

На правах рукописи

Божко Аркадий Николаевич

**Автоматизированный структурный анализ и синтез
проектных решений в технической подготовке сборочного
производства сложных изделий**

05.13.12 – Системы автоматизации проектирования
(в технических системах)

Автореферат на соискание ученой степени
доктора технических наук

Москва – 2019

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» (МГТУ им. Н.Э.Баумана)..

Официальные оппоненты: Толок Алексей Вячеславович, д.т.н., профессор, главный научный сотрудник Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института проблем управления В.А. Трапезникова Российской академии наук, заведующий лабораторией «Компьютерная графика»

Бурдо Георгий Борисович, д.т.н., профессор, заведующий кафедрой «Технология и автоматизация машиностроения» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Тверской государственный технический университет»

Куликов Дмитрий Дмитриевич, д.т.н., профессор, профессор кафедры технологии приборостроения Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики»

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное учреждение науки Институт конструкторско-технологической информатики Российской академии наук

Защита состоится 22 мая 2019г. в 14-00 на заседании объединенного диссертационного совета при МАИ и МГТУ им. Н.Э. Баумана по адресу: 105005, Москва, ул. 2-я Бауманская, д.5, стр.1, зал Ученого совета ГУК.

С диссертацией можно ознакомиться на сайте www.bmstu.ru и в библиотеке МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Отзывы на автореферат отправлять по адресу 105005, Москва, ул. 2-я Бауманская, д.5, стр.1, ученому секретарю диссертационного совета Д 999.216.02.

Автореферат разослан «___» 2019 г.

Ученый секретарь
д.т.н., доцент

А.Н. Алфимцев

Общая характеристика работы

Актуальность диссертационного исследования. Сборка промышленных изделий – это один из сложных и ответственных технологических этапов современного дискретного производства. От качества сборочных работ в значительной степени зависят потребительские или тактико-технические свойства изделия.

Высокой сложностью отличается и технологическая подготовка сборочного производства. Длительность разработки операционной технологии сборки сравнима со сроком морального износа некоторых классов изделий, а в отдельных случаях может превышать сроки проектирования и конструирования машины или прибора. Для современных сборочных производств, в которых используются роботы или сборочные автоматы, технологические инструкции должны быть проработаны на максимальную глубину, вплоть до отдельных рабочих ходов, что делает технологическую подготовку таких процессов чрезвычайно трудоемкой и длительной.

Для изделий средней и высокой сложности процесс сборки разрабатывается перед технологическими процессами обработки деталей. В процессе синтеза сборочных операций и переходов выявляются возможные проектные ошибки и выполняется верификация конструкции, а также уточняются технические требования к процессам изготовления деталей. Технологическая подготовка сборочного производства является концентратором связей между конструкторскими и технологическими стадиями жизненного цикла. В конце прошлого века появились и в наше время активно развиваются инженерные парадигмы Design for manufacturing, Design for assembly, Design for disassembly, Concurrent engineering и др., согласно которым необходима согласованная и параллельная работа конструкторов и технологов, а качество конструкторских решений следует оценивать, в том числе, и по критериям эффективности сборки, разборки изделия и разбиения на сборочные единицы (СЕ).

Современное дискретное промышленное производство отличается постоянным увеличением сложности продукции и сокращением сроков технической подготовки. Это глубокое системное противоречие невозможно разрешить без систематического использования средств автоматизации проектирования и поддержки принятия рациональных конструкторских и технологических решений в рамках интегрированных CAD/CAM/CAE-систем.

Повышение эффективности технологической подготовки сборочного производства и успешная реализация современных парадигм проектирования в значительной степени зависят от качества математического обеспечения CAD/CAM/CAE-систем. Для этого требуется разработать математические модели изделия и методы принятия проектных решений, которые корректно описывают структурные и геометрические свойства конструкции и на ранних этапах технической подготовки производства позволяют прогнозировать поведение технической системы в процессе сборки, разборки и разбиения на сборочные единицы. Поэтому тема диссертационной работы является безусловно важной и актуальной.

Целями работы являются повышение эффективности автоматизированного проектирования сложных технических систем и разработка математического обеспечения интегрированных систем проектирования и технологической подготовки производства.

Для достижения поставленных целей необходимо решить следующие задачи:

1. Исследовать фундаментальные свойства сборочных процессов и операций и их зависимость от структурных, геометрических и размерных характеристик сложной технической системы.

2. Формализовать отношение базирования и разработать математическую модель сборочной структуры изделия, которая корректно описывает взаимную координацию деталей, реализуемую при помощи механических связей изделия.

3. Предложить математические описания основных проектных решений сборочного производства: последовательности сборки и декомпозиции изделия на сборочные единицы.

4. Формализовать ограничения, которые конструкторские размерные цепи накладывают на последовательности сборки и разбиения изделия на сборочные единицы.

5. Разработать методику структурного анализа, которая на ранних стадиях технической подготовки производства позволяет оценить качество механической структуры, идентифицировать структурные дефекты и дать обоснованные рекомендации по изменению проекта изделия.

6. Разработать метод синтеза множества допустимых последовательностей сборки изделия, образующих совокупность допустимых альтернатив в процессе последовательного принятия рациональных проектных решений.

7. Исследовать закономерности принятия решений при генерации разбиений изделия на сборочные единицы и разработать метод автоматизированного синтеза рациональных декомпозиций.

8. Предложить способ согласования структурных, геометрических и размерных ограничений, которые накладывает конструкция изделия на допустимые проектные решения сборочного производства.

9. Предложить рациональные стратегии анализа геометрических ограничений, минимизирующие число прямых проверок на геометрическую разрешимость при сборке сложных технических систем.

10. Создать программный комплекс, реализующий разработанные модели, методы и алгоритмы.

Научная новизна. В диссертационной работе получены следующие основные результаты, обладающие научной новизной:

1. Разработаны гиперсетевая и гиперграфовая модели структур сложных изделий, корректно описывающие базирование по конструкторским базам, которое обеспечивает координацию деталей в изделии и реализуется при помощи позиционных механических связей. Научная новизна моделей заключается в следующем:

- базирование деталей при сборке рассматривается как отношение переменной местности;
- корректно описана связь между механической и сборочной структурами изделия.

2. Разработана методика автоматизированного анализа сборочной структуры сложных технических систем, позволяющая на ранних этапах технической подготовки производства оценить качество структуры, идентифицировать структурные дефекты и дать обоснованные рекомендации по их исправлению.

3. Разработан метод автоматизированного синтеза последовательности сборки изделия, все операции которой удовлетворяют свойствам секвенциальности, когерентности и геометрической разрешимости.

4. Разработан метод автоматизированной декомпозиции изделия на сборочные единицы, который позволяет синтезировать многоуровневые иерархические разбиения изделия, оптимальные по различным числовым и структурным критериям.

5. Предложена теоретико-игровая модель геометрической разрешимости, в которой задача анализа геометрических ограничений на перемещения деталей в пространстве собираемого изделия поставлена как неантагонистическая игра лица принимающего решение и природы по окрашиванию вершин упорядоченного множества.

6. На основе теоретико-игровой формализации разработан метод автоматизированного анализа геометрической разрешимости, позволяющий минимизировать число прямых геометрических проверок при помощи алгоритмов анализа столкновений, планирования перемещений или сеансов системы виртуальной реальности в процессе автоматизированного синтеза последовательности сборки и декомпозиции изделия на сборочные единицы.

7. Разработана теоретико-решеточная модель изделия, позволяющая исследовать и согласовать структурные, размерные и геометрические ограничения, которые накладывает конструкция на допустимые проектные решения сборочного передела.

8. На основе теоретико-решеточной модели изделия разработаны точные и приближенные процедуры автоматизированного анализа геометрических связей конструкции, позволяющие найти собираемые фрагменты изделия, свободные от геометрических препятствий.

9. Предложен комплексный метод автоматизированного синтеза проектных решений технической подготовки сборочного производства, основанный на поиске допустимых разрезаний гиперграфовой модели сборочной структуры изделия. Множество всех таких разрезаний, представленное в виде И – ИЛИ-дерева, является комбинаторным пространством, содержащим все связные, координированные конструктивные фрагменты: узлы, сборочные единицы, временные сборочные единицы, состояния изделия в процессе сборки/разборки, тестовые конфигурации для проверки на геометрическую разрешимость и др.

Теоретическая значимость. Теоретическая значимость диссертации состоит в разработке научных основ и математического аппарата для структурного анализа технических систем и синтеза основных проектных решений сборочного производства (последовательности сборки и декомпозиции изделия на сборочные единицы).

Практическая ценность. Практическая ценность разработанных в диссертации моделей и методов заключается в том, что они позволяют сократить сроки проектирования, повысить качество проектных решений, выполнить глубокий структурный анализ и структурную оптимизацию конструкции на ранних стадиях технической подготовки производства. Предложенные методы и модели могут служить основой математического обеспечения подсистем структурного анализа и синтеза процессов сборки. Данные подсистемы могут быть использованы в составе современных интегрированных CAD/CAM/CAE-систем, а также в автономных системах технологической подготовки и поддержки принятия рациональных проектных решений.

Методы исследования. Теоретические исследования выполнены с использованием методов: теории принятия решений, теории графов и гиперграфов, исследования операций и математического программирования, общей теории решеток, комбинаторного анализа, математической теории игр. В практических исследованиях были использованы методы структурного анализа, а также технологии визуального, структурного, и объектно-ориентированного программирования.

Положения, выносимые на защиту:

1. Гиперсетевая и гиперграфовая модели структуры технической системы.
2. Методика структурного анализа сложных изделий.
3. Метод автоматизированного синтеза секвенциональных, когерентных и геометрически разрешимых последовательностей сборки сложных технических систем.
4. Метод автоматизированного синтеза рациональных декомпозиций изделия на сборочные единицы.
5. Теоретико-игровая модель геометрической разрешимости при сборке сложных технических систем.
6. Теоретико-решеточная модель изделия.
7. Метод согласования структурных, геометрических и размерных ограничений, основанный на теоретико-решеточной модели изделия.
8. Стратегии анализа геометрической разрешимости, позволяющие минимизировать число прямых геометрических проверок при помощи трудоемких алгоритмов анализа столкновений или планирования перемещений.
9. Комплексный метод автоматизированного синтеза проектных решений технической подготовки сборочного производства, основанный на разрезаниях гиперграфа и генерации комбинаторного пространства всех разрезаний.

Достоверность результатов работы подтверждается:

- корректным применением математического аппарата;

- совокупностью доказанных теорем о стягивании и разрезании гиперграфов, решеточных структурах, разрешенных путях, d -элементах и окрасках упорядоченных множеств;
- аprobацией разработанных моделей и методов на большом массиве реальных конструкций;
- разработкой и опытной эксплуатацией программного обеспечения, в котором реализованы основные модели изделия и методы автоматизированного проектирования, предложенные в диссертации.

Апробация работы. Апробация работы. Результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на 29-ой Международной научной конференции «Математические методы в технике и технологиях – ММТТ-29» (Санкт-Петербург, 2016), 2-ой Международной научно-практической конференции «Научные исследования в области технических наук» (Саратов, 2017), 30-ой Международной научной конференции «Математические методы в технике и технологиях – ММТТ-30» (Минск, 2017), Всероссийской научной конференции с международным участием «Моделирование коэволюции природы и общества: проблемы и опыт. К 100-летию со дня рождения академика Н.Н. Моисеева» (Москва, 2017), XVII-ой международной научно-практической конференции «Системы проектирования, технологической подготовки производства и управления этапами жизненного цикла промышленного продукта (CAD/CAM/PDM-2017)» (Москва, 2017), 31-ой Международной научной конференции «Математические методы в технике и технологиях – ММТТ-31» (Санкт-Петербург, 2018), Всероссийской научно-практической конференции «Системы управления полным жизненным циклом высокотехнологичной продукции в машиностроении: новые источники роста» (Москва, 2018), XLVII Международной конференции «Информационные технологии в науке, образовании и управлении» (п. Гурзуф, 2018), XIX Международной научной конференции «Системы компьютерной математики и их приложения (СКМП-2018)» (г. Смоленск, 2018), Международной научно-технической конференции «Автоматизация» (RusAutoCon-2018) (Сочи, 2018), 13th International Symposium «Intelligent Systems – 2018» (INTEL'S18) (Санкт-Петербург, 2018), семинаре института машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук (ИМАШ РАН) (Москва, 2018), Семинаре фирмы Аскон – разработчика систем: Компас-3D, Компас-График, Лоцман:PLM (Коломна, 2018), семинаре института конструкторско-технологической информатики Российской академии наук (ИКТИ РАН) (Москва, 2018), семинарах института проблем управления им. В.А. Трапезникова Российской академии наук (ИПУ РАН) (Москва, 2017, 2018) и др.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 43 печатных работ, в том числе 30 статей – в изданиях, входящих в перечень ВАК РФ, и 2 статьи – в изданиях, индексированном WoS и Scopus.

Личный вклад автора. Все теоретические результаты (модели, методы, алгоритмы, выводы и рекомендации), изложенные в диссертации, получены лично автором. Несколько работ, выполненных в соавторстве, посвящены конкретизации теоретических результатов и их применению для решения прикладных задач. Про-

граммные средства, реализующие основные результаты диссертации, разработаны под руководством или при непосредственном участии автора.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, шести глав, заключения и списка используемых источников, изложенных на 410 страницах основного текста. В диссертацию входит приложение объемом 32 страницы. Список используемых источников содержит 316 наименований.

Основное содержание работы

Во введении сформулированы цели и задачи диссертационного исследования, приведено краткое обоснование актуальности работы, показана научная новизна и практическая значимость, даны сведения об апробации и внедрении результатов диссертации.

Содержание главы 1

В главе 1 рассмотрены особенности современного сборочного производства, приведен анализ актуальных исследований и разработок, посвященных автоматизации проектирования сборочных процессов, и дано развернутое обоснование актуальности работы.

Проектирование процессов сборки – это один из сложных и ответственных этапов технической подготовки современного дискретного производства. Длительность разработки операционной технологии сборки сравнима со сроком морального износа некоторых классов изделий, а в отдельных случаях может превышать сроки проектирования и конструирования машины или прибора. Для современных сборочных производств, в которых используются роботы или сборочные автоматы, технологические инструкции должны быть проработаны на максимальную глубину, вплоть до отдельных рабочих ходов, что делает технологическую подготовку таких процессов чрезвычайно трудоемкой.

Технологическая подготовка сборочного производства является концентриатором прямых и обратных связей между конструкторскими и технологическими стадиями жизненного цикла. Для изделий средней и высокой сложности процесс сборки разрабатывается до технологических процессов обработки деталей. В процессе синтеза сборочных операций и переходов выявляются возможные проектные ошибки, верифицируется конструкция, а также уточняются технические требования к процессам изготовления деталей.

В конце прошлого века появились и в наше время активно развиваются инженерные парадигмы Concurrent engineering, Design for manufacturing, Design for assembly, Design for disassembly и др., согласно которым при проектировании сложного изделия необходима согласованная и параллельная работа конструкторов и технологов, а качество конструкторских решений следует оценивать, в том числе, по критериям эффективности сборки, разборки изделия и разбиения на сборочные единицы.

Современное дискретное промышленное производство отличается постоянным увеличением сложности продукции и сокращением сроков технической под-

готовки. Это глубокое системное противоречие невозможно разрешить без использования средств автоматизации проектирования и поддержки принятия рациональных конструкторских и технологических решений в рамках интегрированных CAD/CAM/CAE-систем.

Различные аспекты сложной проблемы автоматизации проектирования сборочных процессов обсуждались в работах следующих исследователей: В.В. Павлов, А.А. Гусев, О.А. Дащенко, В.Г. Осетров, Д.А. Своятыцкий, А.Г. Схицладзе, A. Bourjault, T. De Fazio, L. Homem de Mello, A. Lambert, J-C. Latombe, S. Lee, T. Lozano-Rerez, A. Sanderson, D. Whitney, R. Wilson, J. Wolter и др.

Классификация моделей и методов СААР приведена на Рис. 1.



Рис. 1. Классификация моделей и методов автоматизированного проектирования сборочных процессов

Методы искусственного интеллекта делятся на две основные группы: методы, основанные на правилах, и методы, основанные на знаниях. В методах первой группы конструктивно-технологические связи, влияющие на последовательность сборки изделия, описывают как отношения предшествования (Precedence relations) и представляют в виде множества прикладных правил и аксиом в формализме выбранной логической системы (дескриптивной, пропозициональной, модальной, темпоральной и др.). Последовательность сборки извлекают из доказательства (или опровержения) некоторого целевого утверждения.

Этот подход не предлагает никаких способов обмена знаниями и их накопления. Для каждого нового изделия система прикладных логических правил и аксиом должна быть сформирована заново. Кроме того, прикладные логические системы

не располагают средствами идентификации полноты и непротиворечивости системы правил и аксиом. Вывод в логических системах базируется на различных вариантах поиска с возвратом (Backtracking), даже самые современные версии которого (например, Conflict-directed backtracking или Intelligent backtracking) требуют значительных вычислительных ресурсов.

В основе методов, основанных на экспертных знаниях о предметной области, лежат закономерности принятия рациональных проектных решений, представленные на одном из языков искусственного интеллекта и организованные в форме прикладной базы знаний. Чаще всего для этого используются различные варианты атрибутивных графов, семантических сетей или сетей Петри. Главным источником знаний об изделии и технологической системы является эксперт.

Опыт эксплуатации экспертных систем показал, что пока не создан эффективный интерфейс между экспертом, инженером по знаниям и программистом. Поэтому процедура создания баз знаний отличается высокой трудоемкостью и невысокой надежностью. Составление базы знаний для класса или группы подобных изделий – мероприятие более оправданное с экономической точки зрения. Однако пока не получены надежные метрики, которые с высокой вероятностью успеха позволяют адресовать изделие к множеству аналогов, имеющих одинаковый или сходный процесс сборки. Кроме того, выбор подхода, основанного на инженерии знаний, фиксирует текущее состояние предметной области. Это затрудняет формализацию объекта проектирования, поиск закономерностей принятия проектных решений и выбор оптимальных решений.

Методы геометрического вывода (Geometric reasoning) посвящены анализу и моделированию геометрических препятствий при сборке. В публикациях по СААР данная проблема называется геометрической разрешимостью (геометрическим доступом). Геометрическая разрешимость – это важнейшее конструктивное условие собираемости изделия, без выполнения которого не может быть реализована ни одна последовательность сборки или декомпозиция изделия на сборочные единицы. Однако задача синтеза рационального плана сборки не может быть решена как исключительно геометрическая задача. Качество проектных решений при сборке зависит от большого числа других конструктивно-технологических факторов, например: механической структуры изделия, системы конструкторских размерных цепей, способа реализации соединений и др. Поэтому методы геометрического вывода могут быть использованы только как вспомогательное средство для верификации проектных решений.

В методах планирования перемещений (Motion planning) задача сборки становится как задача поиска свободной от столкновений траектории точки, которая представляет монтируемую деталь в многомерном конфигурационном пространстве собираемого изделия и сборочного робота. Методы данной группы учитывают геометрические аспекты задачи, а также устойчивость и когерентность собранных конфигураций. Они не принимают во внимание многочисленные технологические и конструктивные ограничения, которые влияют на допустимость и рациональность проектных решений. Размерность конфигурационного пространства быстро

растет с увеличением числа деталей. Поэтому сборку реальных конструкций описывают конфигурационные пространства очень высокой размерности, что влечет за собой большие вычислительные затраты. Методы этого класса целесообразно использовать как вспомогательное средство для синтеза сложных траекторий движения деталей при сборке изделия в заданной последовательности.

Методы оптимизации. Исследования, которые относятся к группе методов оптимизации, посвящены вычислительным аспектам СААР. В работах данного направления рассматривается задача поиска рационального плана сборки из множества заданных последовательностей сборки изделия. Не ставится и не решается центральная проблема теории автоматизированного проектирования сборочных процессов – построение моделей изделия и технологической системы, которые содержат необходимую информацию для синтеза допустимых и рациональных проектных решений.

В комбинаторную группу входят модели и методы, где изделие рассматривается как совокупность элементов (деталей, поверхностей, геометрических примитивов и др.), на которых заданы отношения различной физической природы (геометрические, механические, размерные, кинематические и др.). Большинство моделей изделия из данной группы являются дескриптивными. Они не имеют deductive выразительной силы, присущей математическим моделям, а являются всего лишь формами, готовыми принять любое содержание. Вся подготовка исходной информации, необходимой для синтеза проектных решений по дескриптивным моделям, возлагается на эксперта. Это значит, что процедура подготовки таких моделей отличается высокой стоимостью и длительностью, а сами модели плохо защищены от ошибок. К дескриптивным приближаются методы и модели, в которых основной целью является выявление и формализация скрытой структуры предпочтений (Precedence relations), которую определяет конструкция на множестве своих деталей. В подавляющем большинстве работ этого направления решается ограниченная задача выработки адекватного формализма или языка для описания структуры предпочтений. В них не ставится проблема автоматического или автоматизированного синтеза структуры предпочтений по трехмерной модели или комплекту конструкторской документации изделия. Поэтому эти модели не могут служить универсальной базой для математического обеспечения СААР-систем.

Развитая методика проектирования комбинаторного типа предложена L. Homem de Mello и A. Sanderson. В ее основе лежит процедура, основанная на разрезании графа связей и проверке конструктивных фрагментов на геометрическую разрешимость. Однако график связей моделирует только механические контакты между деталями. В общем случае, эта структура не дает полного описания отношения базирования, которое координирует детали в составе изделия. Поэтому разрезание графа на может порождать некоординированные и неустойчивые подмножества деталей, которые не могут существовать как независимые сборочные единицы.

В интерактивных методах основные проектные задачи решает эксперт, а вычислительная система выполняет подготовительные и сервисные функции. В ме-

тодах экспертной группы ЛПР должен выбрать последовательность реализации механических связей изделия, отвечая на вопросы, которые предлагает система проектирования. В методах виртуальной реальности ЛПР выполняет прототипирование процесса сборки или разборки трехмерной компьютерной модели изделия в системе виртуальной реальности (Virtual reality).

Анализ особенностей сборочного производства и работ в области СААР позволяет сделать следующие основные выводы:

1. Способность изделия собираться в заданной последовательности (собираемость) или делиться на независимо собираемые сборочные единицы (расчленяемость) – это свойства, которые закладываются на этапе конструирования, а реализуются на последующих этапах жизненного цикла (технологическое проектирование, сборка, ремонт, контроль, испытания, техническое обслуживание и др.). Множество допустимых альтернатив, которые порождает конструкция изделия, можно использовать как комбинаторное пространство для выбора лучшего варианта по заданным (технологическим, экономическим и пр.) критериям и для структурного анализа и оценки собираемости технической системы. Последовательность сборки и схема декомпозиции изделия на сборочные единицы – это «генетически» связанные проектные решения, существование которых зависит от общих свойств конструкции: механических связей, геометрии и размеров и т.д.

2. Закономерности принятия рациональных решений при сборке изучены недостаточно глубоко, поэтому большинство предложенных моделей изделия и методов принятия проектных решений (за исключением методов планирования перемещений и геометрического вывода) отличаются невысоким уровнем формализации и подразумевают активное участие эксперта как в процессе подготовки исходной информации, так и на ключевой стадии выбора решений. Это влечет за собой высокую трудоемкость, низкую надежность и плохую воспроизводимость результатов автоматизированного проектирования. В методах планирования перемещений и геометрического вывода formalизованы только геометрические свойства изделия и не рассматриваются структурные, размерные и прочие ограничения на проектные решения.

3. Повышение эффективности технической подготовки сборочного производства и успешная реализация современных парадигм проектирования в значительной степени зависят от качества математического обеспечения интегрированных CAD/CAM/CAE-систем. Для этого требуется разработать математические модели изделия и методы принятия проектных решений, которые корректно описывают структурные и геометрические свойства конструкции и на ранних этапах технической подготовки производства позволяют прогнозировать поведение технической системы в процессе сборки, разборки и разбиения на сборочные единицы. Поэтому тема диссертационной работы является безусловно важной и актуальной.

Содержание главы 2

Вторая глава посвящена разработке математических моделей, описывающих структурные свойства изделия, и методам генерации проектных решений сборочного передела.

Фундаментальные свойства сборочных операций. Для разработки математических моделей, которые корректно описывают поведение изделия в процессе сборки, необходимо объективировать и точно определить фундаментальные свойства сборочных процессов и операций.

Определение 1. Сборочная операция называется *n*-ручной (*n*-handed), если для ее реализации требуются *n* исполнительных органов, которые выполняют одновременные независимые перемещения составных частей конструкции.

Неподвижная позиция элемента конструкции считается частным случаем перемещения, а приспособление или стенд, которые используются для его закрепления, – исполнительным органом.

На Рис. 2 изображена конструкция из трех деталей А, Б, В, которую можно собрать при помощи трех одновременных и согласованных перемещений составных частей, реализуемых посредством трех независимых исполнительных органов (все перемещения выполняются на плоскости).

Определение 2. Сборочная операция называется *секвенциальной* (sequential, 2-ручной), если для ее выполнения требуется два исполнительных органа.

Определение 3. *N*-ручная сборочная операция называется монотонной (monotonous), если все необходимые движения деталей (сборочных единиц) выполняются без смены исполнительных органов. В противном случае сборочная операция является немонотонной.

Пусть конструкция из деталей А, Б, В, показанная на Рис. 3, собирается при помощи двух исполнительных органов, и деталь А закреплена на рабочем столе. Чтобы получить целевую конфигурацию деталь В следует поместить в полость детали Б. После этого подсборку Б + В нужно установить на деталь А и переместить деталь В в служебное положение. Описанная сборочная операция является немонотонной, поскольку в процессе сборки целевой конфигурации происходит смена исполнительных органов.

Определение 4. Сборочная операция называется линейной (linear), если по крайней мере один из собираемых элементов является деталью. Нелинейной (nonlinear) является такая и только такая сборочная операция, в процессе которой соединяются две сборочные единицы.

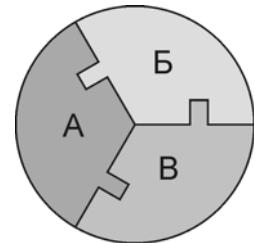


Рис. 2. Пример 3-ручной сборочной операции

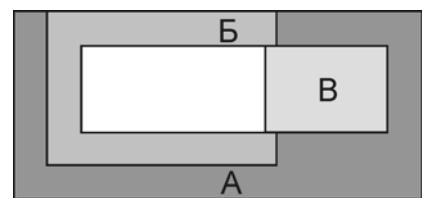


Рис. 3. Пример немонотонной бинарной сборочной операции

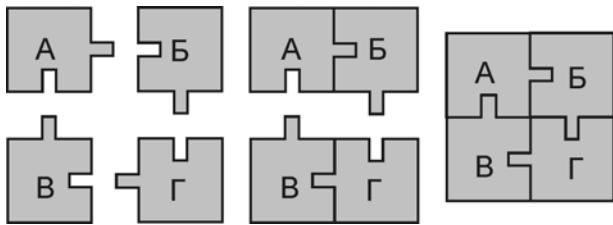


Рис. 4. Пример нелинейной сборки

Все примеры, показанные на Рис. 2 – Рис. 4, собраны при помощи когерентных сборочных операций. В диссертации понятие когерентности обобщено на случай упреждающей координации деталей в операциях косвенного базирования.

Определение 6. Сборочная операция, в процессе которой происходит реализация механических связей или упреждающая координация деталей при помощи размерных связей, называется когерентной.

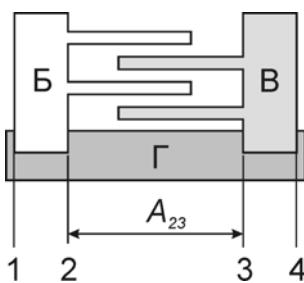


Рис. 5. Пример когерентной операции с косвенным базированием

На Рис. 4 приведен пример конструкции, которая не может быть собрана при помощи линейных сборочных операций.

Определение 5. Сборочная операция, в процессе которой происходит реализация механических связей, называется когерентной (coherent).

Пример когерентной операции, в которой координация достигается реализацией размерной связи, показан на Рис. 5. Для установки деталей Б и В на элемент Г (или наоборот) Б и В должны быть точно позиционированы относительно друг друга. Операция предварительной взаимной координации этих деталей достигается косвенным базированием. Для этого следует выдержать один из горизонтальных размеров, соединяющих поверхности деталей Б и В, например A_{23} .

В диссертации рассматриваются только секвенциальные и когерентные сборочные операции.

Математическая модель структуры изделия. Сборочную структуру изделия опишем при помощи гиперсети $HS = (X, V, R, P, F, W)$, в которой:

- вершины $X = \{x_i\}_{i=1}^n$ представляют детали;
- ветви $v \in V, V = \{v_i\}_{i=1}^q$ описывают механические и размерные связи, которые используются для базирования деталей в составе изделий;
- ребра $r \in R, R = \{r_i\}_{i=1}^m$ представляют полные комплексы сборочных баз (минимальные геометрически определенные группировки деталей);
- отображение $P : V \rightarrow 2^X$ сопоставляет каждой ветви пару деталей, между которыми существует в изделии X связь, то есть $\forall v \in V |P(v)| = 2$. Поэтому первичная сеть $PS = (X, V, P)$ является графом;
- отображение $F : R \rightarrow 2_{PS}^V$ каждому ребру r ставит в соответствие множество связей $F(r) \subseteq V$, которое образует полный комплект баз. Это отображение описывает базы как совокупности механических и размерных связей;

- отображение $W: R \rightarrow 2^{P(F(r))}$ каждому ребру r сопоставляет множество $P(F(r)) \subseteq X$ вершин. Это отображение описывает базы как геометрически определенные группировки деталей.

Первичная сеть $PS = (X, V, P)$ гиперсети HS описывает структуру механических и размерных связей, которые используются для базирования деталей и является графом. Вторичная сеть $WS = (X, R, W)$ моделирует пространственную координацию деталей, которая достигается при помощи механических и размерных связей. Отображение W каждому ребру $r \in R$ ставит в соответствие минимальное подмножество деталей, геометрическое положение которых полностью определено относительно друг друга. Такие группировки могут иметь различную мощность, поэтому $|W(r)| > 1$, и вторичная сеть, в общем случае, представляет собой гиперграф.

На Рис. 6 изображен узел барабана, а на Рис. 7 – гиперсеть HS_d этой простой конструкции. Первичную сеть PS_d образуют все вершины гиперсети и ребра, изображенные сплошными линиями. Гиперребра вторичной сети WS_d показаны пунктирными линиями.

Определение 7. Вторичную сеть $WS = (X, R, W)$ гиперсети HS изделия X назовем гиперграфом связей.

Определение 8. Операцию удаления ребра второй сте-

пени ($r \in R$ и $|W(r)| = 2$) и отождествления граничных вершин этого ребра назовем нормальным стягиванием.

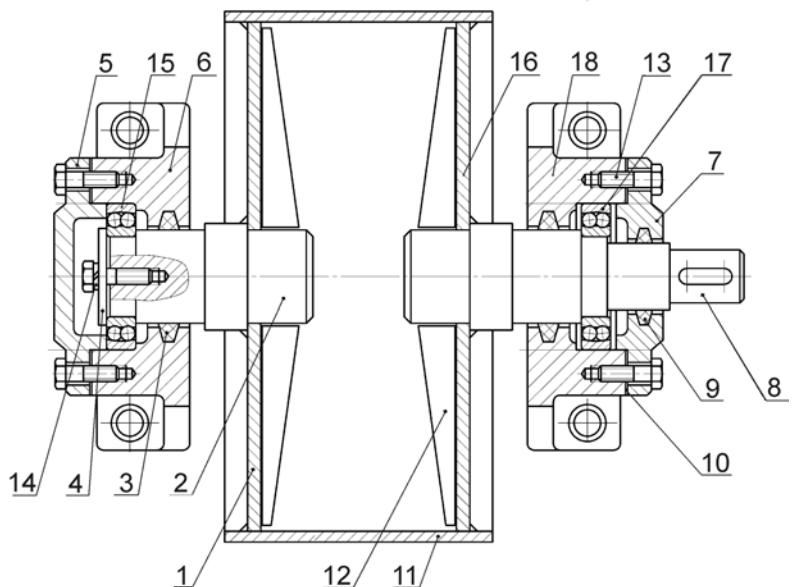


Рис. 6. Узел барабана

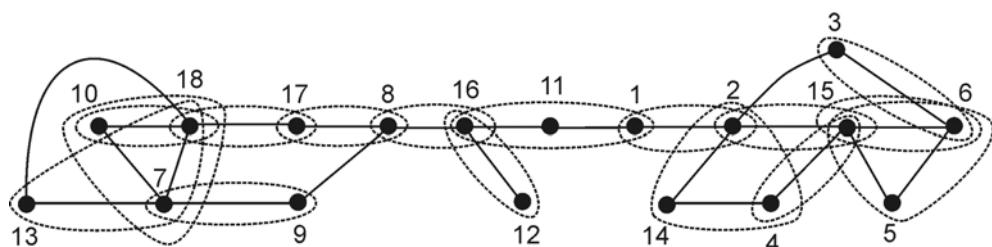


Рис. 7. Гиперсеть HS_d узла барабана

Процесс сборки изделия $X = \{x_i\}_{i=1}^n$ представим в виде последовательности стягиваний $Cont = (WS_1, WS_2, \dots, WS_N)$ гиперграфа $WS = (X, R, W)$, причем для $Cont$ должны выполняться условия:

- $$1. \ WS_1 = WS;$$

2. WS_N представляет собой одновершинный гиперграф без петель и изолированных ребер (точка);
3. Каждое стягивание ребра является нормальным;
4. Для всех $WS_i = (X_i, R_i, W_i)$ и $WS_{i+1} = (X_{i+1}, R_{i+1}, W_{i+1})$, $WS_i, WS_{i+1} \in Cont$, выполняется $|R_i| = |R_{i+1}| + 1$.

Первое условие означает, что сборка начинается со стартового состояния, в котором ни одна связь не реализована. Второе условие описывает финальное состояние сборочного процесса, когда изделие собрано и все связи реализованы. Третье условие формализует требование секвенциальности и когерентности. Последнее условие описывает сборочную операцию, которая выполняется без перебазирования.

Определение 9. Гиперграф, для которого существует последовательность нормальных стягиваний, переводящая его в одновершинный гиперграф без петель и изолированных ребер, назовем *s*-гиперграфом.

S-гиперграфы служат математическими моделями структур изделий, которые можно собрать при помощи последовательности секвенциальных и когерентных сборочных операций.

Необходимые и достаточные условия стягиваемости. В диссертации доказаны несколько теорем о необходимых и достаточных условиях стягиваемости гиперграфов. Основной результат дает следующая теорема.

Теорема 1. Если гиперграф $WS = (X, R, W)$ стягивается, то:

1. Среди ребер WS существует по крайне мере одно ребро степени 2.
2. Гиперграф является связным.
3. Число вершин $|X|$ и число ребер $|R|$ гиперграфа WS удовлетворяют соотношению $|X| = |R| + 1$ (линейное соотношение).

Теорема 1 согласуется с интуицией человека, и ее справедливость можно обосновать в содержательных терминах. Предположим, что изделие собирается без предварительного разбиения на сборочные единицы. Первая деталь базируется в сборочное приспособление или устанавливается на стенд, то есть она не нуждается во внутренних конструкторских базах. Для установки каждой последующей детали требуется ровно один комплект конструкторских баз, то есть общее число этих комплектов на единицу меньше числа деталей.

Если $|X| > |R| + 1$, то гиперграф превращается в плохо скоординированную структуру. Сборка изделий с таким соотношением элементов и связей невозможна по причине геометрической недоопределенности. Если $|X| < |R| + 1$, то появляются избыточные связи, что служит признаком перебазирования.

Данные соотношения можно использовать для структурного анализа нового проекта. Они позволяют идентифицировать структурные дефекты (структурную несобираемость и перебазирование) на самых ранних этапах конструирования.

В общем случае, теорема 1 дает только необходимые, но не достаточные условия стягиваемости, что подтверждается примерами, приведенными на Рис. 8.

Легко видеть, что после стягивания единственного ребра второй степени каждый из этих образцов превратится в «двойной треугольник», который не может быть преобразован в точку. Существуют и другие примеры нестягиваемых гиперграфов.

В диссертации доказаны несколько теорем о достаточных условиях стягиваемости гиперграфов в разных ситуациях. Приведем три самых важных результата.

Теорема 2. Пусть $WS = (X, R, W)$ – s -гиперграф, а $WS_1 = (X_1, R_1, W_1)$, $WS_1 \subseteq WS$ – связный порожденный подграф. Если для WS_1 выполняется линейное соотношение, то есть $|X_1| = |R_1| + 1$, то он является s -гиперграфом.

Теорема 3. Пусть $WS = (X, R, W)$ – s -гиперграф. Любой подграф $WS_1 = (X_1, R_1, W)$, $WS \subseteq WS_1$, который включает в себя хотя бы одно ребро $r \in R_1$, $|W(r)| = 2$ и для которого справедливо линейное ограничение $|X_1| = |R_1| + 1$, является связным, а значит и стягиваемым.

Теорема 4. Пусть $WS = (X, R, W)$ – s -гиперграф, а $WS_1 = (X_1, R_1)$ и $WS_2 = (X_2, R_2)$ – порожденные s -подграфы, $WS_i = [X_i]$, $WS_i \subseteq WS$, $i = 1, 2$. Если $X_1 \cap X_2 \neq \emptyset$, то подграф $[X_1 \cap X_2] = (X_{\cap}, R_{\cap})$, порожденный в WS не пустым пересечением X_1 и X_2 , является стягиваемым.

Данные теоремы раскрывают «устройство» стягиваемых гиперграфов и дают простые критерии для проверки собираемости составных частей изделия.

Существуют изделия, которые собирают без разбиения на сборочные единицы. Сборочный процесс такого типа называется линейным (определение 4). Линейная сборка применяется для особо точных и прецизионных приборов, автоматическая и роботизированная сборка часто выполняется по линейному принципу. В диссертации доказана теорема о необходимых и достаточных условиях линейной стягиваемости.

Теорема 5. Гиперграф $WS = (X, R, W)$, удовлетворяющий условиям теоремы 1, является линейно стягиваемым тогда и только тогда, когда WS не содержит подграфа, все степени вершин которого строго больше единицы ($|W^{-1}(x)| \geq 2$).

Эта теорема дает эффективный критерий для проверки линейной собираемости изделий.

Моделирование разбиений на сборочные единицы. Аппарат s -гиперграфов корректно описывает структуры собираемых технических объектов. Пусть некоторому изделию сопоставлен s -гиперграф $WS = (X, R, W)$. Любая часть изделия, которая собирается независимо, может быть представлена в виде s -подграфа WS . В предложенных терминах разбиение изделия на сборочные единицы – это разрезание гиперграфа WS на s -подграфы (Рис. 9).

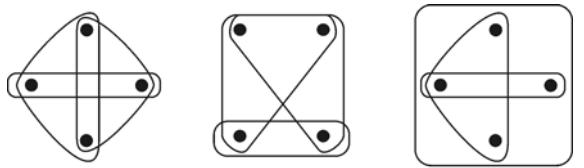


Рис. 8. Нестягиваемые гиперграфы четвертого порядка

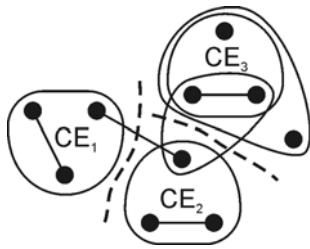


Рис. 9. Разрезание гиперграфа WS на s -подграфы

В диссертации задача разрезания поставлена как задача дискретного математического программирования. Введены необходимые переменные, с помощью которых записаны основные, вспомогательные и структурные ограничения, влияющие на существование данного проектного решения.

Разработаны критерии, формализующие важные проектные ситуации:

- разбиение на максимальное число сборочных единиц;
- сборка с сопряжением по минимальному числу поверхностей;
- минимизация сборочного цикла;
- минимальные различия масс, «емкостей» и времен сборки отдельных сборочных единиц и др.

Формализация размерных ограничений. На последовательности сборки и разбиения изделия на СЕ влияет система конструкторских размерных цепей. В диссертации разработаны принципы согласования размерной структуры изделия с данными проектными решениями.

Принцип согласования 1. Последовательность сборки согласована со сборочной конструкторской размерной цепью, если последовательность является линейным продолжением иерархического порядка, который индуцирует цепь на множестве деталей, служащих носителями составляющих звеньев размерной цепи.

Предложены способы расчета числа линейных продолжений для цепного, координатного и комбинированного способов простановки размеров. Обозначим C_n – число всех линейных продолжений для размерной схемы «цепь», состоящей из n элементов; K_n – число всех линейных продолжений для размерной схемы, которая является деревом с n вершинами; $I(r)$ – иерархический порядок, который порождается на множестве A выбором корневой вершины с номером r ; $L(I(r))$ – число линейных продолжений этого порядка. Тогда

$$C_n = \sum_{r=1}^n L(I(r)) \quad \text{и} \quad K_n = \sum_{r=1}^n L(I(r)).$$

$$\text{Показано, что } C_n = \sum_{i=2}^{n-1} \frac{(n-1)!}{(i-1)! \times (n-i)!} + 2, \text{ а } K_n = (n-1)! + (n-1) \times (n-2)! = 2(n-1)!.$$

Обозначим T дерево, которое порождает комбинированный способ простановки размеров. Выбор корня, который обозначает базовую деталь, превращает дерево T в иерархически упорядоченное множество. Обозначим $T(r)$ – иерархический порядок на дереве T , который порождает выбор корня r . Тогда общее число линейных продолжений, согласованных с древесным порядком при выборе различных

корневых вершин, можно найти по формуле $P_n = \sum_{r \in T} L(T(r))$.

В работе предложена методика расчета P_n , основанная на представлении $T(r)$ в виде упорядоченной суммы упорядоченных подмножеств, и показано, что

$C_n \leq P_n \leq K_n$. Это значит, что самые жесткие ограничения на возможные последовательности сборки накладывает цепной способ простановки размеров, самые мягкие – координатный. Комбинированная система обмеривания занимает промежуточное положение между данными размерными схемами.

Принцип согласования 2. Декомпозиция изделия на СЕ согласована со структурой конструкторских размерных цепей, если совпадают два бинарных отношения: транзитивное замыкание отношения толерантности, которое порождено системой конструкторских размерных цепей, и отношение эквивалентности, индуцированное разбиением множества деталей на сборочные единицы.

Содержание главы 3

Третья глава посвящена моделированию геометрических ограничений (геометрической разрешимости), которые накладываются конструкцией на планы сборки изделия и разбиения на сборочные единицы.

Введем более компактное обозначение $H = (X, R)$ для s -гиперграфа, описывающего сборочную структуру изделия $X = \{x_i\}_{i=1}^n$. Пусть $F(H)$ множество всех порожденных s -подграфов гиперграфа H , дополненное пустым множеством \emptyset . Элементы $F(H)$ упорядочим по теоретико-множественному включению, то есть $H_i = (X_i, R_i) \leq H_j = (X_j, R_j) \Leftrightarrow X_i \subseteq X_j$. В диссертации доказана следующая важная теорема.

Теорема 6. Упорядоченное множество $(F(H), \leq)$ является решеткой.

На Рис. 12 изображена решетка $F(H)$ простой конструкции, показанной на Рис. 11, а.

Определение 10. Множество вершин порожденного s -подграфа гиперграфа $H = (X, R)$ будем называть s -множеством.

Приложения решеточной модели. Решетка $F(H)$ является универсальной порождающей средой, которую можно использовать для генерации различных проектных решений технической подготовки производства. Действительно, она включает в себя все независимо собираемые фрагменты изделия и связи между ними. Независимая собираемость и внутренняя координация требуются для сборки, разборки, ремонта, разбиения на СЕ, а также для контрольных, испытательных, пригоночных и многих других операций. Приведем несколько важных применений.

- Любая максимальная $(0,1)$ -цепь ($(1,0)$ -цепь) в $F(H)$ дает описание линейной последовательности сборки (разборки), которая удовлетворяет условиям базирования.
- Немаксимальные $(0,1)$ -цепи ($(1,0)$ -цепь) в $F(H)$ описывают нелинейные последовательности сборки (разборки).
- $F(H)$ содержит информацию для генерации разбиений изделия на сборочные единицы.

- Решетка $F(H)$ позволяет согласовать структурные, геометрические и размernые ограничения, которые накладывает конструкция на проектные решения сборочного передела.

- Решетка дает информацию для глубокого структурного анализа конструкции.

- Решетка $F(H)$ позволяет применить глубоко разработанные алгебраические методы для анализа геометрической разрешимости при сборке сложных изделий.

При помощи техники разрезаний s -гиперграфа, рассмотренной в главе 2, можно получить одноуровневые декомпозиции изделия. Решеточные методы дают возможность синтезировать иерархические разбиения любой глубины. В диссертации доказано важное утверждение об интерпретации декомпозиций в решеточных терминах.

Теорема 7. Упорядоченное подмножество (M, \leq) решетки $(F(H), \leq)$, $M \subseteq F(H)$, служит математическим описанием сборочной декомпозиции, если выполняются следующие условия:

1. (M, \leq) является направленным вверх;
2. (M, \leq) включает в себя все атомы решетки $(F(H), \leq)$;
3. любая антицепь в (M, \leq) представляет собой ортогональную систему в решетке $(F(H), \leq)$.

На Рис. 10 изображено упорядоченное подмножество (M_w, \leq) , описывающее одну из возможных декомпозиций конструкции промежуточного вала, чертеж которого приведен в диссертации на рис.2.12.

Геометрическая наследственность при сборке изделий.

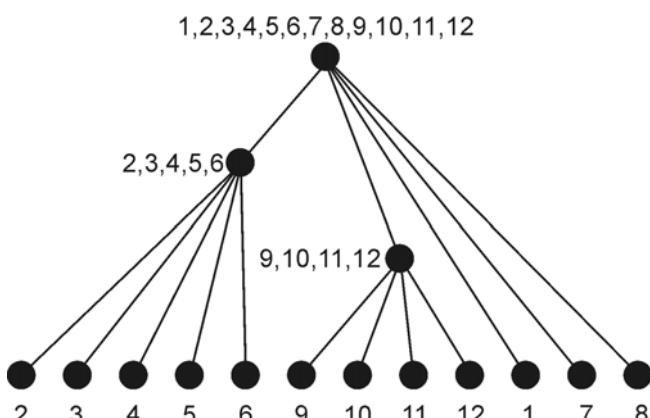


Рис. 10. Упорядоченное подмножество (M_w, \leq)

ной и необходимой. В решеточных терминах геометрические ситуации – это ребра решетки $F(H)$.

Определение 12. Геометрическую ситуацию (A, x) назовем разрешенной, если существует движение, которое переводит деталь x в служебное положение в

Рассмотрим основное применение решеточной модели – анализ геометрических ограничений при сборке сложных изделий.

Определение 11. Геометрической ситуацией назовем кортеж (A, x) , где x – деталь, A и $A \cup \{x\}$ являются s -множествами.

Геометрическая ситуация – математическое описание фрагмента конструкции, для которого проверка на геометрическую разрешимость является осмысленной и необходимой. В решеточных терминах геометрические ситуации – это ребра решетки $F(H)$.

изделии, то есть реализует s -множество $A \cup \{x\}$ в пространстве. В противном случае ситуация называется запрещенной.

На Рис. 11,а изображена простая конструкция крепления вала и примеры двух ситуаций, относящиеся к установке подшипника 3: разрешенная (б) и запрещенная (в).

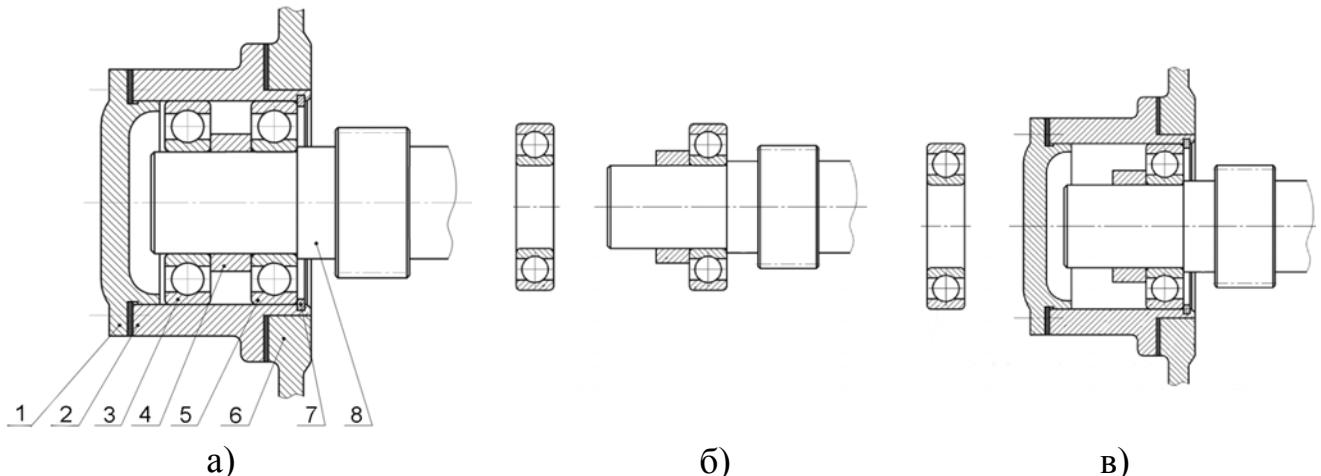


Рис. 11. Конструкция (а), разрешенная ситуация (б) и запрещенная ситуация (в)

Пусть X – некоторое изделие, x – деталь, а A и B две геометрические ситуации, связанные с установкой данной детали.

Утверждение 1. Если ситуация (A, x) является разрешенной, то любая ситуация (B, x) такая, что $B \subseteq A$ также является разрешенной.

Утверждение 2. Если ситуация (A, x) является запрещенной, то любая ситуация (B, x) такая, что $A \subseteq B$ является запрещенной.

Теоретико-решеточная модель геометрической разрешимости.

Определение 13. Максимальная цепь решетки $F(H)$, которая начинается в s -множестве A и заканчивается в s -множестве B ((A, B) -цепь) называется разрешенной, если каждое ее ребро соответствует разрешенной геометрической ситуации.

Теорема 8. Пусть в решетке $F(H)$ с ранговой функцией есть максимальная разрешенная $(0, 1)$ -цепь. Тогда для любого непустого s -множества $A \in F(H)$ существует максимальная разрешенная $(0, A)$ -цепь.

Эта теорема в точных алгебраических терминах описывает факт, который хорошо согласуется с геометрической интуицией человека. А именно: если существует хотя бы одна последовательность сборки изделия, которая свободна от геометрических препятствий, то такая последовательность найдется и для любой связной и геометрически определенной части данной конструкции.

Определение 14. S -множество $A \in F(H)$ решетки $F(H)$ назовем d -множеством (d -элементом), если в $F(H)$ существует хотя бы одна максимальная разрешенная $(A, 1)$ -цепь.

Иными словами, d -множество – это такой фрагмент конструкции, сборку которого можно продолжить до изделия в целом.

Теорема 9. Пусть в решетке $F(H)$ есть по крайней мере одна максимальная разрешенная $(0,1)$ -цепь. Для любых d -элементов A и B решетки их решеточное пересечение $A \wedge B$ также является d -элементом.

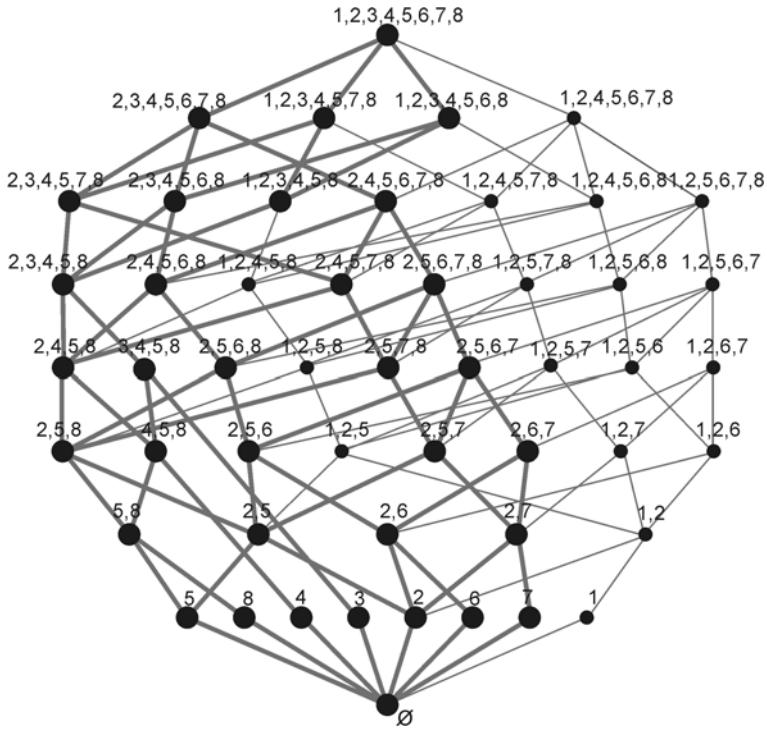


Рис. 12. Решетки $F(H)$ и $D(H)$ простой конструкции (Рис. 11, а)

Теорема 10. Непустое множество всех d -элементов решетки $F(H)$ является решеткой $(D(H), \wedge, \vee_D)$ относительно операций решеточного пересечения \wedge и объединения \vee_D d -элементов.

На Рис. 12 приведены решетки $F(H)$ и $D(H)$, которые описывают структурные и геометрические связи простой конструкции, изображенной на Рис. 11, а. Вершины и ребра решетки $D(H)$ изображены с эмфазой.

В диссертации предложено несколько рациональных стратегий анализа решетки $D(H)$, позволяющих минимизировать число

прямых проверок на геометрическую разрешимость.

- Анализ антицепей решетки $D(H)$ и вычисление решеточных пересечений.
- Восстановление решетки $D(H)$.
- Многошаговая нисходящая процедура анализа геометрической разрешимости.
- Многошаговая процедура поиска на решетке $F(H)$ как баевской сети доверия.

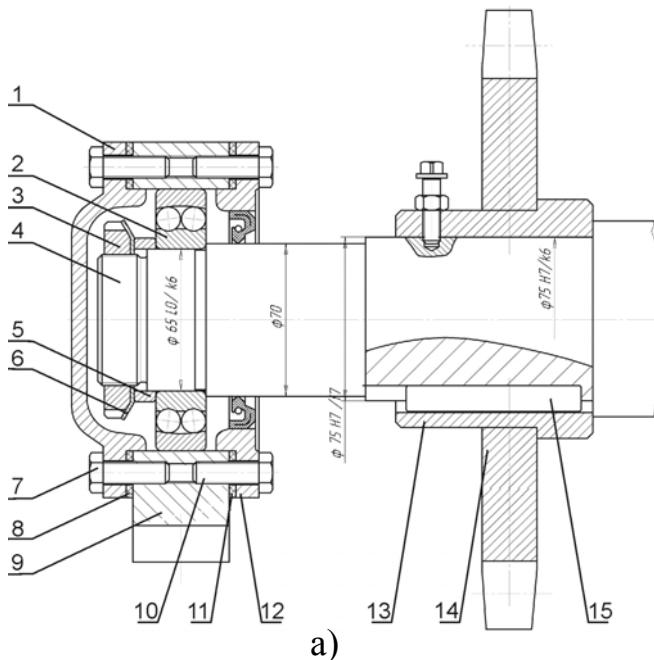
Игровая модель геометрической разрешимости. Введем необходимые обозначения и определения. Пусть дана решетка $F(H)$. Рассмотрим все геометрические ситуации решетки $F(H)$, связанные с установкой одной детали x , и обозначим это множество $GS(x)$. Введем на $GS(x)$ нестрогий порядок следующим соотношением $\forall g_1 = (A, x) \text{ и } g_2 = (B, x) \in GS(x) \quad g_1 = (A, x) \leq g_2 = (B, x) \Leftrightarrow A \subseteq B$.

На Рис. 13, б показано упорядоченное множество всех ситуаций $GS(3)$, относящихся к установке детали 3 узла приводного вала, конструкция которого изображена на Рис. 13, а.

Определение 15. Вершины упорядоченного множества $(GS(x), \leq)$, отвечающие разрешенным ситуациям, назовем белыми. Вершины, соответствующие запрещенным ситуациям, назовем черными. Неопределенные ситуации, в которых

проблема геометрического доступа еще не решена, назовем неокрашенными (не-раскрытыми) и будем изображать квадратами черного цвета.

Используя метафору цвета, утверждения 1 и 2 можно перефразировать следующим образом. Пусть в диаграмме Хассе упорядоченного множества $GS(x)$ вершина, описывающая геометрическую ситуацию $g \in GS(x)$, окрашена белым цветом. Тогда все элементы главного идеала $I(g) = \{p \in GS(x) \mid p \leq g\}$, порожденного вершиной g , должны иметь белый цвет. Если $g \in GS(x)$ окрашена черным, то все вершины главного фильтра $F(g) = \{r \in GS(x) \mid r \geq g\}$, порожденного вершиной g , должны быть черными.



a)

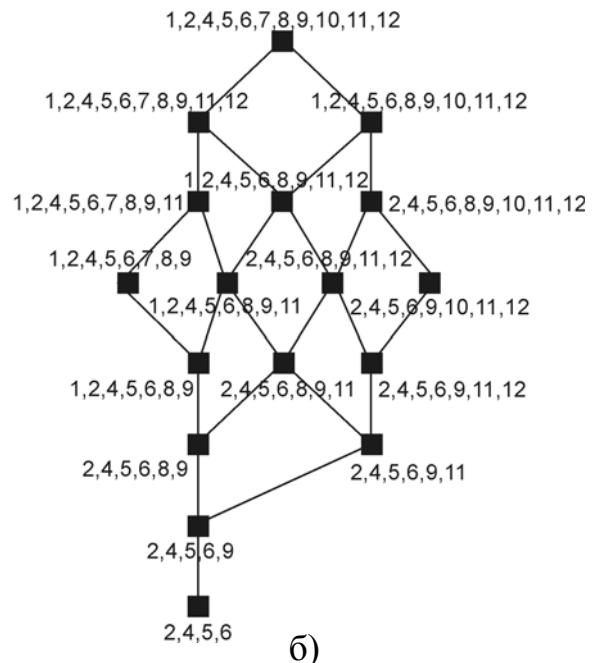


Рис. 13. Приводной вал (а) и упорядоченное множество $GS(3)$ (б)

Утверждения 1 и 2 позволяют поставить задачу анализа геометрической разрешимости как неантагонистическую игру двух лиц: ЛПР и природы. Приведем правила данной игры в общей ситуации. Дано неокрашенное упорядоченное множество GS . Ход ЛПР заключается в выборе неокрашенной вершины $g \in GS$, ответ природы заключается в выборе цвета для этой вершины. Если цвет белый, то все вершины порядкового идеала $I(g)$ вершины g получают белый цвет. Если природа «выбрала» черный цвет, то все вершины порядкового фильтра $F(g)$ окрашиваются черным цветом. Требуется окрасить все вершины упорядоченного множества за минимальное число ходов.

Обозначим игру по окрашиванию упорядоченного множества $\Gamma(R)$, где R – произвольное упорядоченное множество. Обозначим $\Gamma(C_n)$ важный частный случай игры, когда множество R является n -элементной цепью. В диссертации рассмотрены чистые стратегии игры $\Gamma(C_n)$ и доказано, что оптимальной является дихотомическая стратегия, в которой ЛПР на каждом шаге игры выбирает среднюю вершину из неокрашенной части цепи. Для окраски n -элементной цепи в дихотоми-

ческой стратегии необходимо выполнить $W(s_2, n)$ проверок, где $W(s_2, n) = (1+n) \times (p+2) - 2^{p+1}$, а $p = [\log_2 n]$ (целая часть от $\log_2 n$).

Для игры общего вида $\Gamma(R)$ разработан метод расчета схемы рандомизации ответов природы, основанный на вычислении порядкового многочлена.

Содержание главы 4

В четвертой главе рассматриваются методы структурного анализа сложных технических систем и моделирование проектных решений сборочного передела по разрезаниям гиперграфа. Внутренняя геометрическая координация деталей – это важное необходимое условие для многих технических операций: сборки, разборки, декомпозиции на СЕ, анализа на разрешимость, контроля, испытаний и пр. Введено понятие разрезания, которое формализует свойство независимой координации в операциях бинарной декомпозиции изделия.

Определение 16. Пара (A, B) называется разрезанием гиперграфа H , если $A \cup B = X, A \cap B = \emptyset$ и подграфы $[A], [B], [A], [B] \subseteq H$, порожденные в H множествами вершин A и B , являются s -гиперграфами.

Определение 17. Разрезание (A, B) назовем максимальным, если не существует разрезания (C, D) такого, что $A \subseteq C, B \subseteq D$ либо $A \subseteq D, B \subseteq C$.

Теорема 11. Разрезание (A, B) s -гиперграфа $H = (X, R)$ достигается удалением только одного ребра $r \in R$.

Поскольку каждая часть гиперграфа, полученная разрезанием, представляет собой s -гиперграф, то разрезания можно продолжить вплоть до элементарных фрагментов, состоящих из отдельных вершин. Результаты рекурсивной процедуры разрезаний удобно представить в виде И – ИЛИ-дерева, где корневая вершина представляет исходный s -гиперграф, внутренние вершины описывают подграфы, полученные разрезанием, листья соответствуют вершинам гиперграфа, а И-связки описывают сами разрезания.

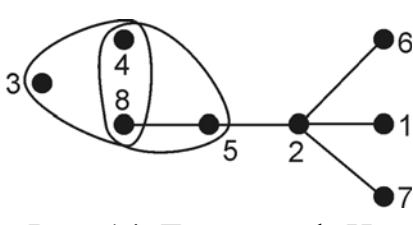


Рис. 14. Гиперграф H_c конструкции (Рис. 11, а)

В качестве примера воспользуемся простой конструкцией, приведенной на Рис. 11, а. На Рис. 14 показан гиперграф H_c сборочной структуры данной конструкции. И – ИЛИ-дерево, описывающее всевозможные разрезания гиперграфа H_c , изображено на Рис. 15. На этом рисунке связки дерева показаны в виде прямоугольных вершин.

Обозначим $T(H)$ И – ИЛИ-дерево разрезаний, построенное по s -гиперграфу $H = (X, R)$. $T(H)$ содержит проектную информацию, по которой можно синтезировать допустимые последовательности сборки и схемы декомпозиции изделия на сборочные единицы. Например, любой путь в И – ИЛИ-дереве, соединяющий концевую вершину с корнем, является математическим описанием последовательности сборки. Один такой путь изображен на Рис. 15 жирной линией.

Обозначим $CT(H)$ – множество всех разрезаний s -гиперграфа $H = (X, R)$. Упорядочим два разрезания $(A, B), (C, D) \in CT$ по правилу: $(A, B) \leq (C, D)$ тогда и только тогда, когда $A \subseteq C$ и $B \subseteq D$ или $A \subseteq D$ и $B \subseteq C$. Легко проверить, что для данного отношения выполняются все свойства, обязательные для нестрогого порядка (рефлексивность, антисимметричность и транзитивность). Это превращает множество всех разрезаний в упорядоченное множество $(CT(H), \leq)$.

Очевидно, что максимальными элементами в $(CT(H), \leq)$ являются максимальные разрезания гиперграфа H . Доказана важная теорема о структуре множества $CT(H)$.

Теорема 12. Пусть x и y – две различные вершины s -гиперграфа $H = (X, R)$ такие, что они образуют максимальные разрезания (F, x) и (G, y) гиперграфа, и $|X| > 2$. Тогда элементы упорядоченных подмножеств $CT_{F,x}$ и $CT_{G,y}$, $CT_{F,x}, CT_{G,y} \subseteq CT(H)$, являются попарно несравнимыми.

По аналогии с геометрическими ситуациями, геометрический анализ разрезаний можно поставить как задачу окраски упорядоченных множеств. Введем необходимые определения.

Определение 18. Разрезание (A, B) назовем разрешенным, если A и B не содержат геометрических препятствий, запрещающих реализацию конструктивного фрагмента $A \cup B$. В противном случае разрезание будет запрещенным.

Как и для геометрических ситуаций, для разрезаний можно формулировать два утверждения о геометрической наследственности.

Утверждение 3. Пусть разрезание (A, B) является разрешенным. Тогда любое разрезание (C, D) такое, что $(C, D) \leq (A, B)$, является разрешенным.

Утверждение 4. Пусть разрезание (A, B) является запрещенным. Тогда любое разрезание (C, D) такое, что $(C, D) \geq (A, B)$, является запрещенным.

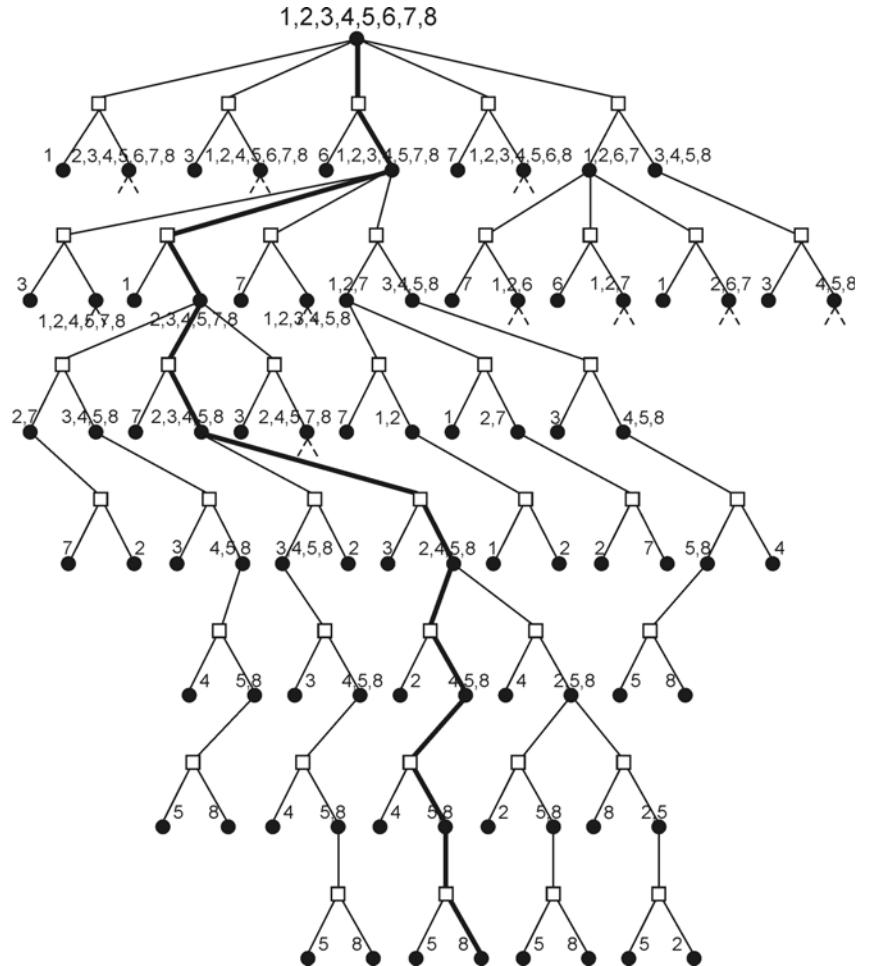


Рис. 15. И – ИЛИ-дерево разрезаний гиперграфа H_c (Рис. 14)

Порядковое отношение на множестве $CT(H)$ и утверждения о геометрической наследственности для разрезаний разрешают поставить задачу анализа геометрической разрешимости как окраску в два цвета упорядоченного множества $(CT(H), \leq)$ всех разрезаний.

Структурный анализ конструкции. В диссертации разработаны методы структурного анализа сложных технических систем, которые на ранних этапах технической подготовки производства позволяют идентифицировать проектные ошибки и уязвимые проектные решения. Основными носителями структурной информации являются гиперграф $H = (X, R)$ и решетка $F(H)$.

Перечислим основные возможности структурного анализа, предложенные в диссертации.

- Идентификация перебазирования и несеквенциальных конструктивных фрагментов.
- Линеаризация переопределенной механической структуры.
- Оценка расчленяемости и собираемости конструкции и ее составных частей.
- Структурная оценка ремонтопригодности. Выполняется анализ «глубины вложения» детали в изделие и дается численная оценка сложности разборки.
- Структурные эвристики. Рассчитывается численная оценка «геометрической свободы» деталей и др.

Содержание главы 5

В пятой главе окрашивание вершин упорядоченного множества GS рассматривается как задача принятия решений, в которой ЛПР выбирает неокрашенные вершины последовательно, в зависимости от предыдущих испытаний. В игровых терминах окрашивание вершины означает проверку на геометрическую разрешимость некоторого собранного фрагмента конструкции. Такая проверка в СААР -системах выполняется при помощи трудоемких алгоритмов анализа столкновений (Collision detection) или планирования перемещений (Motion planning). Минимизация числа проверяемых вершин дает возможность уменьшить совокупную трудоемкость геометрического анализа при проектировании сборочных процессов сложных технических систем.

В играх $\Gamma(C_n)$ можно снять неопределенность, которую вносит природа, если рассмотреть множество всех правильных окрасок цепи C_n . Для игр общего вида $\Gamma(R)$ данный подход оказывается несостоятельным, поскольку комбинаторное разнообразие упорядоченных множеств очень велико. Для разыгрывания таких игр целесообразно использовать пошаговую стратегию. В этом случае задачу выбора окрашиваемой вершины можно поставить как задачу принятия решений в условиях неопределенности. На каждом шаге игры ситуацию принятия решения можно представить в виде так называемой платежной матрицы (Рис. 16.).

Здесь X – лицо принимающее решение; Y – природа; $X^i, i = \overline{1, n}$ – ходы ЛПР; Y_1, Y_2 – ответы природы (цвет вершин); $x_{ij}, i = 2; j = \overline{1, n}$ – выигрыш первого игрока при собственном ходе X^i и ответе природы Y_j . Возможные ходы ЛПР представляют собой выбор неокрашенной вершины упорядоченного множества, ответы природы – цвет вершины, выбранной для проверки первым игроком. Выигрыш первого игрока – число вершин порядкового фильтра (для черной вершины) или порядкового идеала (для белой вершины).

Теория принятия решений предлагает несколько критериев рационального выбора альтернатив в условиях неопределенности. Это, прежде всего, классические критерии Вальда, Лапласа, Севиджа и др. Приведем их формулировки для общего случая и применительно к поставленной задаче.

Критерий Вальда (WLD) $\max_j \min_i x_{ij}$. Для $\Gamma(R)$ – $\max_j \min(x_{1j}, x_{2j})$.

Критерий Байеса-Лапласа (BL) $\max_j z_j$, $z_j = \sum_{i=1}^n x_{ij} p_{ij}$, где p_{ij} – вероятность от-

вета природы Y_i на ход ЛПР. Для $\Gamma(R)$ – $\max_j z_j$, $z_j = \frac{x_{1j} + x_{2j}}{2}$.

Критерий Севиджа (SVG) $\min_j \max_i r_{ij}$, $r_{ij} = \max_p x_{ip} - x_{ij}$, где r_{ij} – элемент матрицы потерь, который равен разности между максимальным элементом в i -й строке и элементом x_{ij} . Для $\Gamma(R)$ – $\min_j \max(r_{1j}, r_{2j})$.

Критерий произведений (MPL) $\max_j \prod_i x_{ij}$. Для $\Gamma(R)$ – $\max_j (x_{1j} \times x_{2j})$.

Критерий Ходжа-Лемана (HL) $\max_j \left(\beta \times \sum_{i=1}^n x_{ij} p_{ij} + (1-\beta) \times \min_i x_{ij} \right)$, где

$\beta, 0 \leq \beta \leq 1$, – коэффициент, выражющий степень доверия к распределению веро-

ятностей. Для $\Gamma(R)$ – $\max_j \left(\beta \times \frac{x_{1j} + x_{2j}}{2} + (1-\beta) \times \min(x_{1j}, x_{2j}) \right)$.

Критерий Гурвица (HW) $\max_j \left(\alpha \times \max_i x_{ij} + (1-\alpha) \times \min_i x_{ij} \right)$, где $0 \leq \alpha \leq 1$ – коэффициент доверия или оптимизма, $\max_j \left(\alpha \times \max(x_{1j}, x_{2j}) + (1-\alpha) \times \min(x_{1j}, x_{2j}) \right)$ – для $\Gamma(R)$.

X		X'	X''		X^n
Y	Y_1	x_{11}	x_{12}	...	x_{1n}
	Y_2	x_{21}	x_{22}		x_{2n}

Рис. 16. Платежная матрица игры $\Gamma(R)$

Экспериментальное исследование эффективности критериев окраски упорядоченных множеств.

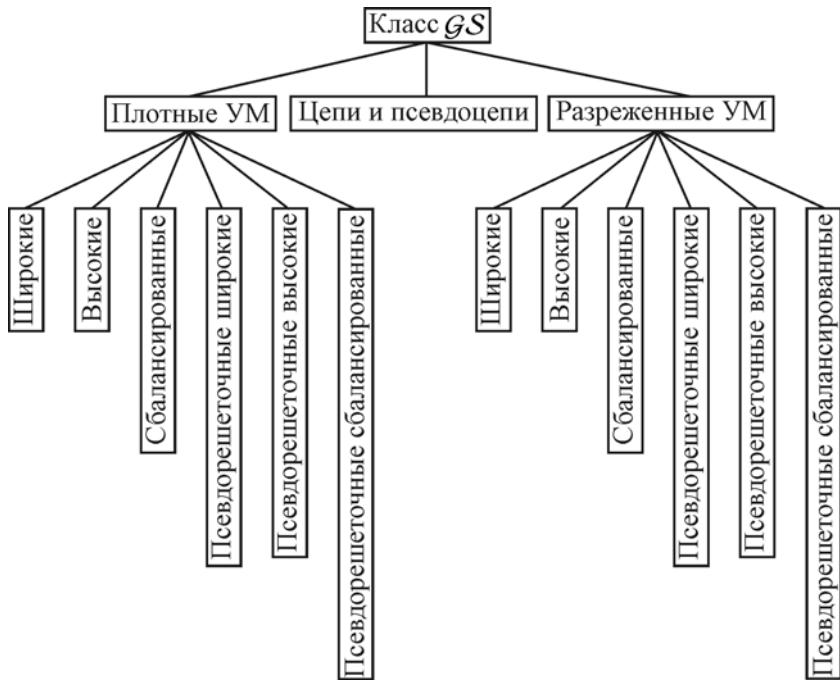


Рис. 17. Разбиение класса \mathcal{GS}

Для выбора лучшего критерия принятия решений в задаче окраски упорядоченных множеств (УМ) проведен вычислительный эксперимент. Для этого класс \mathcal{GS} всех упорядоченных множеств типа $(GS(x), \leq)$ разделен на 13 подклассов (Рис. 17), которые значительно отличаются друг от друга структурными свойствами. Выполнены испытания по окрашиванию упорядоченных множеств, принадлежащих каждому подклассу.

Организация и результаты вычислительного эксперимента. Для реализации эксперимента разработано программное приложение GraphBuilder, которое создает случайное упорядоченное множество с заданными структурными характеристиками (широкое, плотное и др.). Программа реализует игровой сеанс по правильной окраске созданного УМ. Для этого определяется лучшая согласно данному критерию неокрашенная вершина и случайным образом назначается цвет. Если существует несколько вершин с одинаковым значением критерия, то с равной вероятностью выбирается любая из них. Вероятности окраски в белый или черный цвета равны 0,5. После выбора цвета вершины программа распространяет окраску по правилам игры $\Gamma(R)$. Данная последовательность действий повторяется до тех пор, пока все вершины упорядоченного множества не будут окрашены в белый или черный цвета.

Оценкой эффективности критерия служит величина Nav_r – среднее число проверок по результатам 20000 испытаний, вычисленное для каждого значения Ht . Лучшим результатам соответствует меньшее значение Nav_r .

Лучшие результаты во всех подклассах УМ показали критерии $HW2/3$ и BL , худшие – SVG и WLD . В подклассе псевдоцепей результаты всех критериев примерно равны.

Содержание главы 6

В шестой главе описано программное обеспечение, которое реализует модели изделия и методы проектирования, предложенные в диссертации.

Программное приложение AssemBL – это комплекс прикладных программ, которые работают в среде интегрированной CAD/CAM/CAE-системы Siemens NX 10.0.

Перечислим основные возможности приложения AssemBL.

- *Моделирование механических структур.* Подпрограмма формирует две основные структурные модели изделия: граф и гиперграф связей. Данные модели служат основными источниками структурной информации в задачах структурного анализа и синтеза плана сборки и разбиения на сборочные единицы.

- *Структурный анализ конструкции.* Подпрограмма выполняет глубокий структурный анализ проекта и рассчитывает многочисленные показатели, которые оценивают «технологичность» сборки, разборки и разбиения на сборочные единицы. Данная информация предоставляется ЛПР и служит основанием для ревизии принятых проектных решений.

- *Анализ геометрической разрешимости.* Подпрограмма служит для объективизации геометрических связей, которые влияют на допустимые перемещения деталей и сборочных единиц в процессе сборки/разборки изделия.

- *Синтез последовательности сборки.* Подпрограмма предназначена для проектирования рациональной последовательности сборки изделия. Она учитывает основные конструктивные ограничения (секвенциальность, когерентность и геометрическая разрешимость), а также мнение ЛПР об упорядоченности пар деталей.

- *Синтез декомпозиции.* Подпрограмма предназначена для генерации разбиений изделия на сборочные единицы. Генерации проектных решений основана на поиске допустимых разрезаний гиперграфа. Проектные решения, полученные подпрограммой, удовлетворяют предпочтениям ЛПР о разбиении множества деталей.

Система NX 10.0 имеет развитый инструментарий для создания внешних CAD/CAM/CAE-приложений. Для разработки AssemBL были использованы следующие программные средства и инструменты: интерфейс прикладного программирования NX Open API, интегрированные среды разработки (IDE) Microsoft Visual Studio 2012 и JetBrains PyCharm, языки программирования C++ и Python, генератор диалогов NX Block UI Styler.

Приложение AssemBL в процессе работы использует ресурсы NX. Это, в первую очередь, команды Analysis => Simple Interference (Анализ => Пересечение) и Analysis => Assembly Clearance (Анализ => Зазоры в сборке), а также штатные инструменты программы, предназначенные для создания, редактирования и визуализации трехмерных моделей деталей и сборок.

На Рис. 18 изображено главное окно приложения AssemBL.

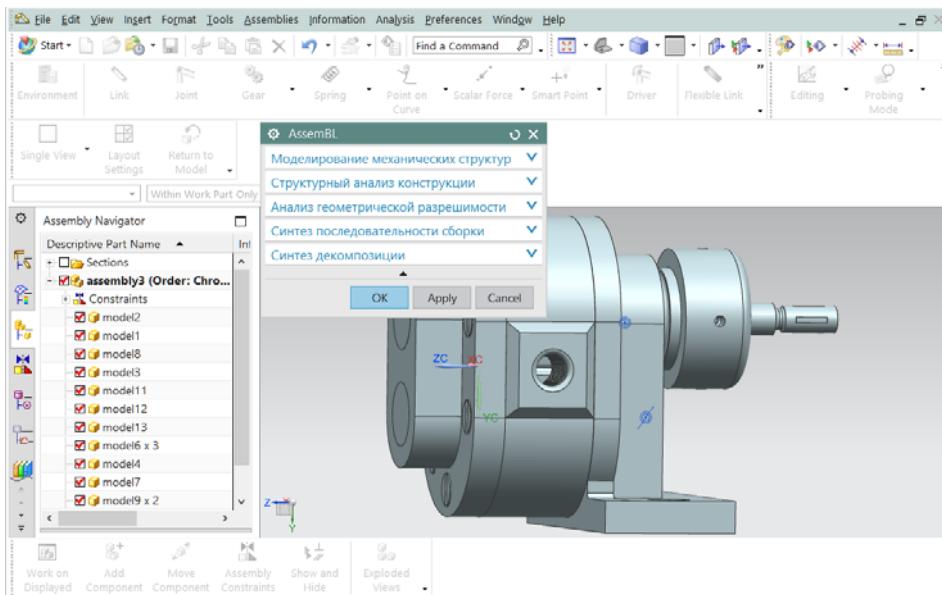
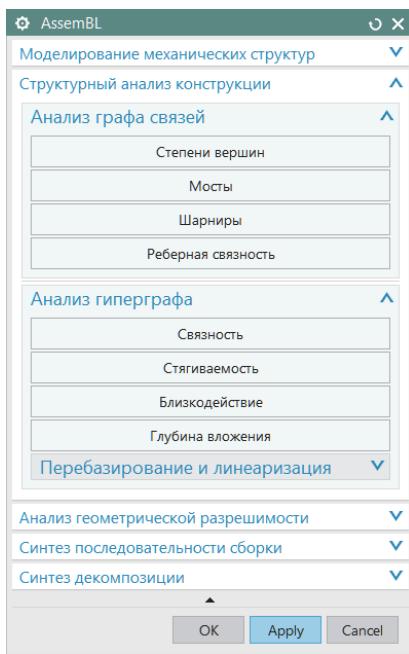
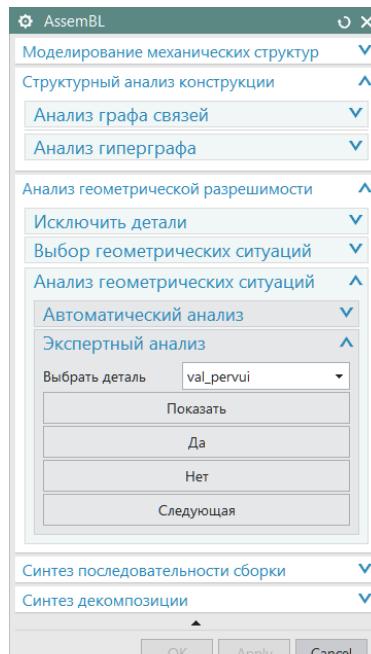


Рис. 18. Главное окно приложения AssemBL

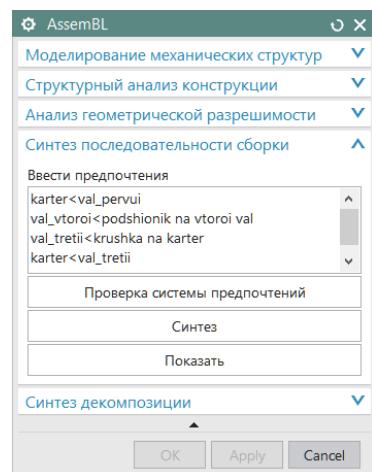
Управляющие ресурсы основных программных модулей AssemBL изображены на Рис. 19.



а)



б)



в)

Рис. 19. Управляющие ресурсы основных программных модулей: а) – структурный анализ; б) – анализ геометрической разрешимости; в) – синтез плана сборки

Общие выводы и заключение

1. Выполнен анализ основных методов автоматизированного проектирования сборочных процессов и способов моделирования структурных и геометрических свойств изделий в процессе сборки. Выявлены общие недостатки современных подходов к структурному анализу, синтезу последовательности сборки и разбиению изделий на сборочные единицы.

2. Предложена формализация позиционных механических и размерных связей, которые служат для координации деталей в технической системе. Разработаны гиперсетевая и гиперграфовая модели структуры изделия, описывающие механические связи и базирование деталей в изделии.

3. Формализованы основные принципы реализации системы конструкторских размерных цепей в сборочных операциях и процессах: принцип связности и принцип замкнутости размерных цепей. Разработаны способы согласования размерной структуры изделия с допустимыми последовательностями сборки и разбиениями изделия на сборочные единицы.

4. Разработаны процедуры автоматизированного структурного анализа сложных технических систем, которые на ранних этапах технической подготовки производства позволяют идентифицировать структурные дефекты проекта и дать обоснованные рекомендации по их устранению.

5. Разработан метод автоматизированного синтеза последовательностей сборки изделия, удовлетворяющих условиям секвенциальности, когерентности и геометрической разрешимости.

6. Предложен метод моделирования конструкции изделия, позволяющий синтезировать иерархические многоуровневые декомпозиции изделия на сборочные единицы, оптимальные по различным числовым и структурным критериям.

7. Предложена формализация наследственности геометрических ограничений в собираемом изделии. На основе данной формализации разработана теоретико-игровая модель, в которой анализ геометрической разрешимости при сборке поставлен как неантагонистическая игра $\Gamma(R)$ ЛПР и природы. Предложены рациональные стратегии разыгрывания игры $\Gamma(R)$. Эти стратегии позволяют минимизировать число прямых проверок на геометрическую разрешимость, которые выполняются при помощи трудоемких методов планирования перемещений или анализа столкновений.

8. Предложена теоретико-решеточная модель конструкции, которая позволяет применить точные и глубоко разработанные алгебраические методы для синтеза проектных решений технической подготовки производства сложных изделий, а также согласовать структурные, размерные и геометрические ограничения, которые накладывает конструкция изделия на данные проектные решения.

9. На основе теоретико-решеточной модели конструкции разработаны точные и приближенные стратегии анализа геометрической разрешимости при сборке сложных технических систем. Данные стратегии дают возможность минимизировать число проверок, которые необходимы для верификации траекторий монтируемых деталей и выполняются при помощи ресурсоемких алгоритмов, моделирующих движение 3D-модели объекта в среде со статическими препятствиями или перемещение точки в многомерном конфигурационном пространстве, описывающим собранный конструктивный фрагмент.

10. Введено понятие разрезания гиперграфа как математической модели изделия в проектных операциях и производственных ситуациях, в которых оно делится на два связных и координированных конструктивных фрагмента. Предложен ком-

плексный метод генерации основных проектных решений технической подготовки сборочного производства, основанный на комбинаторном пространстве всех разрезаний гиперграфа, представленном в виде И – ИЛИ-дерева.

11. Разработан комплекс программных приложений AssemBL, предназначенный для автоматизированного структурного анализа сложных проектов, минимизации числа проверок на геометрическую разрешимость и генерации рациональной последовательности сборки и декомпозиции изделия на сборочные единицы.

Основные публикации

1. Божко А.Н. Алгебраические модели процесса сборки изделий // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. ЭЛ № ФС 77-48211. 2016. № 12. DOI:10.7463/1216.0852565. (1,17 п.л.).

2. Божко А.Н. Анализ геометрической разрешимости при сборке сложных изделий как задача принятия решений // Математика и математическое моделирование. ЭЛ № ФС 77-71245. 2018. №5. С. 1 – 18. DOI:10.24108/mathm.0518.0000153. (0,85 п.л.).

3. Божко А.Н. Анализ геометрической разрешимости. Теорема о d -элементах // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. ЭЛ № ФС 77-48211. 2017. №7. С. 198 – 209. DOI:10.7463/0717.0001283. (0,95 п.л.).

4. Божко А.Н. Выбор рациональной последовательности сборки изделия // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. ЭЛ № ФС 77-48211. 2010. №7. Режим доступа: <http://technomag.edu.ru/doc/147483.html>. (0,8 п.л.).

5. Божко А.Н. Геометрическая разрешимость трехмерных сцен // «Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Серия Приборостроение». 2013. 3[92]. С. 76 – 89. (0,82 п.л.)

6. Божко А.Н. Гиперграфовая модель структуры изделия // Труды Института системного анализа Российской академии наук (ИСА РАН). 2018. Том 68, вып. 2. С. 92 – 95. DOI: 10.14357/20790279180222. (0,4 п.л.).

7. Божко А.Н. Игровое моделирование геометрического доступа // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. ЭЛ № ФС 77-48211. 2009. №12. Режим доступа: <http://engineering-science.ru/doc/134322.html>. (1 п.л.).

8. Божко А.Н. Комбинаторные модели для сборки и декомпозиции изделий // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. ЭЛ № ФС 77-48211. 2015. № 10. DOI:10.7463/1015.0817524. (0,95 п.л.).

9. Божко А.Н. Метод диалогового упорядочения альтернатив // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. ЭЛ № ФС 77-48211. 2010. №5. Режим доступа: <http://engineering-science.ru/doc/142892.html>. (1 п.л.).

10. Божко А.Н. Методы анализа геометрической разрешимости при сборке изделий // Интернет-журнал НАУКОВЕДЕНИЕ. ЭЛ № ФС77-60397. 2016. Том 8, №5. DOI:10.15862/82TVN516. (1,76 п.л.).

11. Божко А.Н. Методы структурного анализа сложных изделий в интегрированных CAD/CAM-системах // Информационные технологии. 2018. Том 24, №8. С. 499 – 506. DOI: 10.17587/it.24.499-506. (0,9 п.л.).

12. Божко А.Н. Моделирование механических связей изделия // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. ЭЛ № ФС 77-48211. 2011. №3. Режим доступа: <http://engineering-science.ru/doc/168373.html>. (0,67 п.л.).
13. Божко А.Н. Моделирование механических связей изделия. Условия стягиваемости // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. ЭЛ № ФС 77-48211. 2011. №5. Режим доступа: <http://engineering-science.ru/doc/182518.html>. (0,6 п.л.).
14. Божко А.Н. Моделирование позиционных связей в механических системах // Информационные технологии. 2012. №10. С. 27 – 33. (0,95 п.л.).
15. Божко А.Н. Рациональное упорядочение альтернатив в диалоге с ЛПР // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. ЭЛ № ФС 77-48211. 2013. №2. DOI: 10.7463/0213.0531045. (0,7 п.л.).
16. Божко А.Н. Структурные модели собираемости изделий // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. ЭЛ № ФС 77-48211. 2013. №10. DOI:107463/1013.0622946. (0,9 п.л.).
17. Божко А.Н. Структурный анализ изделия и проектирование сборочных процессов в программном комплексе AssemBL // Машиностроение и компьютерные технологии. ЭЛ № ФС 77-71244. 2018. №8. DOI:10.24108/0818.0001424. (0,9 п.л.).
18. Божко А.Н. Структурный синтез как задача дискретной оптимизации // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. ЭЛ № ФС 77-48211. 2010. №9. Режим доступа: <http://engineering-science.ru/doc/158337.html>. (0,75 п.л.).
19. Божко А.Н. Теоретико-решеточная модель конструкции // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. ЭЛ № ФС 77-48211. 2011. №9. Режим доступа: <http://engineering-science.ru/doc/207577.html>. (0,5 п.л.).
20. Божко А.Н. Теоретико-решеточная модель расчленяемости машин и механических приборов // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. ЭЛ № ФС 77-48211. 2012. №2. Режим доступа: <http://engineering-science.ru/doc/324631.html>. (0,56 п.л.).
21. Божко А.Н. Теоретико-решеточное моделирование геометрической разрешимости при сборке изделий // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. ЭЛ № ФС 77-48211. 2017. №6. С. 118 – 130. DOI:10.7463/10.7463/0617.0001226. (0,75 п.л.).
22. Божко А.Н. Условия стягиваемости. Теоремы достаточности и перечисление // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. ЭЛ № ФС 77-48211. 2011. №7. Режим доступа: <http://engineering-science.ru/doc/197091.html>. (0,64 п.л.).
23. Божко А.Н. Формализация размерных ограничений на проектные решения сборочного передела // Информационные технологии. 2018, Том 24, № 7. С. 454 – 462. 2018 DOI: 10.17587/it.24.454-463. (1 п.л.).
24. Божко А.Н., Бетин Е.А. Анализ стягиваемости гиперграфов // Информационные технологии. 2005. №5. С. 6 – 12. (1,12 п.л./0,8 п.л.).

25. Божко А.Н., Жук, Д.М., Маничев, В.Б. Основы проектирования в САПР MicroStation V8i. – Издательство Bently Institute Press, 2013. 848с. (35 п.л./18 п.л.).
26. Божко А.Н., Ивахненко А.А., Чернянский А.И., Солнцев А.А. Принятия рациональных решений при проектировании сборочных схем // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. ЭЛ № ФС 77-48211. 2012. №10. DOI: 10.7463/1012.0475116. (0,8 п.л./0,5 п.л.).
27. Божко А.Н., Карпенко А.П. Синтез проектных решений для сборки сложных изделий на основе разрезаний гиперграфа // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Серия Приборостроение. 2018. 3[120]. С. 17 – 32. DOI: 10.18698/0236-3933-2018-3-17-32. (1,2 п.л./1 п.л.).
28. Божко А.Н. Криволапова А.С. Алгоритм линеаризации избыточных механических структур // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. ЭЛ № ФС 77-48211. 2015. №5. DOI: 10.7463/0515.0770391. (0,75 п.л./0,6 п.л.).
29. Божко А.Н. Криволапова А.С. Удаление избыточности в механических структурах по критерию расчленяемости // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. ЭЛ № ФС 77-48211. 2014. №11. DOI:10.7463/1114.0737603. (0,67 п.л./0,5 п.л.).
30. Божко А.Н., Муаммер С., Рогова О.Б. Моделирование геометрических препятствий при разбиении изделия на сборочные единицы // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. ЭЛ № ФС 77-48211. 2012. №5. DOI:10.7463/0512.0415792. (0,5 п.л./0,3 п.л.).
31. Божко А.Н., Родионов С.В. Методы искусственного интеллекта в автоматизированном проектировании процессов сборки // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. ЭЛ № ФС 77-48211. 2016. №8. DOI:10.7463/0816.0844719. (0,78 п.л./0,6 п.л.).
32. Божко А.Н., Сюсюкалов Б.С. Математические модели базирования и избыточности в механических системах // Информационные технологии. 2014. №3. С. 13 – 18. (0,7 п.л./0,5 п.л.).
33. Божко А.Н., Толпаров А.Ч. Структурный синтез на элементах с ограниченной сочетаемостью // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. ЭЛ № ФС 77-48211. 2004. №5. Режим доступа: <http://engineering-science.ru/issue/42019.html>. (1,18 п.л./1 п.л.).
34. Arkady Bozhko Theoretic-Lattice Approach To Computer Aided Generation Of Assembly Units. // Proceedings 2018 International Russian Automation Conference (RusAutoCon). 2018. DOI: 10.1109/RUSAUTOCON.2018.8501839. (0,8 п.л.).
35. Bozhko A.N. Karpenko A.P. Computer-aided Subassembly Generation // Proceedings of the Vth International workshop «Critical infrastructures: Contingency management, Intelligent, Agent-based, Cloud computing and Cyber security» (IWCI 2018). 2018. DOI:10.2991/iwci-18.2018.2. (0,8 п.л./0,6 п.л.).