

А. Н. Божко, канд. техн. наук, доц., e-mail: abozhko@inbox.ru,
Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана

Методы структурного анализа сложных изделий в интегрированных CAD/CAM-системах

Рассматривается проблема структурного анализа сложных изделий в системах автоматизированного проектирования. Предложена гиперграфовая математическая модель механической структуры. Показано, что связанные и геометрически координированные фрагменты изделия описываются стягиваемыми гиперграфами. Данную модель можно использовать для глубокого структурного анализа проекта. Она позволяет обнаружить многие проектные ошибки и потенциально опасные решения на самых ранних стадиях проектирования. Предложены критерии для идентификации перебазирования, некогерентности, потери координации деталей и др. Разработан способ оценки "глубины вложения" деталей, который позволяет оценить сложность разборки и структурную ремонтпригодность изделия.

Ключевые слова: сборка, механическая структура, структурный анализ, гиперграф, автоматизированная система проектирования, перебазирование, геометрическая координация, разборка

Введение

При создании трехмерной геометрической модели изделия оператор CAD-системы не связан жесткими технологическими ограничениями, поэтому для координации деталей он может использовать абстрактные геометрические элементы: точки, линии, оси, биссектрисы, медианы и др. В технологической подготовке производства, на этапах производства и ремонта определенность положения детали или заготовки достигается с помощью баз: конструкторских, технологических, измерительных, ремонтных. Преобразование системы геометрических связей в механические сопряжения, а далее в базы является сложной, многовариантной и неформализованной проектной процедурой. В результате нее формируется так называемая механическая структура изделия. От механической структуры и ее согласованности с другими конструктивно-технологическими свойствами изделия зависят многие свойства технической системы в операциях сборки, разборки и разбиения на сборочные единицы.

В современных CAD-системах отсутствуют средства глубокого анализа механической структуры изделия как отдельного проектного решения. Она формируется во многом автома-

тически, в процессе создания трехмерной геометрической модели изделия и верификации контактов и зазоров между моделями элементов. Свойства механической структуры объективируются на последующих этапах жизненного цикла, связанных с технологической подготовкой производства. Поэтому необходимо разработать методы структурного анализа, которые в процессе проектирования способны оценить качество механической структуры и спрогнозировать поведение изделия на этапах сборки, разборки и ремонта.

В актуальных исследованиях и разработках по автоматизации проектирования основной структурной моделью технических объектов служит граф связей. Этот носитель проектной информации предложен А. Bourjault [1]. В настоящее время граф связей под разными названиями (Liaison diagram, Part mating graph, Connective relation graph, Component mating graph, Connection graph, Liaison graph, Parts liaison graph, Hierarchical relation graph, Skeleton graph, Attributed liaison graph, Product liaison graph, Component graph, Adjacency graph, Weighted undirected connected graph и др.) активно используется для структурного анализа и синтеза проектных решений сложных технических систем [1–11].

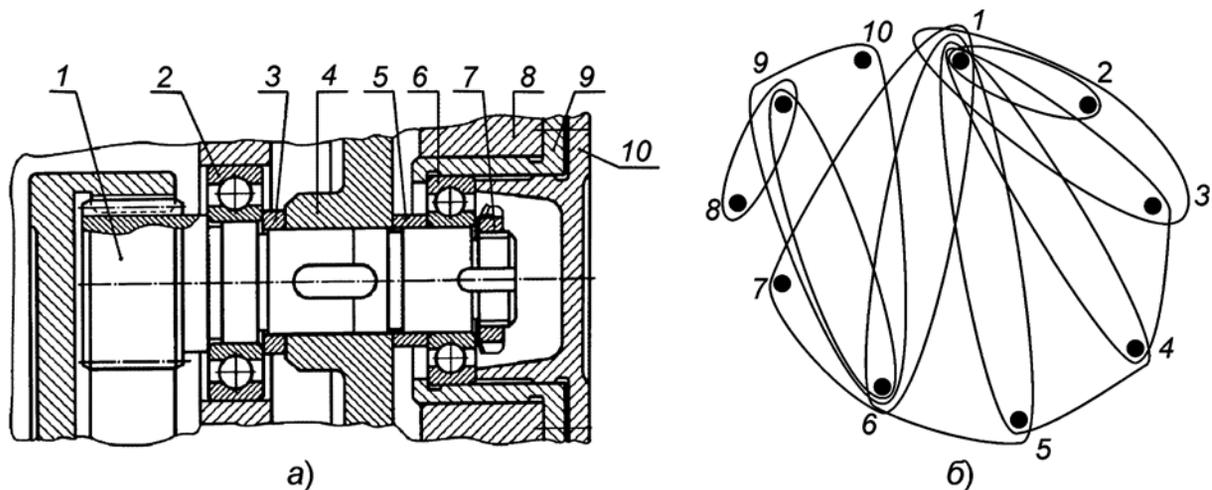


Рис. 1. Конструкция промежуточного вала (а) и гиперграф конструкции H_s (б)

Приведем точное определение графа связей. Пусть $X = \{x_i\}_{i=1}^n$ — множество деталей изделия. В графе связей $G = (X, V)$ множество вершин X описывает детали изделия, а множество ребер V — соединения и сопряжения между ними. Ребро $v = (x, y)$, $v \in V$, соединяет вершины x и y тогда и только тогда, когда между соответствующими деталями существует механическая связь.

В некоторых исследованиях основным носителем структурной информации об изделии служит матрица контактов [2]. Легко показать, что эта матрица является матрицей смежности графа связей, что дает основания считать равносильными графовый и матричный языки описания структурных данных.

Пространственная координация деталей при сборке изделия достигается базированием по конструкторским базам. Легко привести примеры, когда конструкторские базы принадлежат нескольким (двум, трем и т. д.) разным деталям. Поэтому базирование является отношением переменной местности, которое **невозможно корректно описать бинарными математическими средствами, коими являются граф связей и его различные вариации.**

Граф связей не обладает предсказательной силой настоящей математической модели и, по сути дела, является дескриптивной моделью. С его помощью можно решить только самые простые задачи структурного анализа, например, провести анализ связности, поиск мостов, перегруженных вершин и решить некоторые другие задачи [3].

В работах автора [13, 14] предложена новая гиперграфовая модель структуры сложного изделия, которая корректно описывает его свойства в операциях сборки, разборки и разбиения

на сборочные единицы. Эта модель позволяет выполнить глубокий анализ и идентифицировать многие структурные "пороки" и ненадежные проектные решения на самых ранних стадиях технической подготовки производства.

1. Гиперграфовая модель структуры сложных изделий

Изделию поставим в соответствие гиперграф $H = (X, R)$, в котором вершины X описывают детали, а гиперребра R — минимальные геометрически определенные группировки деталей, полученные базированием по конструкторским базам. На рис. 1 изображены конструкция промежуточного вала (а) и гиперграф H_s данной конструкции (б).

Определение 1. Сборочная операция называется секвенциальной (двуручной), если ее можно выполнить с помощью двух исполнительных органов. В противном случае операция называется несеквенциальной (мнгоручной) [2, 11].

На рис. 2 показан простейший пример несеквенциальной (трехручной) сборочной операции.

Процесс сборки изделия можно описать как последовательность стягиваний ребер ги-

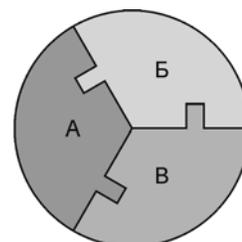


Рис. 2. Пример несеквенциальной сборочной операции

перграфа H . Стягиваются только ребра второй степени, поскольку можно с высокой степенью уверенности полагать, что в инженерной практике не используются несеквенциальные (многоручные) сборочные операции.

Определение 2. Нормальным стягиванием назовем операцию отождествления двух вершин гиперграфа, связанных ребром второй степени, и удаление данного ребра.

Определение 3. Гиперграф, который некоторой последовательностью нормальных стягиваний преобразуется в одновершинный гиперграф без петель и изолированных ребер (точку), назовем s -гиперграфом [13].

Теорема 1. Если гиперграф $H = (X, R)$ является s -гиперграфом, то:

- 1) он связный;
- 2) во множестве ребер R найдется по крайней мере одно ребро второй степени;
- 3) выполняется равенство $|X| = |R| + 1$.

В работе [14] дано формальное доказательство этой теоремы о необходимых условиях стягиваемости. Приведем здесь содержательные аргументы в пользу корректности этого важного для структурного анализа утверждения. Стягивание гиперграфа H в точку свидетельствует о справедливости условий 1 и 2. Рассмотрим подробнее условие 3. Действительно, для детали, которая монтируется первой, не нужны внутренние конструкторские базы, она устанавливается в сборочное приспособление. Для координации каждой следующей детали требуется только один комплект конструкторских баз. Отсюда следует, что число комплектов конструкторских баз на единицу меньше числа деталей изделия. Это простое соотношение можно эффективно использовать для идентификации многих структурных дефектов конструкции.

2. Перебазирование

Пусть для гиперграфа $H = (X, R)$ выполняется неравенство $|X| < |R| + 1$. Это соотношение свидетельствует о перебазировании технической системы. Перебазированием в инженерной практике называется ситуация избыточной координированности деталей. При сборке изделия данный феномен проявляется в том, что деталь приходится устанавливать, определяя ее положение по нескольким полным конструкторским базам. Для деталей, которые ведут себя как абсолютно твердые тела, монтаж с перебазированием невозможен, а деформируемые де-

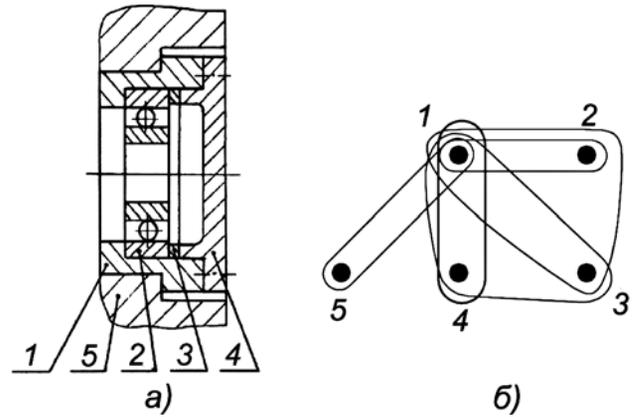


Рис. 3. Конструкция с перебазированием (а) и ее гиперграф H_1 (б)

тали просто не нуждаются в избыточных базах. Устранение перебазирования влечет за собой нарушение технологических инструкций и производственных расписаний. Оно может быть причиной критической потери точности и использования экстраординарных слесарных или пригоночных операций. В некоторых случаях для ликвидации перебазирования приходится вносить изменения в конструкцию изделия [15].

На рис. 3 показаны простая конструкция с перебазированием и ее гиперграф $H_1 = (X_1, R_1)$. Легко проверить, что $|X_1| = 5$, $|R_1| = 5$, т. е. $|X| < |R| + 1$. Согласно чертежу положение крышки 4 задают два полных комплекта конструкторских баз. Эта деталь может быть установлена на стакан 1, а также на стакан 1 вместе с шайбой 3.

Неравенство $|X| < |R| + 1$ дает легко вычисляемый критерий перебазирования для изделия и любого его фрагмента, который обладает свойством независимой сборки. Данный критерий можно использовать уже на самых ранних этапах проектирования, сразу после генерации трехмерной геометрической модели изделия.

Для проекта сложной технической системы, которая может состоять из нескольких тысяч деталей и комплектующих, важно не только установить факт перебазирования, но и локализовать конструктивный фрагмент, содержащий избыточные базы. Для этого можно использовать следующее утверждение, которое приведем здесь без доказательства [13].

Утверждение 1. Пусть для гиперграфа $H = (X, R)$ выполняется неравенство $|X| < |R| + 1$. Для локализации фрагмента конструкции с перебазированием требуется найти минимальный связный порожденный подграф $A = (X_A, R_A)$, для которого справедливо неравенство $|X_A| < |R_A| + 1$.

3. Несеквенциальные и некоординированные конструктивные фрагменты

Пусть для гиперграфа $H = (X, R)$, описывающего механическую структуру некоторого изделия, выполняется неравенство $|X| > |R| + 1$. Будем считать, что гиперграф является связным. Связность представляет собой фундаментальное свойство любого проекта, а ее нарушение — это грубая проектная ошибка, которая весьма редко встречается на практике.

Операция нормального стягивания обладает двумя очевидными свойствами:

- 1) сохраняет связность носителя;
- 2) уменьшает и число вершин и число ребер гиперграфа ровно на единицу.

Выполним все возможные нормальные стягивания в H . В результате получится связный нестягиваемый гиперграф, состоящий из ребер третьей и выше степеней. Вхождение в гиперграф нестягиваемых ребер высокой размерности свидетельствует о наличии в изделии несеквенциальных или некоординированных конструктивных фрагментов.

Пример простейшей несеквенциальной конструкции приведен на рис. 2. Некоординированность — это неполная пространственная определенность взаимного положения деталей, вызванная наличием нелегальных степеней свободы. Некоординированность, как правило, является следствием инженерных ошибок. Для иллюстрации этого свойства воспользуемся примерами двух простейших конструкций, которые изображены на рис. 4, а и рис. 4, в. Их гиперграфы показаны на рис. 4, б и рис. 4, г, соответственно. Полагаем, что горизонтальная степень свободы, которой располагают деталь 2 на рис. 4, а и детали 2, 3, 4 на рис. 4, в, — это проектные ошибки. Данные конструкции не обладают достаточной пространственной координацией, и для обоих гиперграфов выполняется неравенство $|X| > |R| + 1$.

4. Принцип "конструкторского близкодействия"

Анализ большого массива реальных конструкций показал, что координация минимальных геометрически определенных группировок деталей чаще всего выполняется за счет своих внутренних соединений и сопряжений, без использования внешних конструктивных элементов (деталей или комплектующих). Данное правило назовем "конструкторским близко-

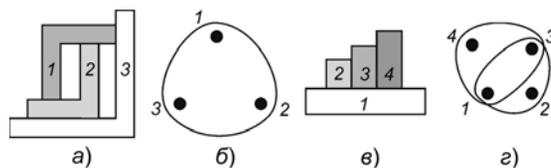


Рис. 4. Некоординированные конструкции (а, в) и их гиперграфы (б, г)

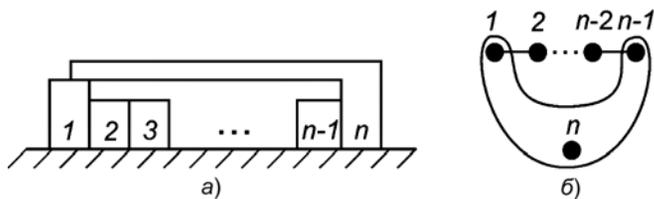


Рис. 5. Пример, в котором нарушен принцип "конструкторского близкодействия" (а), гиперграф данной конструкции (б)

действием". Его удобно выразить в точных графовых терминах.

Утверждение 2. Вершины, которые инцидентны ребру $r \in R$ гиперграфа $H = (X, R)$, образуют клику в графе связей $G = (X, V)$.

Проиллюстрируем данное утверждение на примере промежуточного вала, показанного на рис. 1, а. Легко проверить, что для каждого ребра гиперграфа данной конструкции (см. рис. 1, б) выполняется принцип "конструкторского близкодействия", т. е. все ребра гиперграфа представляют собой полные подграфы графа связей.

Конструктивные фрагменты, реализованные с нарушением данного принципа, — это потенциально опасные проектные решения. Они требуют особого внимания проектировщика. Для примера воспользуемся простой конструкцией, показанной на рис. 5.

Позиционирование детали n в горизонтальном направлении достигается опосредованно, через длинную цепочку, состоящую из $n - 1$ деталей. При сборке этой конструкции накопление погрешностей габаритных размеров, принадлежащих деталям с номерами от 1 до $n - 1$, может привести к потере связи между деталью 1 и левой опорой детали n и, следовательно, к неустойчивости последней.

Обобщая приведенный пример, можно утверждать, что базирование детали на две, три и т. д. детали, которые не имеют сопряжений друг с другом, а координируются опосредованно, через цепочку промежуточных объектов, является потенциально уязвимым проектным решением. Такие конструктивные фрагменты порождают длинные размерные цепи, что нарушает фундаментальный принцип технической подготовки производства, требующий

решать любую размерную задачу самым экономным способом (принцип кратчайшей размерной цепи [15]).

5. Оценка расчленяемости и собираемости

Разбиение изделия на отдельные сборочные единицы (СЕ), которые собираются независимо, — это важнейшее проектное решение, зависящее, в первую очередь, от структуры механических связей изделия. Достаточно сказать, что выбранная декомпозиция на СЕ влияет на многие экономические свойства производственной системы: стоимость, длительность производственного цикла и др. В некоторых случаях разбиение изделия и независимая сборка частей диктуется техническими причинами, например технологической однородностью сборочных операций. Понятно, что соединения, которые получаются с применением больших усилий или высоких температур, плохо совместимы с соединениями прецизионной точности.

Плохую расчленяемость можно уверенно считать структурным недостатком проекта. Такие изделия отличаются низкой адаптируемостью к сборке в различных производственных условиях и более высокими требованиями к качеству технологической оснастки.

Гиперграф $H = (X, R)$ позволяет идентифицировать плохую расчленяемость как самого изделия, так и любых составных частей. На рис. 6 изображены две структуры, которые не допускают разбиения на сборочные единицы.

Поскольку стягивание гиперграфа начинается со стягивания ребра второй степени, то необходимым условием плохой расчленяемости является "дефицит" таких ребер в s -гиперграфе, который описывает механическую структуру изделия. Так, "гиперцепь" (рис. 6, а) и "гиперзвезда" (рис. 6, б) включают в себя только одно ребро второй степени.

Еще одно важное конструктивное качество, которое зависит от структуры механических

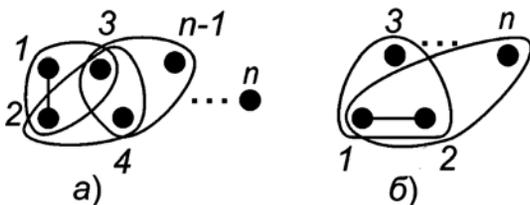


Рис. 6. Примеры структур, не допускающих разбиение на сборочные единицы:

а — "гиперцепь"; б — "гиперзвезда"

связей изделия, — собираемость. Это свойство означает способность технической системы собираться с помощью разных последовательностей. Если изделие имеет высокую собираемость, то ограничения по базированию не являются жесткими. Это значит, что последующий выбор рациональной последовательности сборки по технологическим или экономическим критериям будет располагать более богатым набором альтернатив.

Поясним сказанное примерами, изображенными на рис. 6. Структура "гиперцепь" допускает всего лишь две последовательности сборки, которые не противоречат условиям базирования. Это последовательности $1, 2, 3, \dots, n$ и $2, 1, 3, \dots, n$. Структура "гиперзвезда" обладает гораздо более высокой собираемостью. Ее можно собрать с помощью $2(n-2)!$ различных последовательностей. Данная структура имеет намного более высокую адаптируемость к различным технологическим системам и производственным условиям.

Очевидно, что s -гиперграф отличается высокой собираемостью, если он включает много висячих вершин, и этим свойством обладают его подграфы, полученные удалением таких вершин. Максимальной собираемостью среди всех s -гиперграфов обладает граф, который является деревом с диаметром 2. Число различных последовательностей, с помощью которых можно собрать данную структуру, равно $2(n-1)!$.

6. Структурная оценка сложности разборки

Многие виды технического обслуживания технической системы связаны с ее полной или неполной разборкой. Механическая структура изделия обязана обеспечивать простой демонтаж составных частей, которые необходимо часто извлекать для ремонта, контроля и иных регламентных работ.

Процесс разборки должен быть организован таким образом, чтобы извлекаемый фрагмент и оставшая часть конструкции сохраняли связность и внутреннюю геометрическую координацию. Приведем формальное описание этого условия.

Утверждение 3. Механические структуры частей разбираемого изделия должны описываться s -гиперграфами.

Сложность разборки можно оценить по минимальному числу деталей, которые нужно удалить из состава изделия для гарантированного доступа к искомому конструктивному элементу.

ту — детали или СЕ. Пусть, например, требуется демонтировать подшипник *b* из промежуточного вала (см. рис. 1, *a*). Гарантированный доступ к подшипнику дает снятие крышки *10* и гайки *7*. Однако извлечение подшипника в этой ситуации нарушит связи и координацию конструктивного фрагмента, состоящего из деталей *8* и *9*. Поэтому подшипник можно демонтировать после удаления этих деталей или целиком в сборе с деталями *8* и *9*.

Введем формализацию, которая позволяет оценить "глубину вложения" деталей и получить количественные характеристики сложности сборки.

Определение 4. Пара $\{A, B\}$, $A, B \subseteq X$, называется разрезанием гиперграфа $H = (X, R)$, если $A \cup B = X$, $A \cap B = \emptyset$, и подграфы $[A]$, $[B]$, порожденные в H множествами вершин A , B , являются s -гиперграфами.

Данное определение постулирует свойство внутренней независимой координации обеих частей разрезания. Иными словами, корректным считается такая декомпозиция изделия, в которой обе части являются связными и геометрически определенными конструктивными фрагментами. Данное свойство должно выполняться для большинства операций жизненного цикла изделия: сборки, разборки, ремонта, разбиения на сборочные единицы, технического контроля и др.

Теорема 2. Разрезание $\{A, B\}$ s -гиперграфа $H = (X, R)$ достигается удалением только одного ребра $r \in R$.

Доказательство. Пусть $[A] = (A, R_A)$ и $[B] = (B, R_B)$ — подграфы, порожденные в H элементами разрезания $\{A, B\}$. Легко видеть, что гиперграф $[A \cup B]$, который порождается объединенным множеством вершин A и B , совпадает с $H = (X, R)$. Для $[A]$ и $[B]$ как s -гиперграфов выполняются соотношения $|A| = |R_A| + 1$ и $|B| = |R_B| + 1$. Сложим данные равенства и получим $|A| + |B| = |R_A| + |R_B| + 2$. Поскольку множества A и B образуют разбиение множества X , то справедливо соотношение $|A| + |B| = |X|$, поэтому $|X| = |R_A| + |R_B| + 2$.

По условиям теоремы H является s -гиперграфом, поэтому для него выполняется линейное соотношение $|X| = |R| + 1$. Из последних двух равенств следует, что $|R| + 1 = |R_A| + |R_B| + 2$ или $|R| = |R_A| + |R_B| + 1$. Число ребер в гиперграфе H на единицу больше общего числа ребер в гиперграфах $[A]$ и $[B]$. Это значит, что в H их соединяет только одно ребро. Теорема доказана.

Данная теорема дает простой способ генерации всевозможных разрезаний s -гиперграфа на

подграфы, которые описывают связные и координированные фрагменты конструкции. Поскольку каждая часть гиперграфа, полученная разрезанием, представляет собой s -гиперграф, то процедуру можно продолжить в глубину, вплоть до элементарных разрезов, состоящих из отдельных вершин. Результаты рекурсивной процедуры разрезов представим в виде И—ИЛИ-графа, в котором корневая вершина представляет исходный s -гиперграф, внутренние вершины соответствуют s -подграфам, полученным с помощью разрезов, листья описывают вершины гиперграфа, а связи представляют сами разрезы.

В качестве примера воспользуемся конструкцией промежуточного вала (см. рис. 1, *a*). На рис. 7 показан И—ИЛИ-граф разрезов гиперграфа H_s (см. рис. 1, *б*). На рис. 7 исходный гиперграф и его подграфы изображены черными кружками, а связи И—ИЛИ-графа — квадратами белого цвета.

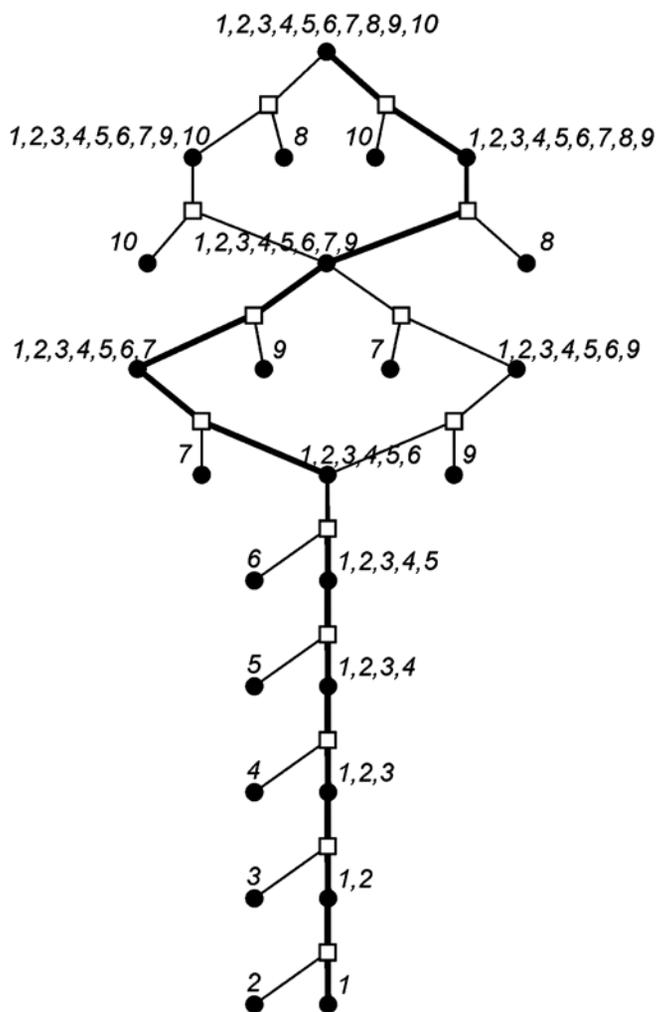


Рис. 7. И — ИЛИ-граф разрезов гиперграфа H_s

Обозначим $T(H)$ И—ИЛИ-граф разрезов, построенный по s -гиперграфу $H = (X, R)$. Приведем несколько очевидных следствий, которые вытекают из процедуры построения этого объекта. Вершины дерева описывают связные и координированные подмножества деталей, которые обладают свойством независимой сборки (s -подграфы). Такими подмножествами являются СЕ, временные СЕ, узлы, состояния изделия в процессе сборки/разборки и любые конструктивные фрагменты, для которых требуется выполнить вспомогательные технологические операции (контроль, испытания, окраску, маркировку и пр.).

Каждое разрезание можно рассматривать как математическое описание операций разборки или секвенциальной сборки, что зависит от направления перемещения по вершинам и связкам графа $T(H)$. Любой путь, соединяющий висячую вершину графа $T(H)$ с корневой, представляет собой последовательность сборки изделия, каждая операция которой является секвенциальной и когерентной. Максимальные пути описывают последовательности сборки без разбиения на СЕ (линейные), не максимальные пути — с разбиением на СЕ (нелинейные). Путь, соединяющий корень графа $T(H)$ с висячей вершиной, представляет собой последовательность разборки: линейную или нелинейную. Например, выделенный путь на рис. 7 описывает линейную последовательность сборки 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 9, 8, 10 или линейную последовательность разборки 10, 8, 9, 7, 6, 5, 4, 3, 2, 1.

Отметим некоторые очевидные свойства графа $T(H)$. Он имеет единственный наибольший элемент, который соответствует исходному гиперграфу H . Висячими вершинами в $T(H)$ служат вершины гиперграфа H .

Пусть A — некоторая вершина $T(H)$, которая описывает s -подграф A , $A \subseteq H$. Будем рассматривать $T(H)$ как обычный граф, не учитывая смысловые различия между вершинами и связками. Максимальную цепь в $T(H)$, которая соединяет вершину H с A , обозначим как (H, A) -цепь. Глубину вложения детали x будем оценивать длиной $l(x)$ кратчайшей (H, x) -цепи в графе $T(H)$. Так, глубина вложения деталей 8 и 10 равна двум, а детали 1 — восемнадцати (см. рис. 1, рис. 7).

Параметр $l(x)$ дает важную информацию о позиции, которую занимает деталь в структуре сложной технической системы. Для элементов изделия, требующих частого демонтажа, данный показатель должен принимать небольшие значения.

Выводы

1. Механическая структура сложной технической системы формируется на ранних этапах проектирования и оказывает существенное влияние на поведение системы в процессе сборки, разборки и разбиения на сборочные единицы.

2. Современные системы автоматизированного проектирования не располагают развитыми инструментами структурного анализа и идентификации структурных ошибок.

3. В актуальных исследованиях и разработках основной структурной моделью изделия служит граф связей, который не позволяет корректно описать отношение базирования и геометрическую координацию деталей в изделии.

4. Адекватной структурной моделью сложной технической системы является гиперграф. Он позволяет выполнить глубокий структурный анализ и идентифицировать многие типы распространенных структурных дефектов и ошибок на ранних этапах проектирования, сразу после формирования трехмерной геометрической модели изделия.

5. В работе предложены способы экспресс-анализа важных структурных характеристик: структурная избыточность, перебазирование, некогерентность, некоординированность, нарушение "конструкторского близкодействия". Разработан способ оценки сложности разборки изделия и "глубины вложения" детали в структуру изделия.

Список литературы

1. Bourjault A. Methodology of Assembly Automation: A New Approach // Robotics and Factories of the Future '87. 1988. P. 37—45. DOI: 10.1007/978-3-642-73890-6_6.
2. Cao Y., Kou X., Cao S. A sub-assembly identification algorithm for assembly sequence planning // International Industrial Informatics and Computer Engineering Conference. 2015. DOI: 10.2991/iiicec-15.2015.127.
3. Ghandi S., Masehian El. Review and taxonomies of assembly and disassembly path planning problems and approaches // Computer-Aided Design. 2015. Vol. 67—68. P. 58—86. DOI: 10.1016/j.cad.2015.05.001.
4. Whitney D. E. Mechanical Assemblies: Their Design, Manufacture, and Role in Product Development. New York: Oxford University Press, 2004. 518 p.
5. Vignano R., Gomez G. Automatic assembly sequence exploration without precedence definition // International Journal on Interactive Design and Manufacturing. 2013. Vol. 7, Iss. 2. P. 79—89. DOI: 10.1007/s12008-012-0165-9.
6. Mathew A. T., Rao C. S. P. A novel method of using API to generate liaison relationships from an assembly // Software Engineering & Applications / 2010, N. 3. P. 167—175. DOI: 10.4236/jsea.2010.32021.

7. **Bahubalendruni M., Biswal B., Deepak B.** Computer aided assembly attributes retrieval methods for automated assembly sequence generation // *International Journal of Mechanical, Aerospace, Industrial, Mechatronic and Manufacturing Engineering*, 2017. Vol. 11, N. 4. URL: scholar.waset.org/1999.8/10006876 (Дата обращения: 21.08.2017).

8. **Delchambre A.** Computer-aided Assembly Planning, 2012. 276 p. DOI: 10.1007/978-94-011-2322-8.

9. **Pan Ch.** Integrating CAD files and automatic assembly sequence planning. PhD thesis. Iowa State University, 2005. 107 p.

10. **Homem de Mello L., Sanderson A.** Planning repair sequences using the AND/OR graph representation of assembly plans // *Robotics and Automation. Proceedings 1988 IEEE International Conference*, 1988. Vol. 3. P. 1861—1862. DOI: 10.1109/ROBOT.1988.12341.

11. **Hermansson T., Bohlin R., Carlson J. S., Söderberg R.** Automatic assembly path planning for wiring harness installations //

Journal of Manufacturing Systems, 2013. Vol. 32 (3). P. 417—422. DOI: 10.1016/j.jmsy.2013.04.006.

12. **Hsu Y., Tai P., Wang M.** A knowledge-based engineering system for assembly sequence planning // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2011. Vol. 55, Iss. 5. P. 763—782. DOI: 10.1007/s00170-010-3093-5.

13. **Божко А. Н.** Моделирование механических связей изделия. Условия стягиваемости // *Наука и образование. МГТУ им. Н. Э. Баумана. Электрон. журн.* 2011. № 5. URL: <http://technomag.neicon.ru/doc/182518.html> (дата обращения 05.06.2016).

14. **Божко А. Н.** Моделирование позиционных связей в механических системах // *Информационные технологии*, 2012. № 10. С. 27—33.

15. **Базров Б. М., Таратынов О. В., Клепиков В. В.** *Технология сборки машин / Под общей ред. Б. М. Базрова. М.: Спектр, 2011. 368 с.*

A. N. Bozhko, Assistant Professor, e-mail: abozhko@inbox.ru,
Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russian Federation

Methods of Structural Analysis of Complex Products in Integrated CAD/CAM-systems

The problem of structural analysis of complex products in computer-aided design systems is considered. A hypergraphic mathematical model of the mechanical structure is proposed. It is shown that the connected and geometrically coordinated fragments of the product are described by contractible hypergraphs. This model can be used for deep structural analysis of the project. It allows you to detect many design errors and potentially dangerous solutions in the earliest stages of projecting. The criteria for identification of the overbasing, incoherence, loss of coordination, etc. are proposed. A method for estimating the "depth of access" of parts has been developed. which allows the complexity of disassembly and structural reparability of the product.

Keywords: assembly, mechanical structure, structural analysis, hypergraph, CAD-system, overbasing, geometric coordination, disassembly

DOI: 10.17587/it.24.499-506

References

1. **Bourjault A.** Methodology of Assembly Automation: A New Approach, *Robotics and Factories of the Future '87*, 1988, pp. 37—45. DOI: 10.1007/978-3-642-73890-6_6.

2. **Cao Y., Kou X., Cao S.** A sub-assembly identification algorithm for assembly sequence planning, *International Industrial Informatics and Computer Engineering Conference*, 2015. DOI: 10.2991/iiiiec-15.2015.127.

3. **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.

4. **Whitney D. E.** *Mechanical Assemblies: Their Design, Manufacture, and Role in Product Development*, New York, Oxford University Press, 2004, 518 p.

5. **Vigano R., Gomez G.** Automatic assembly sequence exploration without precedence definition, *International Journal on Interactive Design and Manufacturing*, 2013, vol. 7, iss. 2, pp. 79—89. DOI: 10.1007/s12008-012-0165-9.

6. **Mathew A. T., Rao C. S. P.** A novel method of using API to generate liaison relationships from an assembly, *Software Engineering & Applications*, 2010, no. 3, pp. 167—175. DOI: 10.4236/jsea.2010.32021.

7. **Bahubalendruni M., Biswal B., Deepak B.** Computer aided assembly attributes retrieval methods for automated assembly sequence generation, *International Journal of Mechanical, Aerospace, Industrial, Mechatronic and Manufacturing Engineering*, 2017, vol. 11, no. 4, available at: scholar.waset.org/1999.8/10006876 (date of access: 21.08.2017).

8. **Delchambre A.** Computer-aided Assembly Planning, 2012, 276 p. DOI: 10.1007/978-94-011-2322-8.

9. **Pan Ch.** Integrating CAD files and automatic assembly sequence planning, PhD thesis. Iowa State University, 2005, 107 p.

10. **Homem de Mello L., Sanderson A.** Planning repair sequences using the AND/OR graph representation of assembly plans, *Robotics and Automation. Proceedings 1988 IEEE International Conference*, 1988, vol. 3, pp. 1861—1862. DOI: 10.1109/ROBOT.1988.12341.

11. **Hermansson T., Bohlin R., Carlson J. S., Söderberg R.** Automatic assembly path planning for wiring harness installations, *Journal of Manufacturing Systems*, 2013, vol. 32 (3), pp. 417—422. DOI: 10.1016/j.jmsy.2013.04.006.

12. **Hsu Y., Tai P., Wang M.** A knowledge-based engineering system for assembly sequence planning, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2011, vol. 55, iss. 5, pp. 763—782. DOI: 10.1007/s00170-010-3093-5.

13. **Bozhko A. N.** Modelirovaniye mekhanicheskikh svyazey izdeliya (Modeling of mechanical connections of a product), *Nauka i obrazovaniye. MGTU im. N. E. Bauman. Elektron. zhurn.* 2011, no. 3, available at: <http://technomag.neicon.ru/doc/168373.html> (date of access: 03.03.015) (in Russian).

14. **Bozhko A. N.** Modelirovaniye pozitsionnykh svyazey v mekhanicheskikh sistemakh (Modeling of positional links in mechanical systems), *Informatsionnyye Tekhnologii*, 2012, no. 10, pp. 27—33 (in Russian).

15. **Bazrov B. M., Taratynov O. V., Klepikov V. V.** *Tekhnologiya sborki mashin* (Technology of assembling machines), Moscow, Spektr, 2011, 368 p. (in Russian).