

Автоматизация проектирования

Гиперграфовая модель структуры изделия

А.Н. Божко¹

¹ Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана,
Москва, Россия

Аннотация. Рассматривается проблема автоматизации проектирования сборочных процессов сложных технических систем. Описаны фундаментальные свойства сборочных процессов и операций. Предложена гиперграфовая модель сборочной структуры изделия. Показано, что сборочный процесс может быть описан как последовательность нормальных стягиваний ребер, которая преобразует исходный гиперграф в одну вершину без петель. Приводятся основные сведения о необходимых и достаточных условиях стягиваемости гиперграфов.

Ключевые слова: сборка, автоматизация проектирования сборки, сборочная единица, гиперграф, последовательность сборки, когерентность, секвенциальность.

DOI: 10.14357/20790279180222

Введение

Сборка – один из самых сложных и важных этапов жизненного цикла изделия в современном дискретном производстве. Качество технологической подготовки сборки решающим образом влияет на потребительские или тактико-технические свойства технической системы. В [1,2] приведены обзоры основных направлений исследований и ключевых работ в области СААП. К сожалению, современные методы автоматизированного проектирования отличаются невысоким уровнем формализации, поэтому требуют активного участия эксперта на ключевых стадиях процесса автоматизированного проектирования: подготовка исходной информации, построение модели изделия, оценка альтернатив и др. Этим, в значительной степени, объясняются высокая трудоемкость, небольшая надежность, плохая воспроизводимость результатов и низкая защищенность от ошибок этих методов.

Для любой последовательности сборки и схемы декомпозиции должны выполняться фундаментальные свойства когерентности, секвенциальности и геометрической разрешимости. Когерентность означает, что на каждой сборочной операции реализуются механические связи (соединения или сопряжения), которые служат для базирования де-

тали в составе изделия. Нарушение любого из этих условий делает проектное решение некорректным и автоматически исключает из дальнейшего рассмотрения.

1. Структурные модели технических объектов

В большинстве исследований по СААП для моделирования свойства когерентности используют так называемый граф связей (*liaison graph*, *liaison diagram*, *connector graph* и др.) [1]. На рис. 1, а показана конструкция крепления вала, а на рис. 1, б – граф связей этой конструкции.

Часто, пространственная координация деталей в конструкции достигается при помощи нескольких механических связей. Например, для определения позиции зубчатого колеса 4 необходимы сразу две механические связи, которые соединяют эту деталь с валом 1 и втулкой 3 (см. рис. 1, а). В классической схеме базирования, когда призматическая деталь ориентируется по установочной, направляющей и опорной базам, реализуются сразу три механические связи.

В общем случае, граф связей не позволяет корректно описать базирование при сборке,

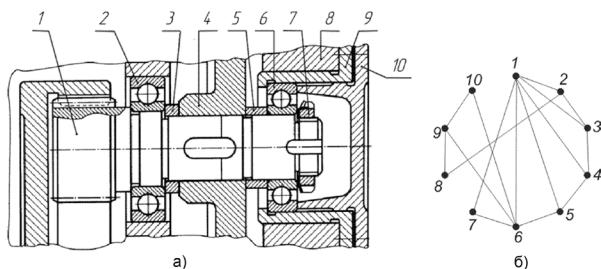


Рис. 1. Вал цилиндрического редуктора (а), граф связей конструкции (б)

поскольку это отношение является многоместным. В [3,4] предложена гиперграфовая модель сборочной структуры изделия, которая свободна от отмеченного недостатка.

Представим структуру изделия в виде гиперграфа $H = (X, R)$, в котором вершины $X = \{x_i\}_{i=1}^n$ соответствуют деталям, а гиперребра $R = \{r_j\}_{j=1}^m$ представляют минимальные геометрически определенные группировки, полученные базированием. Назовем эту модель гиперграфом сборочной структуры. На рис. 2 изображен гиперграф H_1 сборочной структуры конструкции вала (рис. 1, а).

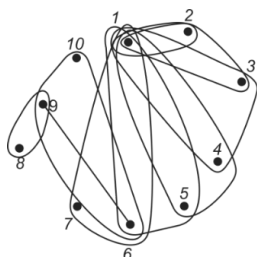


Рис. 2. Гиперграф сборочной структуры H_1 конструкции вала

Поясним понятие минимальной скоординированной группировки деталей на примере конструкции вала. Множество деталей является минимальной геометрически определенной группировкой. Действительно, если из этого множества исключить втулку 3, то неопределенным становится осевое положение зубчатого колеса 4. При исключении вала 1 теряется координата в радиальном направлении и т.д.

2. Свойства сборочных операций и процессов

Определение 1. Сборочная операция называется секвенциальной (бинарной), если ее можно выполнить при помощи двух исполнительных органов [1].

На рис. 3. приведен пример простой конструкции, которая не может быть реализована на плоскости при помощи секвенциальной сборочной

операции. Очевидно, что для этой конфигурации требуются три исполнительных органа.

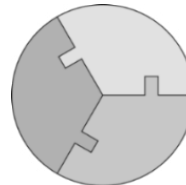


Рис. 3. Пример несеквенциальной конструкции

Все известные несеквенциальные конфигурации – это искусственные примеры из области игр или комбинаторной геометрии [1].

Математическим описанием когерентной и секвенциальной сборочной операции служит стягивание ребра второй степени гиперграфа механических связей $H = (X, R)$.

Определение 2. Преобразование гиперграфа H , которое заключается в отождествлении двух вершин ребра второй степени и удалении этого ребра, назовем нормальным стягиванием.

Определение 3. Гиперграф $H = (X, R)$ назовем стягиваемым или s -гиперграфом, если существует последовательность $P(H) = (H_0, H_1, \dots, H_{n-1})$, для элементов которой выполняются условия: 1) $H = H_0$; 2) H_{n-1} представляет собой одновершинный гиперграф без петель; 3) каждый элемент H_{j+1} последовательности $P(H)$ получается из предыдущего H_j , $j = 0, n-2$, нормальным стягиванием.

Условие 1 описывает стартовое состояние процесса сборки, условие 2 – финальное. Условие 3 формализует свойства когерентности и секвенциальности элементарных сборочных операций.

На рис. 4 показаны три состояния гиперграфа H_1 в процессе нормальных стягиваний.

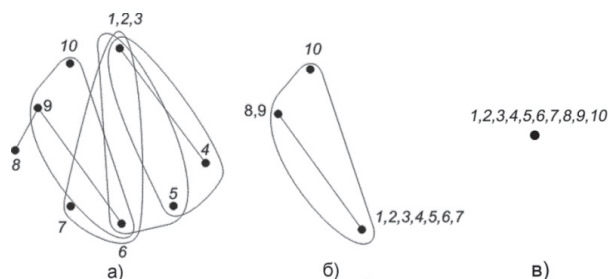


Рис. 4. Исходное (а), промежуточное (б) и финальное (в) состояния гиперграфа H_1

3. Необходимые и достаточные условия стягиваемости гиперграфов

Значительный практический и научный интерес представляют формулировки необходимых и достаточных условий стягиваемости гиперграфов, описывающих сборочные структуры различных изделий. В [3] доказано несколько утверждений о

необходимых и достаточных условиях стягиваемости гиперграфов. Приведем основные результаты без доказательств.

Теорема 1. Пусть существует последовательность нормальных стягиваний гиперграфа $H = (X, R)$, переводящая H в одновершинный гиперграф без петель. Тогда выполняются условия:

- 1) среди ребер H существует по крайней мере одно ребро степени 2;
- 2) гиперграф является связным;
- 3) число вершин $|X|$ и ребер $|R|$ гиперграфа H удовлетворяют линейному ограничению $|X| = |R| + 1$.

К сожалению, данные условия не являются достаточными, что доказывают примеры, приведенный на рис. 5.

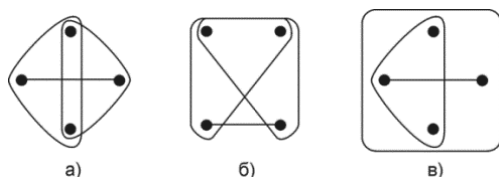


Рис. 5. Примеры нестягиваемых гиперграфов

В [3] доказаны достаточные условия стягиваемости гиперграфов в различных частных случаях (с ограничениями на степени ребер, структуры гиперграфов и др.). Приведем без доказательств несколько результатов.

Определение 4. Гиперграф $H = (X, R)$, назовем s -гомоморфным гиперграфу $G = (Y, P)$, если существует сюръективное отображение $f: X \rightarrow Y$ такое, что $\forall y \in Y$ подграф $[f^{-1}(y)] \subseteq H$, порожденный прообразами вершины y при отображении f , является s -гиперграфом.

Иными словами, s -гомоморфизм означает, что гиперграф G может быть получен из гиперграфа H некоторым множеством нормальных стягиваний.

Теорема 2. Пусть гиперграф $H = (X, R)$ удовлетворяет условиям теоремы 1 и степени его ребер не превышают 3. Тогда H стягивается в точку, если он не содержит подграфов s -гомоморфных образцам, показанным на рис. 6.

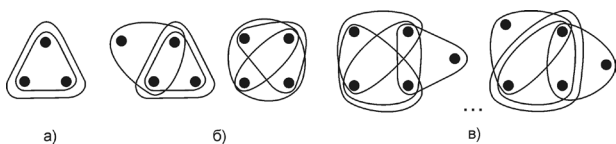


Рис. 6. Запрещенные фигуры в классе гиперграфов с ребрами, степень которых не превышает 3

Предположение. Гиперграф $H = (X, R)$ является s -гиперграфом тогда и только тогда, когда он не содержит подграфов s -гомоморфных циклам, все ребра которых имеют степень более 2.

Данное утверждение дает необходимые и достаточные условия в самой общей ситуации. Его необходимость доказана, подтвердить достаточность представляется весьма достоверной, но найти ее строгое доказательство пока не удалось.

Заключение

Назовем основные возможности гиперграфовой модели.

1. Гиперграфовая модель позволяет синтезировать множество допустимых последовательностей сборки, удовлетворяющих условиям когерентности и секвенциальности. Эти последовательности можно синтезировать напрямую, как последовательности нормальных стягиваний, или использовать для этого вспомогательную решеточную структуру [5].
2. Модель содержит информацию, необходимую для синтеза разбиений изделия на сборочные единицы. Данные разбиения можно порождать как разрезания гиперграфа или синтезировать их в виде иерархических подструктур решеточной структуры [5].
3. Гиперграфовую модель можно использовать для структурного анализа конструкции. Она позволяет идентифицировать многочисленные структурные дефекты (несобираемость, перебазирование, рассогласование механической и размерной структур и пр.) на ранних этапах технической подготовки производства.

Литература

1. Ghandi S., Masehian El. Review and taxonomies of assembly and disassembly path planning problems and approaches // Computer-Aided Design. 2015. Vol. 67 – 68. Pp. 58 – 86. doi:10.1016/j.cad.2015.05.001.
2. Божко А.Н. Комбинаторные модели для сборки и декомпозиции изделий // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2015. № 10. DOI:10.7463/1015.0817524.
3. Божко А.Н. Моделирование механических связей. Условия стягиваемости // Электронное научно-техническое издание «Наука и образование», №5, 2011.
4. Божко А.Н. Моделирование позиционных связей в механических системах // Информационные технологии, 2012, №10. С. 27-33.
5. Божко А.Н. Теоретико-решеточная модель конструкции // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2011. №9. Режим доступа: <http://technomag.neicon.ru/doc/207577.html> (дата обращения 09.11.2016).

Божко Аркадий Николаевич. Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана (МГТУ им Н.Э. Баумана), г. Москва, Россия. Доцент, кандидат технических наук. Количество печатных работ: 47 (в т.ч. 4 монографии). Область научных интересов: формализация проектных решений, автоматизация проектирования, искусственный интеллект. E-mail: abozhko@inbox.ru.

Hypergraph model of product structure

A.N. Bozhko¹

¹ Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

Abstract. The problem of automation of design of assembly processes of complex technical systems is considered. The fundamental properties of assembly processes and operations are described. A hypergraph model of the assembly structure of the product is proposed. It is shown that the assembly process can be described as a sequence of normal contractions of edges that transforms the original hypergraph into one vertex without loops. Basic information is given on the necessary and sufficient conditions for the contractibility of hypergraphs.

Keywords: *assembly, assembly design automation, assembly unit, hypergraph, assembly sequence, coherence, sequentiality.*

DOI: 10.14357/20790279180222

Reference

1. *Ghandi S., Masehian El.* Review and taxonomies of assembly and disassembly path planning problems and approaches // *Computer-Aided Design*. 2015. Vol. 67 – 68. Pp. 58 – 86. doi:10.1016/j.cad.2015.05.001.
2. *Bozhko A.N.* 2015. Kombinatornyye modeli dlya sborki i dekompozitsii izdeliy [Combinatorial models for the assembly and decomposition of products]. Nauka i obrazovaniye. MGTU im. N.E. Bauman [Science and education. Bauman MSTU] 10. DOI:10.7463/1015.0817524.
3. *Bozhko A.N.* 2011. Modelirovaniye mekhanicheskikh svyazey. Usloviya styagivayemosti [Modeling of mechanical connections. Conditions of contractibility]. Nauka i obrazovaniye. MGTU im. N.E. Bauman [Science and education. Bauman MSTU]. 5. Available at: <http://old.technomag.edu.ru/doc/207577.html> (accessed July 2128, 2017).
4. *Bozhko A.N.* 2012. Modelirovaniye pozitsionnykh svyazey v mekhanicheskikh sistemakh [Modeling of positional constraints in mechanical systems]. Informatsionnyye tekhnologii [Information Technology]. 10: 27-33.
5. *Bozhko A.N.* 2011. Teoretiko-reshetchnaya model' konstruksii [Theoretical-lattice model of construction]. Nauka i obrazovaniye. MGTU im. N.E. Bauman [Science and education. Bauman MSTU]. Available at: <http://technomag.bmstu.ru/doc/207577.html> (accessed July 2128, 2017).

Bozhko A.N. PhD, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia, 105005, 5 Baumanskaya 2-ya str., Moscow, Russia. e-mail: abozhko@inbox.ru