УДК 004.942

Обзор методов автоматизированного синтеза сборочных декомпозиций сложных изделий

Барсуков Дмитрий Александрович barsukovda@bmstu.ru

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Статья посвящена обзору методов автоматизированного синтеза сборочных декомпозиций сложных изделий, которые играют ключевую роль в технологической подготовке процесса сборки. Декомпозиция изделия на сборочные единицы определяется множеством конструктивных параметров, свойств технологической системы и в значительной степени влияет на эксплуатационные характеристики и экономические показатели производства. Современные методы автоматизированного проектирования позволяют систематически подходить к выбору рациональной декомпозиции. В статье рассмотрены два основных подхода в моделировании структурных свойств сборочных декомпозиций: *кластеризация графа механических связей и построение И–ИЛИ–дерева всех разрезаний графа механических связей и поиск вписанного в это дерево упорядоченного множества.*

Ключевые слова: *САПР, автоматизированный синтез, сборочные декомпозиции, кластеризация графа механических связей, И–ИЛИ–дерево*

Введение. Технологическая подготовка сборки сложных изделий — это важнейшая стадия любого современного дискретного производства. Ключевым проектным решением является декомпозиция изделия на сборочные единицы. Качество этого проектного решения зависит от большого числа конструктивных параметров изделия, свойств технологической системы и существенным образом влияет на эксплуатационные характеристики машины или прибора и экономические показатели сборочного производства.

При разбиении изделия на независимо собираемые сборочные единицы необходимо учитывать структурные, геометрические, размерные, кинематические и другие связи между деталями изделия. На это проектное решение влияют операции контроля, испытаний, опытной эксплуатации, разборки и др. По этим причинам выбор рациональной декомпозиции сложного изделия на сборочные единицы невозможен без систематического использования современных методов и средств автоматизированного проектирования.

Проблема синтеза разбиения изделия на сборочные единицы активно обсуждается в публикациях по информационным технологиям. Механическая структура и геометрические свойства изделия формируют фундаментальные ограничения, без выполнения которых проектное решение становится заведомо нежизнеспособным. В современных исследованиях и разработках для математического моделирования структурных свойств сборочных декомпозиций используются два основных подхода.

Кластеризация графа механических связей. Этот подход используется, главным образом, при проектировании одноуровневых декомпозиций. Ищется такое разрезание графа, у которого внутренняя связность превосходит внешнюю. Дополнительными условиями для выделения подграфа служат вхождение базисных деталей, устойчивость, число сопрягаемых поверхностей и пр.

Построение И–ИЛИ–дерева всех разрезаний графа механических связей и поиск вписанного в это дерево упорядоченного множества. Данный подход позволяет построить многоуровневую декомпозицию на сборочные единицы.

В работе приводится обзор и критический анализ актуальных современных методов автоматизированного синтеза сборочных декомпозиций.

Кластеризация графа механических связей. Кластеризация графа механических связей — это процесс группировки вершин графа, представляющего механические системы, таким образом, чтобы узлы, находящиеся в близком взаимодействии или имеющие сильные связи, образовывали кластеры. Сначала необходимо определить граф, который представляет собой множество вершин и связей между ними. В механических системах узлы могут представлять части (например, детали механизма), а ребра — механические связи между ними. Следующий шаг состоит в выборе метрики для оценки связей. Важно выбрать метрику, по которой будет рассчитываться «сила» связи между узлами.

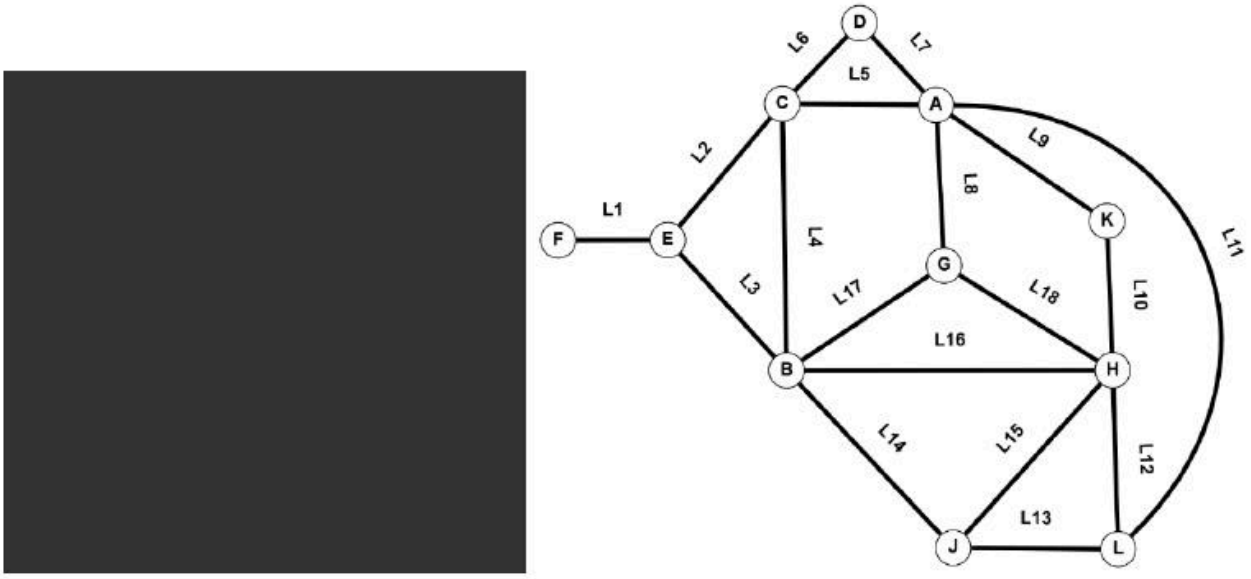
На силу связи могут влиять свойство соединения (разъемное, неразъемное, условно разъемное и пр.), вид технологической операции, при помощи которой реализуется соединение, точность позиционирования деталей и многое другое. Детали, которые выбранная метрика считает близкими, могут быть объединены в сборочную единицу.

Существует несколько методов кластеризации графов, и каждый из них может быть применен в зависимости от специфики задачи.

Один из первых методов в данной области описан Bourjault в статье [1]. Собранное устройство представляется в виде неориентированного графа механических связей. На рис. 1, *а* показана коробка передач, а на рис. 1, *б* — граф механических связей этой конструкции.

Каждому ребру графа сопоставляется бинарная переменная $L_i, i = = 1,2, \dots, n$ где ноль указывает на отсутствие связи, а единица — на ее наличие. Процесс разборки формализуется как разделение графа связей на две или более изолированных компонент, что эквивалентно «разрезанию» графа. С целью исключить конструктивно и технологически некорректные варианты разрезов, к сотрудничеству привлекаются эксперты, чья задача заключается в ответах на вопросы такого рода: «Возможно ли разорвать связь L_i до разрыва связи L_j?». Эти вопросы рассматриваются не только для пар связей, но и для ключевых групп соединений. На основании заключений экспертов формируется отношение предшествования (precedence relationship) между элементами графа взаимодействий, что дает возможность определить допустимые последовательности сборки и разборки в форме набора корневых

ориентированных деревьев. Основным недостатком данной методологии являются значительные трудозатраты и низкая точность моделирования, обусловленные сильной зависимостью от мнения экспертов.



а *б*

Рис. 1. Автоматическая коробка передач:
а — сборочные детали; *б* — граф связей (Liaison Graph)

Модификация, предложенная De Fazio и Whitney [2] оптимизирует процесс взаимодействия с экспертами, сокращая количество обращений за счет более структурированного подхода. Предложенная модификация позволяет полностью восстановить отношения предшествования для множества механических связей изделия и визуализировать полученные данные в форме диаграммы последовательностей сборки-разборки (assembly sequence diagram).

Критерии кластеризации графа механических связей играют ключевую роль в процессе разбивки сложных технических систем на более простые сборочные единицы.

Важнейшим условиям кластеризации является геометрическая разрешимость [4]. Этот критерий требует, чтобы детали в кластере могли быть разобраны без столкновений. То есть при разборке элементов из кластера не должно возникать препятствий, которые могут помешать движению деталей. Геометрическая разрешимость проверяется с помощью универсальных методов анализа столкновений (Collision Detection) [5], планирования перемещений (Motion Planning) [6] или посредством специализированных комбинаторных методов [7], которые учитывают локальные препятствия при сборке/разборке изделий.

Основной целью кластеризации является идентификация подгрупп элементов, которые функционируют как компактные и независимые единицы [8]. Это может быть достигнуто различными подходами, в зависимости от специфики задачи и требований. Одним из наиболее распространенных под-

ходов к кластеризации является использование алгоритмов, основанных на теории графов [9]. Алгоритмы, такие как метод минимального разреза (minimum cut) или метод кластеризации на основе спектров (spectral clustering), позволяют выделять подграфы с высокой степенью связности [10]. Эти методы анализируют структуру графа и выделяют узлы, которые имеют множество соединений, создавая тем самым компактные и функционально завершенные группы.

В итоге, методы кластеризации графа механических связей играют ключевую роль в повышении эффективности проектирования и эксплуатации сложных изделий. Они обеспечивают систематизацию процессов, упрощают разборку и сборку и способствуют повышению надежности и устойчивости технических систем. Комплексное применение различных методов кластеризации позволяет адаптироваться к специфическим требованиям проектов и значительно улучшает общую производительность и качество инженерных решений.

Построение И–ИЛИ–дерева всех разрезаний графа связей. Метод проектирования проектных решений сборочного передела, основанный на создании И–ИЛИ–дерева (AND–OR–tree) всех разрезаний (Bi-partitioning) графа механических связей, предложен в [11].

Основной структурной моделью изделия является граф механических связей. Граф делится на две связные компоненты при помощи удаления всех соединяющих их ребер. Ищутся все возможные разрезания графа на две части. Каждый вариант представляется в виде связки дерева, а все варианты образуют первый уровень И–ИЛИ–дерева. Далее процедура рекурсивно применяется ко всем связным фрагмента графа. Результат процедуры представляется в виде И–ИЛИ–дерева, у которого корень — это изделие, листья — детали, а внутренние вершины связные фрагменты графа, полученные рекурсивным разрезанием на две части.

При построении И–ИЛИ–дерева используется подход, основанный на частичных разрезаниях, где для каждого ребра графа может быть два состояния: оно может быть либо включено, либо исключено. Таким образом, просматривая все комбинации, мы получаем полное дерево возможных разрезаний. Важно отметить, что на каждом уровне дерева происходит ветвление: если одно ребро представлено в разрезании, то другие ребра могут быть либо включены в разрезание, либо нет. Это приводит к экспоненциальному росту числа узлов в дереве в зависимости от количества ребер графа, что требует применения эффективных алгоритмов. На рис. 2 показана часть коробки передач, а на рис. 3 — И–ИЛИ–дерево части этой конструкции.

Анализ И–ИЛИ–дерева также позволяет выявить критические точки, которые могут значительно повлиять на устойчивость механической системы [12]. Таким образом, построение И–ИЛИ–дерева всех разрезаний графа механических связей является мощным инструментом, который способствует созданию более устойчивых и надежных механических конструкций, позволяя детально исследовать связи и взаимодействия между элементами системы.

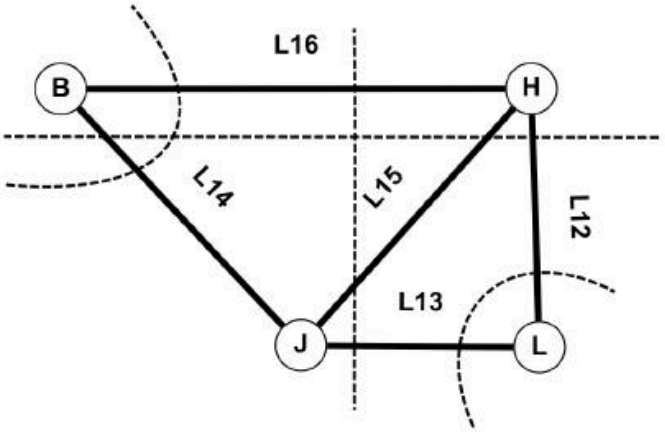


Рис. 2. Часть графа связей автоматической коробки передач для построения И–ИЛИ–дерева разрезаний

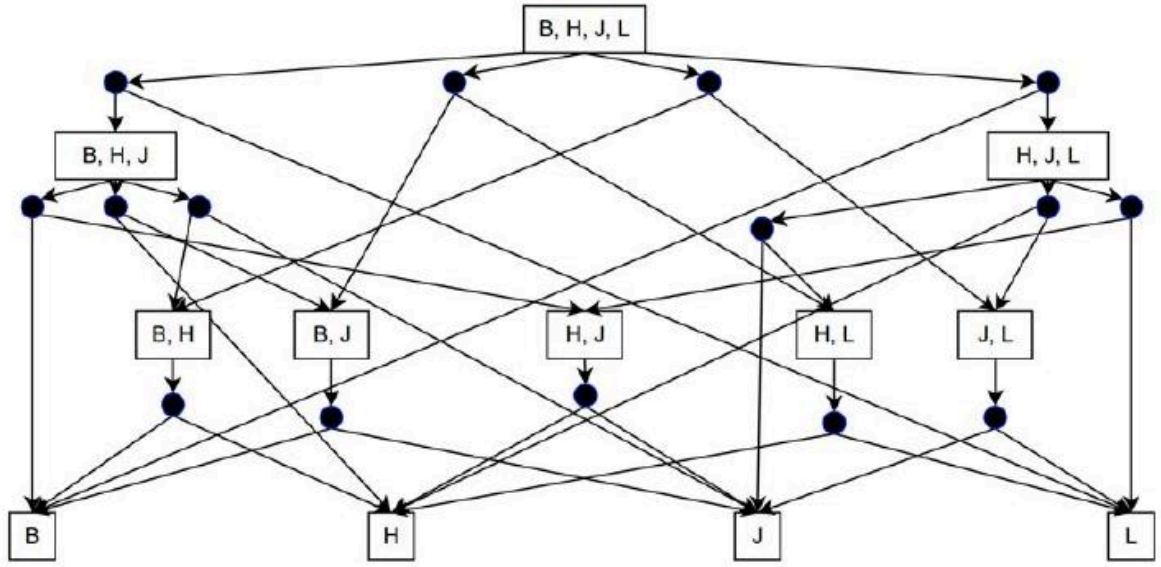


Рис. 3. И–ИЛИ–дерево разрезаний части автоматической коробки передач

Таким образом, этот подход позволяет построить многоуровневую декомпозицию на сборочные единицы. И–ИЛИ–дерево представляет собой структуру, где каждый узел соответствует возможному разрезанию графа, а листья — конечным сборочным единицам. Поиск упорядоченного множества в этом дереве позволяет найти оптимальное разбиение.

Рассмотрим преимущества и недостатки метода И–ИЛИ–дерева. Метод позволяет создавать многоуровневые декомпозиции, что более точно отражает структуру сложных изделий. И–ИЛИ–дерево предоставляет гибкость в выборе различных вариантов разбиения, что полезно для учета дополнительных ограничений и требований. Слабой стороной метода является вычислительная сложность: построение и анализ И–ИЛИ–дерева может быть вычислительно сложным, особенно для больших графов. Интерпретация результатов может быть также сложной, так как дерево может содержать большое количество узлов и вариантов разбиения.

Заключение. Использование графов и их кластеризации позволяет создавать более ясные и понятные модели, которые легче анализировать. Визуализация связи между элементами через графы и кластеры помогает командам разработчиков лучше понимать структуру и функционирование изделия. Таким образом, кластеризация графа механических связей является важным механизмом для эффективного проектирования и управления сложными техническими системами, обеспечивая более высокое качество, надежность и экономическую эффективность в их жизненном цикле.

Создание И–ИЛИ–дерева является важным шагом для подготовки к разборке, поскольку дает проектировщикам информацию для минимизации рисков повреждений элементов во время разборки. Использование И–ИЛИ–дерева приводит к улучшению процессов контроля качества за счет выявления проблемных зон в конструкции на этапе проектирования, позволяет заранее корректировать проект и повышать надежность конечного изделия. Внедрение такого подхода дает возможность повысить эффективность производственных процессов, что может привести к значительной экономии ресурсов и времени.

Список источников

[1] Bourjault A. Methodology of assembly automation: A new approach. Robotics and Factories of the Future'87: Proceedings of the Second International Conference, San Diego, California, Berlin, Heidelberg, Springer Berlin Heidelberg, 1988, pp. 37–45. https://doi.org/10.1007/978-3-642-73890-6_6

[2] De Fazio T., Whitney D. Simplified generation of all mechanical assembly sequences. IEEE Journal on Robotics and Automation, 1987, vol. 3, no. 6, pp. 640–658. https://doi.org/10.1109/JRA.1987.1087132

[3] Wilson R.H., Rit J.F. Maintaining geometric dependencies in an assembly planner. Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation, IEEE, 1990, pp. 890–895. https://doi.org/10.1109/ROBOT.1990.126102

[4] Божко А.Н. Анализ геометрической разрешимости при сборке сложных изделий как задача принятия решений. *Математика и математическое моделирование*, 2018, № 5, с. 17–34.

[5] Kockara S. et al. Collision detection: A survey. IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics, IEEE, 2007, pp. 4046–4051. https://doi.org/10.1109/ICSMC.2007.4414258

[6] González D. et al. A review of motion planning techniques for automated vehicles. IEEE Transactions on intelligent transportation systems, 2015, vol. 17, no. 4, pp. 1135–1145. https://doi.org/10.1109/TITS.2015.2498841

[7] Pach J., Agarwal P.K. Combinatorial geometry. John Wiley & Sons, 2011.

[8] Cao Y., Kou X., Cao S. A sub-assembly identification algorithm for assembly sequence planning. International Industrial Informatics and Computer Engineering Conference, Atlantis Press, 2015, pp. 555–558. https://doi.org/10.2991/iiicec-15.2015.127

[9] Bondy J.A., Murty U.S.R. Graph theory. Springer Publishing Company Inc., 2008.

[10] Kaufman L., Rousseeuw P.J. Finding groups in data: an introduction to cluster analysis. John Wiley & Sons, 2009.

[11] Божко А.Н. Моделирование процессов разборки сложных изделий. *Компьютерные исследования и моделирование*, 2022, т. 14, № 3, с. 525–537.

[12] Iwase S. AND/OR graph generation for disassembly analysis: deeply-nested subassemblies represented by a hypergraph. International Journal of Production Research, 2024, pp. 1–29. https://doi.org/10.1080/00207543.2024.2416560

Overview of methods of automated synthesis of assembly decomposition of complex products

Barsukov Dmitriy A. barsukovda@bmstu.ru

BMSTU, Moscow, Russia

The article is devoted to the review of methods of automated synthesis of assembly decomposition of complex products, which play a key role in the technological preparation of the assembly. The breakdown of a product into assembly units is determined by a variety of design parameters, properties of the technological system and significantly affects the operational characteristics and economic performance of production. Modern computer-aided design methods allow a systematic approach to choosing a rational breakdown. The article discusses in detail two main approaches to modeling the structural properties of assembly decompositions: clusterization of the graph of mechanical connections and the construction AND/OR tree of all sections of the graph of mechanical connections and the search for an ordered set inscribed in this tree.

Keywords: CAD, automated synthesis, assembly decompositions, clusterization of the graph of mechanical connections, AND–OR–tree