

УДК: 519.876.5

Моделирование процессов разборки сложных изделий

А. Н. Божко

МГТУ им. Н. Э. Баумана,
Россия, 105005, г. Москва, ул. 2-я Бауманская, д. 5, стр. 1

E-mail: bozhkoan@bmstu.ru

Получено 06.09.2021.

Принято к публикации 15.02.2022.

Работа посвящена моделированию процессов разборки сложных изделий в системах автоматизированного проектирования. Возможность демонтажа изделия в заданной последовательности формируется на ранних этапах проектирования, а реализуется в конце жизненного цикла. Поэтому современные системы автоматизированного проектирования должны иметь инструменты для оценки сложности демонтажа деталей и сборочных единиц. Предложена гиперграфовая модель механической структуры изделия. Показано, что математическим описанием когерентных и секвенциальных операций разборки является нормальное разрезание ребра гиперграфа. Доказана теорема о свойствах нормальных разрезов. Данная теорема позволяет организовать простую рекурсивную процедуру генерации всех разрезов гиперграфа. Множество всех разрезов представляется в виде И–ИЛИ-дерева. Дерево содержит информацию о планах разборки изделия и его частей. Предложены математические описания процессов разборки различного типа: полной, неполной, линейной, нелинейной. Показано, что решающий граф И–ИЛИ-дерева представляет собой модель разборки изделия и всех его составных частей, полученных в процессе демонтажа. Рассмотрена важная характеристика сложности демонтажа деталей — глубина вложения. Разработан способ эффективного расчета оценки снизу данной характеристики.

Ключевые слова: разборка, система автоматизированного проектирования, механическая структура, гиперграф, И–ИЛИ-дерево, последовательность разборки, сложность разборки, моделирование разборки

UDC: 519.876.5

Modeling of disassembly processes of complex products

A. N. Bozhko

Bauman Moscow State University,
5/1 2-ya Baumanskaya st., Moscow, 105005, Russia

E-mail: bozhkoan@bmstu.ru

Received 06.09.2021.

Accepted for publication 15.02.2022.

The work is devoted to modeling the processes of disassembling complex products in CAD-systems. The ability to dismantle a product in a given sequence is formed at the early design stages, and is implemented at the end of the life cycle. Therefore, modern CAD-systems should have tools for assessing the complexity of dismantling parts and assembly units of a product. A hypergraph model of the mechanical structure of the product is proposed. It is shown that the mathematical description of coherent and sequential disassembly operations is the normal cutting of the edge of the hypergraph. A theorem on the properties of normal cuts is proved. This theorem allows us to organize a simple recursive procedure for generating all cuts of the hypergraph. The set of all cuts is represented as an AND/OR-tree. The tree contains information about plans for disassembling the product and its parts. Mathematical descriptions of various types of disassembly processes are proposed: complete, incomplete, linear, nonlinear. It is shown that the decisive graph of the AND/OR-tree is a model of disassembling the product and all its components obtained in the process of dismantling. An important characteristic of the complexity of dismantling parts is considered — the depth of nesting. A method of effective calculation of the estimate from below has been developed for this characteristic.

Keywords: disassembly, computer-aided design system, mechanical structure, hypergraph, AND/OR-tree, disassembly sequence, disassembly complexity, disassembly modeling

Citation: *Computer Research and Modeling*, 2022, vol. 14, no. 3, pp. 525–537 (Russian).

1. Введение

В течение жизненного цикла большинство изделий дискретного промышленного производства требует полной или частичной разборки. Эта процедура выполняется для ремонта, утилизации, технического обслуживания, контроля, измерений и др. От сложности разборки в значительной степени зависят качество, стоимость и длительность этих операций.

Возможность разобрать изделие в заданной последовательности закладывается на самых ранних этапах проектирования, а реализуется в конце жизненного цикла изделия: на стадиях эксплуатации, ремонта и утилизации. Поэтому современные интегрированные CAD/CAM/CAE-системы должны иметь инструменты для оценки конструкции с точки зрения ее демонтажа.

Анализ и синтез процессов разборки сложных изделий (Disassembly sequencing, Disassembly planning, Disassembly sequence planning, Disassembly analysis, Disassembly reasoning, Disassembly process planning, DPP) активно обсуждаются в современных публикациях по автоматизированному проектированию. В обзорах [Lambert, 2003; Guo et al., 2020; O'Shea, Grewal, 1998; Lee, Kang, Xirouchakis, 2001] приведен обширный список статей по DPP, описаны различные аспекты моделирования процессов разборки в CAD/CAM/CAE-системах.

Возможности системы DPP зависят прежде всего от комплекса математических моделей, описывающих свойства проектируемого изделия. Все математические модели, которые используются для проектирования процессов разборки, можно разделить на две основные группы: структурные и геометрические.

2. Структурные модели

Основной структурной моделью изделия является так называемый граф связей (Liaison diagram, Liaison graph, Parts liaison graph, Product liaison graph, Connection graph, Assembly mating graph, Part mating graph, Connective relation graph, Adjacency graph, Assembly connectivity graph и др.). Это неориентированный граф $G = (X, V)$, в котором множество вершин X описывает детали изделия, а множество ребер V — представляет механические связи между ними. Ребро $v = (x, y)$ соединяет вершины $v \in V$; $x, y \in X$ тогда и только тогда, когда между деталями x и y есть соединение или сопряжение.

В [de Mello, Sanderson, 1990; Sanderson, de Mello, Zhang, 1990] предложен один из первых систематических методов проектирования последовательности сборки/разборки сложных изделий. Он основан на итеративном разрезании графа $G = (X, V)$ и его частей на две связные компоненты (Bi-partitioning). Результат разрезаний представляется в виде И–ИЛИ-графа (AND/OR-graph), у которого вершины соответствуют связным подграфам графа G , а дуги представляют варианты разрезания подграфов. И–ИЛИ-граф содержит все варианты разборки изделия, которые допускает его механическая структура. Метод разрезания графа связей (и его модификации [Bonneville, Henriod, Bourjault, 1995; Wang, Ceglarek, 2012]) учитывает только свойство когерентности операций разборки [Ghandi, Masehian, 2015]. Он не описывает геометрические ограничения, которые накладывает конструкция на планы разборки.

Представление процесса разборки изделия в виде И–ИЛИ-графа используется во многих публикациях по DPP, например [Lambert, 2007; Min, Zhu, Zhu, 2010]. В этих работах не обсуждается способ генерации данной модели. Авторы полагают, что все структурные, геометрические и прочие ограничения сняты и учтены в И–ИЛИ-графе. Основное внимание уделено разработке эффективных вычислительных процедур поиска решений.

В [Lambert, 2007] поставлена задача синтеза оптимального плана разборки изделия в терминах дискретного математического программирования. Система ограничений задачи формируется по И–ИЛИ-графу. Целевая функция описывает совокупные затраты на разборку изделия.

В [Min, Zhu, Zhu, 2010] используется взвешенный И–ИЛИ-граф, дугам (связкам) которого сопоставлены веса, означающие длительность операций демонтажа. Предложен эвристический алгоритм, который позволяет получить план разборки изделия, оптимальный по критерию времени.

В работах [Caselli, Zanichelli, 1995; Cao, Sanderson, 1991; Zhao et al., 2014; Grochowski, Tang, 2009] основной структурной моделью технической системы служит сеть Петри. В этих исследованиях принята следующая интерпретация: сетевые позиции описывают возможные состояния изделия в процессе сборки/разборки (детали, сборочные единицы и др.), переходы представляют операции монтажа и демонтажа. Срабатывание сети моделирует процессы сборки или разборки. План разборки дает последовательность срабатываний переходов, которая единственную фишку в позиции собранного изделия преобразует в фишки во всех позициях, соответствующих деталям.

Основным недостатком сетевого формализма является его громоздкость. Кроме того, в работах не обсуждаются способы генерации сетевой модели в системах проектирования. Исключением является статья [Cao, Sanderson, 1991], в которой рассматривается переход от И–ИЛИ-графа к сети Петри.

Конструкция изделия индуцирует на множестве своих деталей некоторое бинарное отношение частичного порядка (Precedence relations, Precedence constraints, PR), в котором детали и узлы упорядочиваются по очередности демонтажа. В работах [Wolter, Chakrabarty, Tsao, 1992; Smith, Chen, 2012; Ben-Arieh, Kramer, 1994; Elsayed, Kongar, Gupta, 2012] обсуждаются различные графовые и матричные формализмы для описания данного отношения. Авторы перечисленных работ не предлагают никакой систематической процедуры для извлечения PR из описания конструкции изделия и базы технологических знаний. Основным источником проектной информации служит эксперт, или просто полагается, что отношение PR задано априори. Основное внимание в этих статьях уделено алгоритмам генерации планов разборки по графовой или матричной моделям PR.

3. Геометрические модели

Процедура разборки изделия зависит от геометрических свойств конструкции. В [Wilson, Latombe, 1994; Srinivasan, Gadh, 2002; Su, 2007; Eng et al., 1999; Miller, Hoffman, 1989; Hoffman, 1991] предложены различные способы моделирования геометрических ограничений на перемещения деталей при демонтаже.

В фундаментальной работе [Wilson, Latombe, 1994] описан способ моделирования локальных геометрических препятствий при помощи *db*-графов (Directional blocking graph). Данная модель позволяет сформулировать слабые необходимые условия разборки изделия. То есть она позволяет отбросить заведомо нереализуемые проектные альтернативы.

В [Srinivasan, Gadh, 2002] предложен способ моделирования геометрических препятствий при помощи RI-графов (Removal influence graph). Этот граф описывает глубину вложения деталей в конструкцию относительно заданного направления разборки. В работе показано, что любая топологическая сортировка вершин RI-графа является описанием возможной последовательности разборки изделия.

Способ моделирования минимальных блокирующих множеств деталей (Minimal constraint assembly state) разработан в [Su, 2007]. Пространство всех возможных прямолинейных траекторий перемещения детали при разборке делится на телесные углы, в которых находится множество деталей, препятствующих перемещению данной по заданному направлению. По этим данным формируется булева характеристическая функция детали. Преобразование булевой функции

в минимальную дизъюнктивную нормальную форму позволяет получить минимальные блокирующие множества и частичный порядок разборки, который индуцируется геометрией изделия на совокупности деталей изделия.

Синтез свободной от столкновений траектории детали при демонтаже можно поставить как задачу анализа столкновений (Collision detection) [Ericson, 2004]. Однако систематическое применение этого аппарата в DPP требует очень больших вычислительных затрат. Поскольку в общем случае проверку непересечения тел требуется выполнить с высокой точностью для $(n - 2)!$ проектных альтернатив, где n — число деталей изделия. В [Eng et al., 1999; Miller, Hoffman, 1989; Hoffman, 1991] предложены различные эвристические правила, позволяющие сократить количество проверок, которые выполняются при помощи аппарата анализа столкновений. Например, из проверки исключаются детали, не имеющие свободных поверхностей или степеней подвижности в направлении демонтажа.

4. Гиперграфовая модель структуры изделия

В подавляющем большинстве исследований по автоматизированному проектированию процессов сборки (Computer aided assembly planning, CAAP) принимается важное допущение о том, что все детали являются невесомыми и абсолютно твердыми телами, а соединения между ними — разъемные [Ghandi, Masehian, 2015]. В этом случае последовательности сборки и разборки являются обратимыми, то есть если перестановка $(x_{i_1}, x_{i_2}, \dots, x_{i_n})$ представляет последовательность сборки, то инверсная перестановка $(x_{i_n}, x_{i_{n-1}}, \dots, x_{i_1})$ описывает последовательность разборки.

Связность и геометрическая координация деталей при сборке изделий достигается базированием по внутренним конструкторским базам (поверхностям, осям, разметке и др.). В общем случае базирование реализуется посредством нескольких механических связей одновременно. То есть оно является многоместным отношением и не может быть корректно описано средствами бинарных математических структур: графов, орграфов, семантических сетей и др.

В [Bozhko, 2019] предложена гиперграфовая модель механической структуры изделия, которая снимает данное противоречие. Приведем основные определения. Изделию поставим в соответствие гиперграф $H = (X, R)$, в котором множество вершин $X = \{x_i\}_{i=1}^n$ представляет детали, а множество гипердуг $R = \{r_j\}_{j=1}^m$ описывает минимальные геометрически определенные группировки деталей, полученные базированием. На рис. 1 показаны конструкция крепления вала (а) и гиперграф H_b (б) данной конструкции.

Определение 1. Сборочная операция называется когерентной, если она осуществляет механическую связь между деталями [Ghandi, Masehian, 2015].

Определение 2. Сборочная операция называется секвенциальной, если она выполняется при помощи двух рабочих органов [Ghandi, Masehian, 2015].

Определение 3. Конструкции, которые можно собрать при помощи множества секвенциальных операций, называются секвенциальными [Ghandi, Masehian, 2015].

На рис. 2, а показан пример несеквенциальной конструкции. Сборка этой конструкции на плоскости может быть выполнена при помощи независимых движений деталей 1, 2 и 3, которые выполняются тремя разными рабочими органами.

На рис. 2, б приведен пример изделия, при сборке которого используется некогерентная операция. Она заключается в упреждающей координации деталей 4 и 5 перед установкой детали 6.

В практике современного дискретного производства абсолютно доминируют секвенциальные когерентные операции [Whitney, 2004]. Только такие операции будем рассматривать далее.

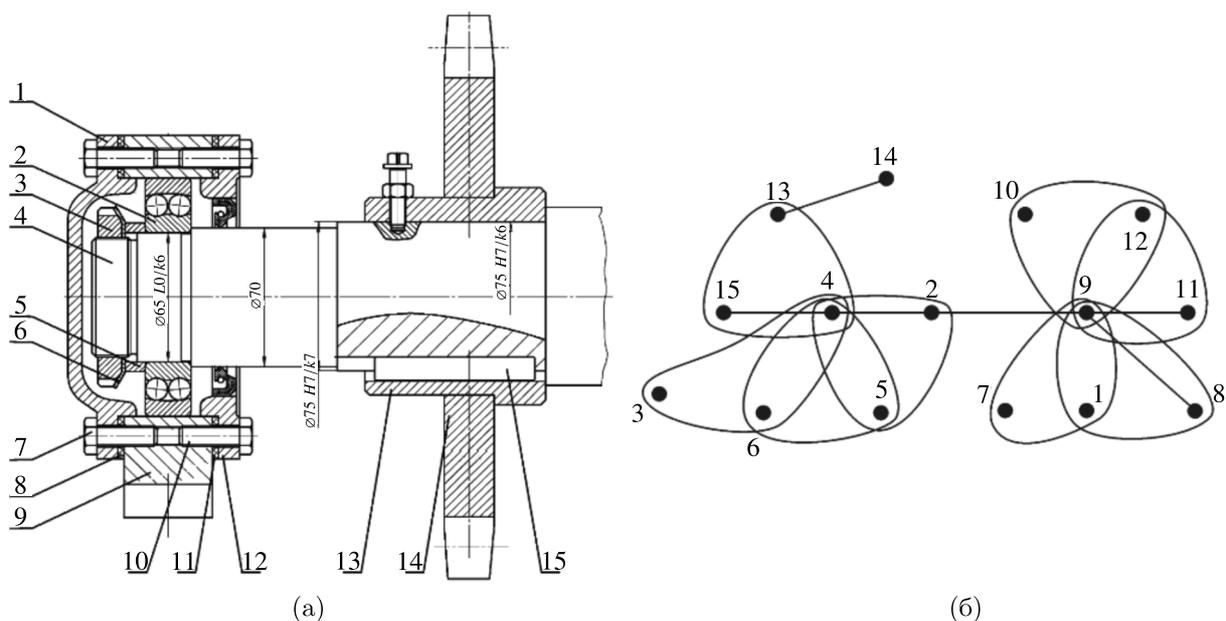


Рис. 1. Конструкция крепления вала (а) и гиперграф H_b конструкции (б)

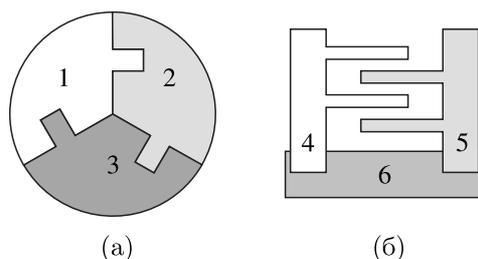


Рис. 2. Примеры несеквенциальной (а) и некогерентной (б) конструкций

Пусть в гиперграфе $H = (X, R)$ ребро $r \in R$ инцидентно вершинам $\{x_1, x_2, \dots, x_{i_r}\}$. Число $|\{x_1, x_2, \dots, x_{i_r}\}|$ — это степень ребра r .

Определение 4. Стягивание ребра $r = \{x_1, x_2, \dots, x_{i_r}\}$ — это операция отождествления вершин $\{x_1, x_2, \dots, x_{i_r}\}$ и исключения r из множества R .

Определение 5. Нормальным стягиванием называется стягивание ребра степени два.

Определение 6. Гиперграф $H = (X, R)$ назовем s -гиперграфом, если существует последовательность нормальных стягиваний, которая преобразует H в точку.

Нормальное стягивание ребра гиперграфа $H = (X, R)$ представляет собой математическое описание когерентной и секвенциальной сборочной операции. s -гиперграф — это модель механической структуры собираемого изделия, точка (одновершинный гиперграф без петель) — образ собранного изделия, все механические связи которого реализованы.

Теорема 1. Пусть гиперграф $H = (X, R)$ преобразуется в точку при помощи последовательности нормальных стягиваний. Тогда

- 1) $H = (X, R)$ является связным;
- 2) во множестве R есть хотя бы одно ребро второй степени;

3) выполняется равенство $|X| = |R| + 1$.

В [Bozhko, 2019] дано формальное доказательство этой важной теоремы.

5. Моделирование операций разборки

Если когерентную и секвенциальную операцию сборки можно описать как стягивание ребра второй степени, то в терминах гиперграфов разборка представляется как разрезание гиперграфа на две части. Постулируем важное свойство, которое обобщает важнейшее конструктивно-технологическое ограничение на операции демонтажа. При разборке стационарная и перемещаемая части разбираемого изделия не могут «рассыпаться». Они должны сохранить связность и геометрическую координацию своих элементов. Формализуем это ограничение.

Пусть задан s -гиперграф $H = (X, R)$, описывающий механическую структуру некоторого изделия.

Определение 7. Разбиение множества вершин X s -гиперграфа $H = (X, R)$ на два подмножества A и B , $A \cup B = X$, $A \cap B = \emptyset$, назовем нормальным разрезанием $A|B$, если подграфы $[A]$ и $[B]$, порожденные в H подмножествами вершин A , B , являются s -гиперграфами.

Теорема 2. Нормальное разрезание $A|B$ s -гиперграфа $H = (X, R)$ достигается удалением только одного ребра $r \in R$, и это ребро является мостом в H .

Доказательство. Пусть $[A] = (A, R_A)$ и $[B] = (B, R_B)$ — подграфы, порожденные в H множествами вершин A и B разбиения $A|B$. Покажем, что существует только единственное ребро $r \in R$, не входящее в R_A и R_B .

Подграфы $[A]$ и $[B]$ являются s -гиперграфами, поэтому для них справедливы соотношения $|A| = |R_A| + 1$ и $|B| = |R_B| + 1$. Сложим почленно эти равенства и получим $|A| + |B| = |R_A| + |R_B| + 2$. Подмножества вершин A и B образуют разбиение множества X , поэтому $|A| + |B| = |X|$, отсюда $|X| = |R_A| + |R_B| + 2$. С другой стороны, $H = (X, R)$ является s -гиперграфом, и 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, и оно является мостом.

Пусть $r \in R$ — мост, удаление которого делит гиперграф $H = (X, R)$ на два связных подграфа $[A]$ и $[B]$. Гиперграф H стягивается в точку, поэтому стягиваются и все его ребра, в частности ребро r . Пусть это ребро имеет в H вторую степень (рис. 3, а). Тогда для стягивания H нужно в любой последовательности стянуть $[A]$, $[B]$ и r . Следовательно, $[A]$ и $[B]$ являются s -гиперграфами.

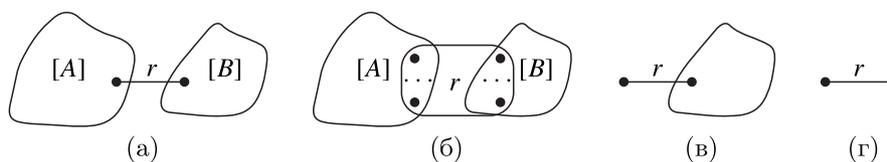


Рис. 3. Варианты стягивания ребра r

Пусть степень r строго больше единицы, то есть $|\{x_1, x_2, \dots, x_i\}| > 1$ (рис. 3, б). Рассмотрим все возможные ситуации стягивания ребра r . На рис. 3, в показан случай, когда подграф $[A]$ стянут в точку, а ребро r «схлопнулось» и имеет степень 2. Чтобы стянуть H , надо, в любой последовательности, стянуть r и преобразовать в точку подграф, инцидентный r . Это значит,

что $[A]$ и $[B]$ — s -подграфы. Тривиальный случай, когда r стягивается последним, показан на рис. 3, z . Здесь уже $[A]$ и $[B]$ преобразованы в точки. Теорема доказана. \square

Данная теорема дает простой способ синтеза всех возможных нормальных разрезов s -гиперграфа. Поскольку каждый фрагмент s -гиперграфа, полученный удалением одного моста, в свою очередь, является s -гиперграфом, то операцию нормального разрезания можно применить рекурсивно. Результаты этой процедуры представим в виде И-ИЛИ-дерева $T(H)$, в котором корневая вершина описывает исходный s -гиперграф $H = (X, R)$, внутренние вершины представляют подграфы, полученные нормальным разрезанием, листья соответствуют вершинам гиперграфа H , а связки описывают сами разрезания.

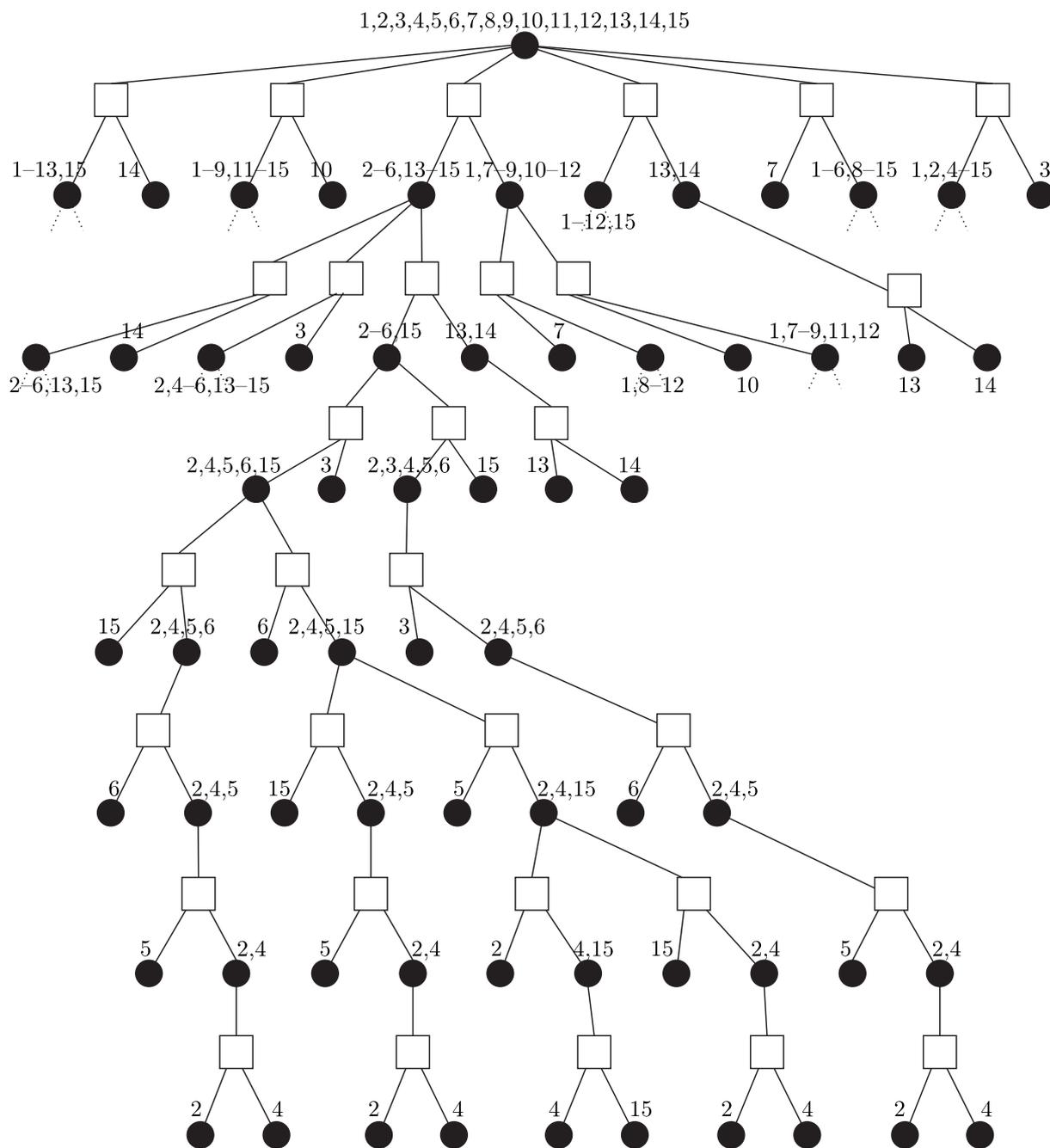


Рис. 4. И-ИЛИ-дерево $T(H_b)$ разрезов гиперграфа H_b (рис. 1, б)

На рис. 4 показан фрагмент И-ИЛИ-дерева $T(H_b)$, построенного по s -гиперграфу H_b (рис. 1, б). На этом рисунке связи обозначены квадратами белого цвета. Вершины черного цвета изображают s -подграфы, полученные нормальными разрезами. Тире символизирует множество номеров вершин, идущих подряд.

Приведем несколько следствий, которые вытекают из определения нормального разрезания и процедуры построения дерева $T(H)$. Вершины дерева — это s -гиперграфы, которые являются образами связных координированных и независимо собираемых конструктивных фрагментов. Таковыми являются изделие и детали, сборочные единицы, узлы, состояния изделия в процессе сборки/разборки и др. Нормальное разрезание служит математическим описанием когерентной и секвенциальной операции разборки.

Принято различать полную и частичную разборку изделия. Результатом первой являются отдельные детали и комплектующие. Частичная разборка завершается экспликацией некоторой неэлементарной части изделия. Разборка называется линейной, если на каждой операции демонтируется одна деталь. Разборка — нелинейная, если хотя бы на одной операции демонтируется собранный фрагмент изделия [Whitney, 2004].

Дерево $T(H)$ позволяет дать точные математические описания всех типов демонтажа. В следующих определениях будем рассматривать И-ИЛИ-дерево $T(H)$ как обычный двудольный граф, в котором доли образуют черные и белые вершины. В этом графе все цепи начинаются и заканчиваются в доле черных вершин, поэтому имеют четную длину.

Любая цепь от корневой вершины дерева $T(H)$ до висячей представляет собой математическое описание плана полной разборки. На рис. 5 изображен план полной линейной разборки, когда демонтаж изделия выполняется по одной детали на каждой операции. Этот план можно записать в виде последовательности демонтируемых деталей (7, 1, 8, 10, 12, 11, ..., 15). Легко видеть, что цепь, описывающая полную линейную разборку изделия, должна иметь длину $2(n - 1)$, где n — число деталей изделия.

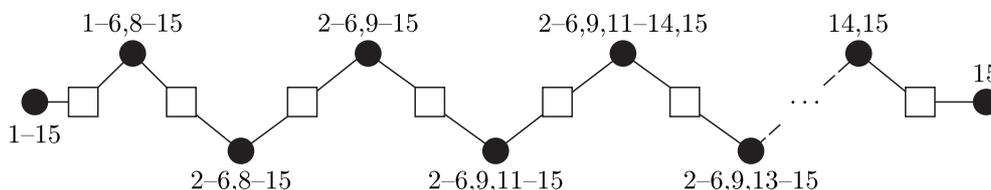


Рис. 5. Последовательность полной линейной разборки изделия (рис. 1, а)

На рис. 6 показан план нелинейной разборки. Его можно записать в виде последовательности (7, 1, 8, ..., {9, 10, 11, 12}, ..., 15).

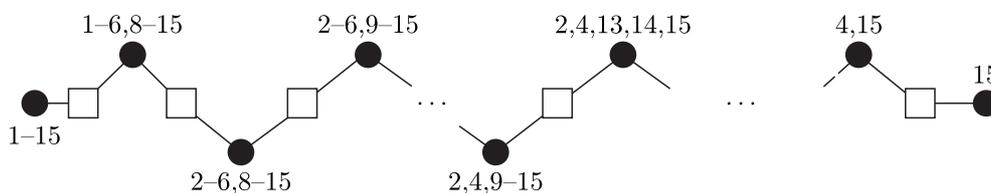


Рис. 6. Последовательность нелинейной разборки изделия (рис. 1, а)

Любая цепь, которая начинается в корне дерева и завершается во внутренней вершине, служит описанием плана частичной разборки изделия.

Описанием полной разборки изделия и всех его составных частей является так называемый решающий подграф дерева $T(H)$. Введем необходимые обозначения и определения.

Пусть по-прежнему $X = \{x_i\}$ — множество вершин гиперграфа H . В дереве $T(H)$ вершины x_i являются листьями. Корневую вершину дерева обозначим как y . Дадим рекурсивное определение решающего графа.

Определение 8. Решающий граф G , который соединяет y с X :

- 1) состоит из одной вершины y , если $y \in X$;
- 2) пусть $y \notin X$ и из y выходит связка K с концевыми вершинами y_1, y_2, \dots, y_k . Пусть эти вершины соединяют с X решающие подграфы G_1, G_2, \dots, G_k . Тогда решающий граф G состоит из вершины y , связки K и подграфов G_1, G_2, \dots, G_k .

Для иллюстрации понятия решающего подграфа воспользуемся гиперграфом H_c невысокого пятого порядка (рис. 7, а). На рис. 7, б показано дерево всех нормальных разрезов $T(H_c)$, а на рис. 7, в изображен решающий граф. Согласно определению 8, он соединяет корневую вершину $y = 1, 2, 3, 4, 5$ с множеством висячих вершин $X = \{1, 2, 3, 4, 5\}$. Этот граф описывает нелинейную разборку на части $\{3, 4, 5\}$ и $\{1, 2\}$ и последующий демонтаж этих частей.

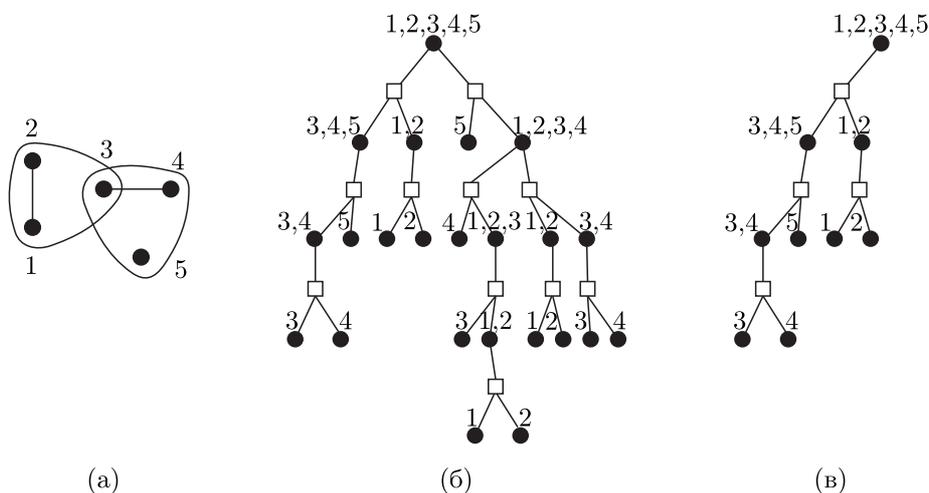


Рис. 7. Гиперграф H_c (а), И-ИЛИ-дерево $T(H_c)$ (б) и решающий граф (в)

Ремонтопригодность и эксплуатационные свойства машины или механического прибора в значительной степени зависят от характеристики, которую можно назвать глубиной вложения детали. В содержательных терминах это минимальная позиция детали в последовательности разборки изделия. Например, для конструкции крепления вала (рис. 1, а) глубина вложения детали 7 равна 1. Винт может быть демонтирован первым. Глубина вложения втулки 5 равна 5. Перед этой деталью должны быть удалены детали с номерами 7, 1, 3, 6. Легко согласиться с тем, что детали, которые требуют регулярного ремонта или технического обслуживания, должны иметь небольшую глубину вложения в конструкцию.

Точное вычисление данной технической характеристики является сложной задачей, поскольку требует учета множества конструктивных/технологических ограничений (геометрических, структурных, размерных, кинематических, прочностных и пр.). Гиперграфовая модель механической структуры позволяет получить оценку снизу глубины вложения любой детали изделия с минимальными вычислительными затратами.

Согласно определению 7, некоторая деталь z может быть демонтирована, если существует нормальное разрезание, одной из частей которого служит одновершинный подграф z . Это позволяет дать точное определение структурной глубины вложения детали в гиперграфовых терминах.

Пусть $H = (X, R)$ — s -гиперграф, описывающий механическую структуру некоторой технической системы.

Определение 9. Структурной глубиной вложения вершины z в s -гиперграф $H = (X, R)$ назовем число $h(z)$, равное минимальному числу нормальных разрезов, которые позволяют из H получить одновершинный подграф z .

Простой способ расчета чисел $h()$ дает дерево $T(H)$. Легко видеть, что $h(x)$ равно $h(x) = \frac{n_x}{2}$, где n_x — длина кратчайшей цепи, соединяющей корневую вершину дерева $T(H)$ с висячей вершиной x . Например, в гиперграфе H_c (рис. 7, а) $h(5) = 1$, $h(4) = 2$, $h(3) = 3$, $h(1) = 2$ и т. д.

6. Заключение

Полная или частичная разборка является важной операцией, которая требуется для ремонта, технического обслуживания, хранения и утилизации изделия. От сложности разборки в значительной степени зависят качество, стоимость и длительность этих технических мероприятий. Возможность разобрать изделие в заданной последовательности закладывается на самых ранних этапах проектирования, а реализуется на завершающих этапах жизненного цикла изделия. По этой причине современные системы автоматизированного проектирования имеют программные средства для оценки нового изделия по критерию разборки.

Возможность демонтажа изделия в заданной последовательности зависит прежде всего от механической структуры. Предложена гиперграфовая модель механической структуры сложной технической системы. Эта модель корректно описывает многоместное базирование, при помощи которого достигаются связность и геометрическая координация деталей в процессе сборки/разборки изделия. Показано, что корректным математическим описанием когерентной и секвенциальной операции разборки является нормальное разрезание гиперграфа. Доказана важная теорема о свойствах нормальных разрезов. Множество всех нормальных разрезов гиперграфовой модели можно представить в виде И-ИЛИ-дерева. Это дерево служит универсальной порождающей средой для генерации планов разборки изделия и его составных частей. Предложены оценка сложности демонтажа детали и способ ее вычисления. Разработанный аппарат может найти применение в интегрированных CAD/CAM/CAE-системах для оценки корректировки проектов сложных технических систем.

Список литературы (References)

- Lambert A. J. D.* Disassembly sequencing: a survey // International Journal of Production Research. — 2003. — Vol. 41, No. 16. — P. 3721–3759.
- Guo X. et al.* Disassembly sequence planning: a survey // IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica. — 2020. — Vol. 8, No. 7. — P. 1308–1324.
- O’Shea B., Grewal S. S., Kaebernick H.* State of the art literature survey on disassembly planning // Concurrent Engineering. — 1998. — Vol. 6, No. 4. — P. 345–357.
- Lee D. H., Kang J. G., Xirouchakis P.* Disassembly planning and scheduling: review and further research // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture. — 2001. — Vol. 215, No. 5. — P. 695–709.
- De Mello L. S. H., Sanderson A. C.* AND/OR graph representation of assembly plans // IEEE Transactions on robotics and automation. — 1990. — Vol. 6, No. 2. — P. 188–199.
- Sanderson A. C., de Mello L. S. H., Zhang H.* Assembly sequence planning // AI Magazine. — 1990. — Vol. 11, No. 1. — P. 62.

- Bonneville F., Henriod J. M., Bourjault A.* Generation of assembly sequences with ternary operations // Assembly and Task Planning. Proceedings IEEE International Symposium on. — 1995. — P. 245–249.
- Wang H., Ceglarek D.* Representation, generation, and analysis of mechanical assembly sequences with k-ary operations // Journal of Computing and Information Science in Engineering. — 2012. — Vol. 12, No. 1. — 12 p.
- 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.
- Lambert A.J.D.* Optimizing disassembly processes subjected to sequence-dependent cost // Computers & Operations Research. — 2007. — Vol. 34, No. 2. — P. 536–551.
- Min S., Zhu X., Zhu X.* Mechanical product disassembly and/or graph construction // International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation. IEEE. — 2010. — Vol. 2. — P. 627–631.
- Caselli S., Zanichelli F.* On assembly sequence planning using Petri nets // Assembly and Task Planning. Proceedings, IEEE International Symposium. — 1995. — P. 239–244.
- Cao T., Sanderson A.* Task sequence planning using fuzzy Petri nets // Systems, Man, and Cybernetics. Decision Aiding for Complex Systems. Conference Proceedings. IEEE International Conference. — 1991. — Vol. 1. — P. 349–354.
- Zhao S. et al.* Fuzzy reasoning Petri nets and its application to disassembly sequence decision-making for the end-of-life product recycling and remanufacturing // International Journal of Computer Integrated Manufacturing. — 2014. — Vol. 27, No. 5. — P. 415–421.
- Grochowski D.E., Tang Y.* A machine learning approach for optimal disassembly planning // International Journal of Computer Integrated Manufacturing. — 2009. — Vol. 22, No. 4. — P. 374–383.
- Wolter J., Chakrabarty S., Tsao J.* Mating constraint languages for assembly sequence planning // Robotics and Automation. Proceedings IEEE International Conference. — 1992. — Vol. 3. — P. 2367–2374.
- Smith S., Chen W.H.* Multiple-target selective disassembly sequence planning with disassembly sequence structure graphs // International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference. American Society of Mechanical Engineers. — 2012. — Vol. 45028. — P. 1305–1314.
- Ben-Arieh D., Kramer B.* Computer-aided process planning for assembly: generation of assembly operation sequence // International Journal of Production Research. — 1994. — Vol. 32, No. 3. — P. 643–656.
- Elsayed A., Kongar E., Gupta S.M.* An evolutionary algorithm for selective disassembly of end-of-life products // International Journal of Swarm Intelligence and Evolutionary Computation. — 2012. — Vol. 1, No. 2012. — P. 7.
- Wilson R.H., Latombe J.C.* Geometric reasoning about mechanical assembly // Artificial Intelligence. — 1994. — Vol. 71, No. 2. — P. 371–396.
- Srinivasan H., Gadh R.* A non-interfering selective disassembly sequence for components with geometric constraints // IIE transactions. — 2002. — Vol. 34, No. 4. — P. 349–361.
- Su Q.* Computer aided geometric feasible assembly sequence planning and optimizing // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. — 2007. — Vol. 33, No. 1. — P. 48–57.
- Ericson C.* Real-time collision detection. — Crc Press, 2004. — 591 p.
- Eng T.H. et al.* Feature-based assembly modeling and sequence generation // Computers & Industrial Engineering. — 1999. — Vol. 36, No. 1. — P. 17–33.

-
- Miller J.M., Hoffman R.L.* Automatic assembly planning with fasteners // IEEE International Conference on Robotics and Automation. — 1989. — P. 69–74.
- Hoffman R.A.* A common sense approach to assembly sequence planning // Computer-Aided Mechanical Assembly Planning. — 1991. — P. 289–313.
- Bozhko A.N.* Hypergraph model for assembly sequence problem // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. — 2019. — Vol. 560, No. 1. — P. 012010.
- Whitney D.E.* Mechanical assemblies: their design, manufacture, and role in product development. — New York: Oxford University Press, 2004. — 518 p.