

УДК 004.942

Обзор структурных моделей изделия для автоматизированного проектирования сборочных декомпозиций

Барсуков Дмитрий Александрович

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Представлен обзор актуальных подходов к автоматизированному синтезу сборочных декомпозиций в технологической подготовке производства сложных технических изделий. Корректная группировка деталей в автономных сборочных модулях зависит от различных факторов: конструктивных особенностей изделий, характеристик производственного оборудования, а также требований к испытаниям, изготовлению и эксплуатации. Эти аспекты напрямую влияют на надежность продукции, трудозатраты на сборку и экономическую эффективность всего производственного цикла. Рассмотрены современные методы, реализующие системный подход к созданию оптимальных декомпозиций. Особое внимание уделено моделям принятия решений и сетевым моделям.

Ключевые слова: САПР, автоматизированный синтез, сборочные декомпозиции, модели принятия решений, сетевые модели

Введение. Этап технологической подготовки сборки играет решающую роль в современном производстве сложных технических систем. Важнейшим проектным решением этого этапа является разделение изделий на автономные сборочные единицы. От выбранной декомпозиции зависит не только эффективность процесса сборки, но и технические характеристики конечного продукта.

Разбиение изделия на сборочные единицы зависит от большого числа конструкторских, технологических и экономических факторов: геометрии изделия, его структуры, способа простановки размерных цепей, точности изготовления отдельных деталей и др. Ошибки в выборе данного проектного решения могут привести к увеличению трудозатрат, снижению надежности продукции и удорожанию производства. Поэтому задача автоматизации проектирования сборочных декомпозиций сложных технических систем является важной и актуальной. Эта проблема активно обсуждается в современных публикациях по автоматизации проектирования и компьютерному моделированию сложных систем [1–3].

Собираемость изделия и его способность делиться на сборочные единицы, которые собираются независимо на отдельных рабочих местах, зависят прежде всего от геометрических и структурных свойств конструкции.

Современные исследования направлены на разработку математических моделей для описания структурных свойств изделия. Для этого используется методы теории графов, гиперграфов, семантических сетей, сетей Петри, теории принятия решений и пр. Внедрение этих моделей и методов их обработки

в промышленности оказывает влияние на экономический эффект, приводит к снижению затрат на проектирование и повышает функциональность разрабатываемых технических систем.

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

Модели принятия решений. Модели принятия решений играют ключевую роль в инженерном проектировании, особенно при определении последовательности разборки изделия и его разбиения на сборочные единицы. Эти задачи тесно связаны, так как зависят от технических характеристик изделия: геометрических, структурных, размерных и кинематических. В отличие от субъективных предпочтений, используемых в классических задачах принятия решений, здесь формируется объективная структура предпочтений, отражающая реальные технические ограничения, заданные проектировщиком.

Отношение предпочтения τ на множестве деталей изделия определяется как рефлексивное бинарное отношение, которое порождает два производных отношения: доминирование γ описывает иерархию элементов, где если деталь a доминирует над b , то a должна быть собрана до b ; безразличие β выражает эквивалентность альтернатив, например принадлежность деталей к одной сборочной единице. Пара (γ, β) задает структуру доминирования-безразличия. Эта структура позволяет формализовать как временные зависимости между деталями, так и их группировку в узлы [4, 5].

Для корректного моделирования процессов сборки структура (γ, β) должна быть транзитивной: γ и β транзитивны как отдельные отношения и доминирование γ сохраняется через безразличие β : если $a \gamma b$ и $b \beta c$, то $a \gamma c$. Такая структура определяет предпорядок — рефлексивное и транзитивное отношение, широко используемое в теории принятия решений. Предпорядок τ обеспечивает логическую последовательность сборки, учитывая как детализацию взаимодействий между отдельными элементами, так и их объединение в сборочные единицы.

Структура предпочтений (γ, β) представляет мощный инструмент для моделирования технических ограничений в процессах проектирования и сборки. Предпорядок τ обеспечивает баланс между детализацией временных зависимостей (через доминирование γ) и обобщением (через безразличие β). Факторизация позволяет упрощать анализ сложных систем, сохраняя логическую целостность модели [6]. Этот подход может быть использован для автоматизации проектирования, оптимизации сборочных процессов и разработки систем поддержки принятия решений в инженерной практике.

Модель принятия решений представляет собой важный аспект проектирования, особенно в контексте последовательности разборки изделия и его разбиения на сборочные единицы. Эти два аспекта можно считать связанными решениями, которые зависят от ряда общих конструкторских свойств изделия, включая геометрические, структурные, размерные и кинематические характеристики. Основываясь на этих свойствах, можно предположить, что

проектные решения формируются на основе общей структуры предпочтений, определенной на множестве деталей изделия.

Таким образом, структура предпочтений не является субъективным мнением лица, принимающего решение, как это часто бывает в задачах принятия решений, а представляет собой объективное выражение реальных технических связей и ограничений, установленных проектировщиком на этапе разработки изделия. Перечисленные аспекты и структуры позволяют глубже понять динамику принятия решений в процессе проектирования и сборки изделий.

Анализ подхода, в котором структурные свойства сложного изделия моделируются при помощи теории принятия решений и алгебраического аппарата бинарных отношений показал следующее.

Последовательность сборки изделия и его разбиение на сборочные единицы являются взаимосвязанными проектными решениями, которые зависят от множества общих конструкторских свойств. Это указывает на необходимость комплексного подхода к проектированию.

Проектные решения формируются на основе объективной структуры предпочтений, которая отражает реальные технические связи и ограничения, заложенные на этапе проектирования. Это позволяет значительно улучшить качество принятых решений.

Использование бинарных отношений предпочтения, доминирования и безразличия позволяет повысить точность анализа альтернатив и упорядоченности деталей в процессе сборки. Эти отношения создают надежную основу для эффективной организации сборочных процессов.

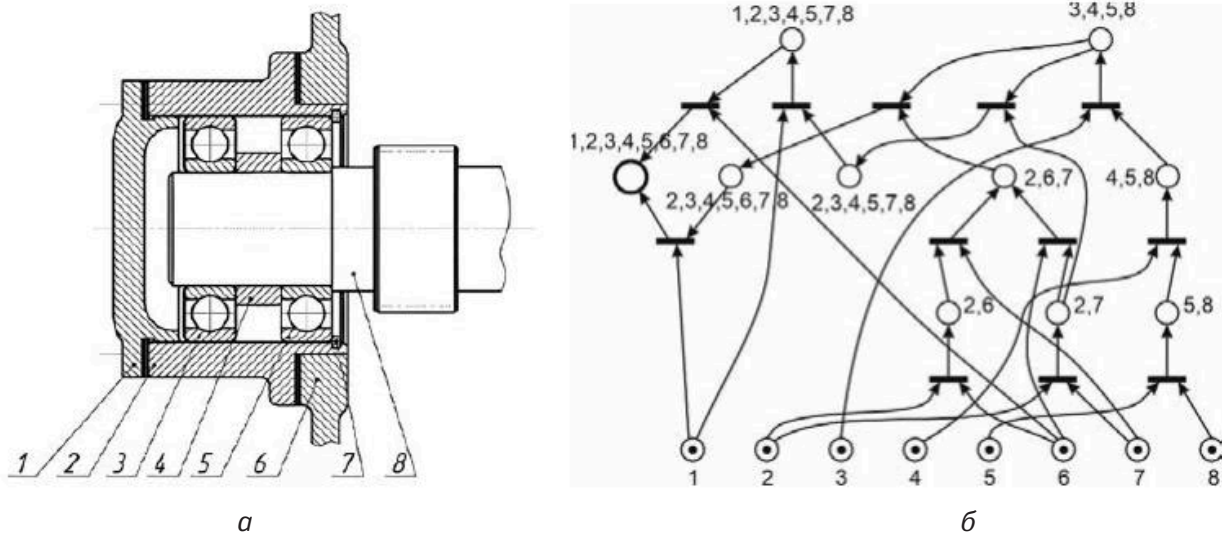
Структуры доминирования и безразличия обеспечивают необходимую формализацию отношений, позволяя применять их в теории принятия решений. Эквивалентность разбивает множество деталей на классы, что упрощает анализ сборочных единиц.

Сетевые модели. В статье [7] предложены различные сетевые модели для моделирования структурных свойств технических систем и описания основных и вспомогательных технологических операций: сборки, разборки, контроля, контроля, испытаний, пригонки и др.

В работе [8] обсуждаются различные модификации сетей Петри, которые используются для моделирования процессов взаимодействия между компонентами сложных изделий. Кроме того, рассматриваются методы синтеза сетей на основе множества структурных моделей изделия и взаимодействие экспертных систем с сетевыми моделями. Важно отметить и очевидный недостаток сетевых моделей: даже для относительно простых изделий, состоящих из нескольких десятков деталей, сеть Петри может включать несколько тысяч позиций и переходов, что существенно усложняет их обработку.

Исследование [9] посвящено комбинаторным методам декомпозиции сложных изделий. На примере частичной разборки редуктора в статье приводится подробное описание составления сети Петри, последующего анализа и выбора оптимальной декомпозиции. На рисунке представлены сборочные детали узла крепления вала редуктора и соответствующая разборочному про-

цессу сеть Петри с изначальной разметкой. Цифрами на рисунке *а* обозначены детали вала редуктора, а на рисунке *б* — фишки, определяющие текущее состояние сборочного процесса. Промежуточные состояния сборки в сети Петри определяют сборочные узлы, состоящие из нескольких деталей.



Узел крепления вала редуктора:

а — сборочные детали; *б* — сеть Петри и ее начальная разметка

Для более эффективного моделирования передачи усилий в сборке и разборке предлагается применение сети силовых потоков. Данная сеть строится в соответствии с заранее заданным направлением разборки, а ее структура повторяет граф связей изделия. Ориентация дуг в этой сети определяется направлением разборки, при этом каждой дуге присваивается значение, равное минимальному усилию, необходимому для разрыва соответствующего механического соединения. Эти преобразования позволяют трансформировать граф связей в потоковую сеть.

Согласно классической теореме Форда — Фалкерсона, максимальный поток, который может пройти через сеть, равен пропускной способности минимального разреза. Для нахождения минимальных разрезов применяется алгоритм расстановки пометок, что позволяет получить компоненты связности графа, которые, полученные при удалении ребер, представляют собой структурные описания сборочных единиц с заданными свойствами.

В работе [10] представлена модель, описывающая как изделие, так и действия сборочного робота по его сборке и разборке, с использованием языка нечетких сетей Петри.

Анализ применения сетевых моделей в автоматизации конструкторского и технологического проектирования показал следующее.

При небольшом числе деталей и операций сети Петри обеспечивают наглядное представление процессов сборки и/или разборки изделия. Это помогает более глубокой аналитике и пониманию взаимодействия между компо-

нентами системы. Данное представление помогает выявить проектные ошибки и слабые проектные решения.

Возможность учитывать параллельные и конкурентные действия в сети Петри позволяет моделировать сложные системы с множеством взаимодействующих элементов, что делает этот подход особенно ценным для проектирования высокотехнологичных изделий.

Структурное моделирование при помощи сетей Петри имеет очевидное ограничение на размеры изделия. Если число деталей и комплектующих превышает несколько десятков, то сеть становится чрезвычайно громоздкой. Что существенно усложняет ее синтез, хранение и обработку.

В итоге, использование сетей Петри для моделирования процессов сборки изделий открывает широкие перспективы для улучшения производственных процессов. Благодаря изучению структуры предпочтений и применению теории отношений, можно значительно повысить эффективность сборочных операций и оптимизировать взаимодействие между компонентами.

Заключение. Разбиение сложного изделия на сборочные единицы — это важное проектное решение, которое влияет на технические и эксплуатационные параметры машины или прибора, а также — на экономические характеристики производства. Сборочная декомпозиция зависит прежде всего от структурных и геометрических свойств изделия.

Рассмотрены методы структурного моделирования сложных технических систем: алгебраические и сетевые. Алгебраические модели принятия решений позволяют использовать комплексный подход к проектированию. Они дают математическое описание последовательности сборки/разборки изделия и его разбиение на сборочные единицы в единых терминах.

Сети Петри, как часть этих моделей, играют важную роль в визуализации и анализе процессов, позволяя выявлять узкие места и возможности для оптимизации. Возможность моделирования параллельных и конкурентных действий делает эти сети особенно ценными для проектов с высокой сложностью, а современные исследования направлены на автоматизацию и упрощение их применения в процессе проектирования. Это открывает новые горизонты в разработке высокотехнологичных изделий.

Тем не менее стоит отметить и недостатки сетей Петри, такие как их громоздкость и трудоемкость в анализе, что может затруднить их использование на практике. Несмотря на это, применение моделей принятия решений в сочетании с сетями Петри и анализом структуры предпочтений открывает широкие перспективы для оптимизации производственных процессов и повышения общей эффективности сборочных операций.

Литература

- [1] Божко А.Н. Моделирование процессов разборки сложных изделий. *Компьютерные исследования и моделирование*, 2022, т. 14, № 3, с. 525–537.
- [2] Zussman E., Scholz-Reiter B., Scharke H. Modeling and planning of disassembly processes. *Proceedings of the IFIP WG5. 3 international conference on Life-cycle modelling for innovative products and processes*, 1996, pp. 221–232.

- [3] Zussman E., Zhou M.C., Caudill R. Disassembly Petri net approach to modeling and planning disassembly processes of electronic products. Proceedings of the 1998 IEEE International Symposium on Electronics and the Environment. ISEE-1998, 1998, pp. 331–336.
- [4] Юдин Д.Б. *Вычислительные методы теории принятия решений*. Москва, Наука, 1989.
- [5] Божко А.Н. и др. Принятия рациональных решений при проектировании сборочных схем. *Машиностроение и компьютерные технологии*, 2012, № 10, с. 365–384.
- [6] Орлов А.И. *Организационно-экономическое моделирование: теория принятия решений*. Москва, Издательство «Проспект», 2014.
- [7] Whitney D.E. Mechanical assemblies: their design, manufacture, and role in product development. New York, Oxford University Press, 2024, vol. 1, 517 p.
- [8] Zha X.F., Lim S.Y.E. Assembly/disassembly task planning and simulation using expert Petri nets. *International Journal of Production Research*, 2000, vol. 38, no. 15, pp. 3639–3676.
- [9] Божко А.Н. Комбинаторные модели для сборки и декомпозиции изделий. *Машиностроение и компьютерные технологии*, 2015, № 10, с. 356–373. <https://doi.org/10.7463/1015.0817524>
- [10] Cao T., Sanderson A.C. Task sequence planning using fuzzy Petri nets. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 1995, vol. 25, no. 5, pp. 755–768.

Review of innovative logical - structural methods for automated synthesis of assembly decompositions of complex products

Barsukov Dmitriy Alexandrovich

BMSTU, Moscow, Russia

The article presents an overview of current and innovative approaches to automated synthesis of assembly decompositions in the technological preparation of production of complex technical products. The paper considers modern methods that implement a systematic approach to creating optimal decompositions. Particular attention is paid to decision-making models and network models.

Keywords: CAD, automated synthesis, assembly decomposition, decision-making models, network models