, изображенной на рисунке 1, события из пары S_{211} являются зависимыми и могут произойти (или обязательно происходят) в таких точках А и В (рисунок 2), что выполняются условия:

$$A' = C_{21}C_2C_1^{-1}A;$$
$$B' = C_{21}C_2C_1^{-1}B,$$

где C_1, C_2, C_{21}, есть упрощенная запись матриц тензоров преобразования базиса событий

$$C_{(p_0=1)}^{(p_0=1)(p_1=0)}, C_{(p_0=2)}^{(p_0=2)(p_1=0)}, C_{(p_0=2)}^{(p_0=2)(p_1=1)(p_2=0)}.$$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, если известна точка *t(S)* события *S* в ситуационном базисе, то для любой точки *s* в опорном базисе события *S* можно ответить на вопрос о том, возможно ли возникновение события *S* в этой исследуемой точке. Для этого нужно найти проекцию точки *s* по формулам вида (2) в ситуационный базис ДС и сравнить ее координаты с t(S) в текущий момент выполнения технологических операции в ТС, что обеспечивает условиям автоматизации и контроля технологических процессов производства ЛА.

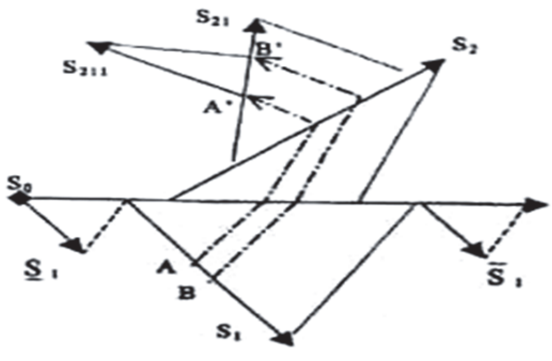

Рисунок 2. Диаграмма событий с зависимыми событиями соответственно. При этом А и В есть точки в опорном базисе пары S_1, с которой события S_{211} связаны одним из указанных выше отношений

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Калачанов В.Д., Джимай Е.В.* Формирование и оптимизация ресурсного обеспечения программ авиастроительного производства // Авиакосмическая техника и технология. 2005. № 4.
2. *Белковский С.В. Низамутдинов О.Б.* Постановка задачи синтеза оптимальной структуры распределенных АСУТП. Теоретические и прикладные аспекты информационных технологий: Сб. научн. тр., Пермь: НИИУМС, 2002.
3. *Партыка Т.Л., Попов И.И.* Математические методы / 2-е изд., испр. и доп. М.: Инфра-М; Форум, 2007. 464 с.
4. *Лазарсон Э.В.* Теория и методы решения многовариантных неформализованных задач выбора. Моногр. Пермь: Изд-во Перм. гос. техн. ун-та, 2008. 270 с.
5. *Ульянов М.В.* Ресурсно-эффективные компьютерные алгоритмы. Разработка и анализ. М.: Физматлит, 2008. 304 с.
7. *Dierk Raabe, Franz Roters, Frederic Barlat, Long-Qing Chen.* Continuum Scale Simulation of Engineering Materials // WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA April 5. 2004.
8. *Roters Franz, Eisenlohr Philip, Bieler Thomas R., Raabe Dierk*. Crystal Plasticity Finite Element Methods // WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA July 23. 2010.

RESEARCH AND SYNTHESIS OF OPTIMAL STRUCTURES OF TECHNOLOGICAL SYSTEMS FOR PRODUCTION OF AIRCRAFT

© 2020 S.F. Tlustenko

Samara National Research University named after Academician S.P. Korolyov

The structures of technological systems (TS) of production at different levels of the hierarchy have been investigated for the purpose of their system analysis for the possibility, in the conditions of automation of technological processes, to design optimal production projects according to the target criteria and to calculate the efficiency assessment. A technique for describing and constructing structures of generators in their subspace is proposed, which allows one to substantiate the procedures for forming functional subsets, which, through connections, form a combinatorial structure in the topology of a complex TS. The proposed technique for the mutual mapping of one set to the second makes it possible to form the required characteristics and properties of the communication nodes of the structure according to its connectivity, purpose and optimization conditions in real working conditions according to the set rules for the entry of any generating system into the communication network of the general system of aircraft production.

Key words: sets, technological system, formalized transformation, combinatorial structure, topology, initialization-destructuring, transformation tensor.

DOI: 10.37313/1990-5378-2020-22-6-43-47

Stanislav Tlustenko, Candidate of Technical Science, Associate Professor. E-mail: titan250@mail.ru