

УДК 004.942

Удаление избыточности в механических структурах по критерию расчленяемости

Божко А. Н.^{1,*}, Криволапова А. С.¹

[*abozhko1@gmail.com](mailto:abozhko1@gmail.com)

¹МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Механические структуры многих технических систем являются избыточными по отношению взаимной геометрической координации деталей. Этот эффект проявляется в виде перебазирования деталей при сборке и влечет за собой нарушение технологического процесса. В работе рассматривается гиперграфовая модель, которая адекватно описывает переопределенные механические структуры и позволяет корректно удалить избыточные связи. Обсуждаются различные критерии устранения избыточности и подробно обсуждается критерий максимальной расчленяемости. Показано, что изделия с такими механическими структурами обладают большой гибкостью и способностью адаптироваться к различным производственным ситуациям.

Ключевые слова: механическая структура, механическая связь, сборка, базирование, избыточность, гиперграф, расчленяемость

Введение

Одним из важнейших этапов жизненного цикла любого изделия является его сборка. Это сложный политехнический процесс, в котором на качество продукции влияет множество факторов различной физической природы. Из всего многообразия технических, экономических, технологических и др. условий и ограничений выделим механические связи, которые закладываются в конструкцию на этапе проектирования, а реализуются в процессе сборки. Эти связи вместе с деталями и комплектующими образуют так называемую механическую структуру изделия, которая результативно используется для решения многих важных задач структурного анализа и синтеза технических систем.

Механическая структура обеспечивает (или не обеспечивает) необходимые условия для выбора рациональной последовательности сборки и предоставляет основания для разбиения изделия на сборочные единицы в условиях выбранного производства и заданной технологической оснащённости. Последовательность сборки и схема разбиения изделия на сборочные единицы – это важнейшие проектные решения, от которых в значительной степени зависит эффективность, а иногда и сама возможность, производства.

В классической механике под механическими связями принято понимать ограничения, которые накладываются на координаты и скорости механической системы. Математическим описанием таких связей служат системы равенств и неравенств, связывающие скорости, пространственные координаты элементов системы и время. В процессе конструирования и технологической подготовки производства, где акценты с динамических характеристик системы смещены на ее статическое состояние, этому понятию дается более узкое толкование. Под механическими связями понимают совокупность соединений и сопряжений деталей, которые доставляют машине или механическому прибору и функциональную тождественность и геометрическую целостность.

В многочисленных исследованиях отечественных и зарубежных авторов механические связи рассматривались как бинарные, а для математического описания механической структуры изделия использовался аппарат теории графов, алгебры и математической логики [1-6,13,15,16]. Такая формализация позволяет решить многие важные задачи структурного анализа и синтеза изделий, но не является достаточной для технологической подготовки сборочного производства.

Важнейшими проектными решениями этого этапа являются последовательность сборки и схема сборочного состава [14]. Последовательность сборки – это порядок установки деталей и сборочных единиц в служебное положение. В некоторых проектных ситуациях ее удобнее рассматривать как порядок реализации механических связей. Схема сборочного состава представляет собой иерархическое разбиение множества деталей изделия на независимо собираемые части, называемые сборочными или технологическими узлами. Данные проектные решения тесно связаны между собой и поэтому они фиксируются в одном технологическом документе – схеме сборки.

При установке детали в служебное положение и при разбиении изделия на отдельные сборочные единицы должны быть выполнены условия базирования. Это означает, что все детали в составе собираемого полуфабриката или сборочной единицы обязаны быть скоординированы относительно своих конструкторских баз, согласно конструкторской документации. Определенность геометрического расположения может достигаться базированием по одной, двум, реже трем и большему числу деталей-носителей основных конструкторских баз. Это значит, что отношение базирования имеет переменную местность и не может быть адекватно описано бинарными структурами, например графами или матрицами смежности.

В работах [8-10] была предложена гиперграфовая модель механической структуры, в которой базирование рассматривается как отношение переменной местности, заданное на множестве деталей изделия, и описывается в виде гиперребер различной степени. Более точно, представим механическую структуру машины или механического прибора в виде гиперграфа $H = (X, R, W)$, в котором вершины $X = \{x_i\}_{i=1}^n$ представляют детали, гиперребра $R = \{r_j\}_{j=1}^m$ – полные комплекты конструкторских баз, а $W : R \rightarrow 2^X$ – отображение (инцидентор), которое связывает комплекты конструкторских баз с их

физическими носителями – деталями. Будем называть такие модели гиперграфами механических связей.

Проиллюстрируем гиперграфовую модель на примере простой конструкции, показанной на рис. 1. На этом рисунке изображен чертеж промежуточного вала цилиндрического редуктора внутреннего зацепления, а на рис. 2 представлен гиперграф механических связей этого узла.

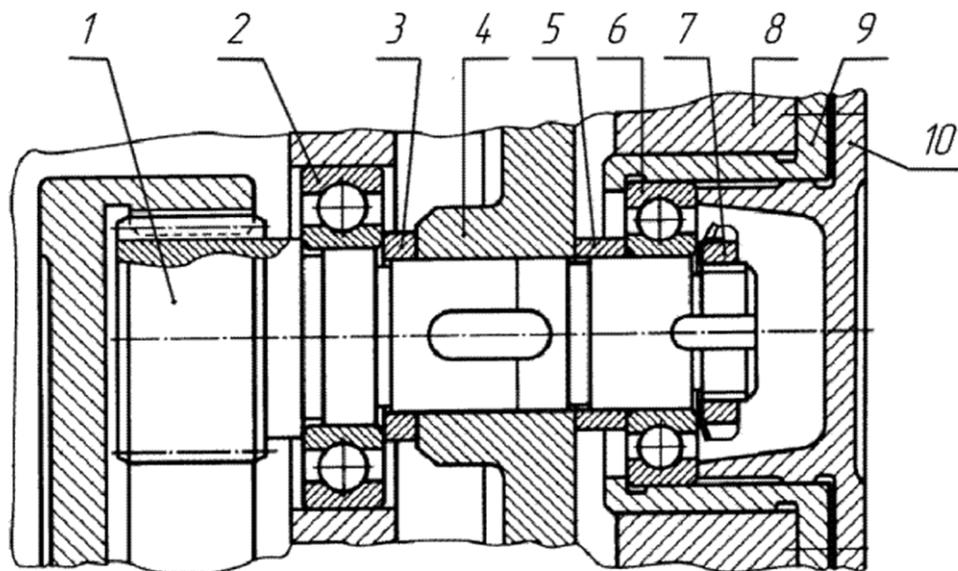


Рис. 1. Промежуточный вал цилиндрического редуктора внутреннего зацепления:

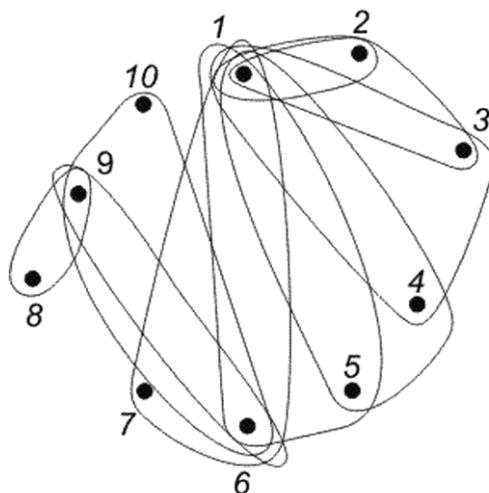


Рис. 2. Гиперграф механических связей узла

С позиций системного анализа последовательность сборки изделия можно рассматривать как последовательность реализации механических связей. Если отвлечься от технологического содержания сборочных операций, то оказывается, что установка детали заключается в реализации базовых инцидентов, которые связывают ее с

собранным фрагментом изделия. Это действие можно описать как стягивание гиперребра, которое заключается в отождествлении всех инцидентных этому ребру вершин и удалении реализованной связи. Каждый отдельный «акт сборки» заключается в установке детали (сборочной единицы) на собранный фрагмент изделия, который в терминах гиперграфовой модели представляется одной вершиной. Это означает, что в процессе стягиваний гиперребра высоких степеней «схлопываются» и превращаются в гиперребра степени 2, как показано на рис. 3,б. Стартовое состояние процесса сборки задается исходным гиперграфом (см. рис. 3,а), финальное состояние – одновершинным гиперграфом (см. рис. 3,в), в котором реализованы все связи.

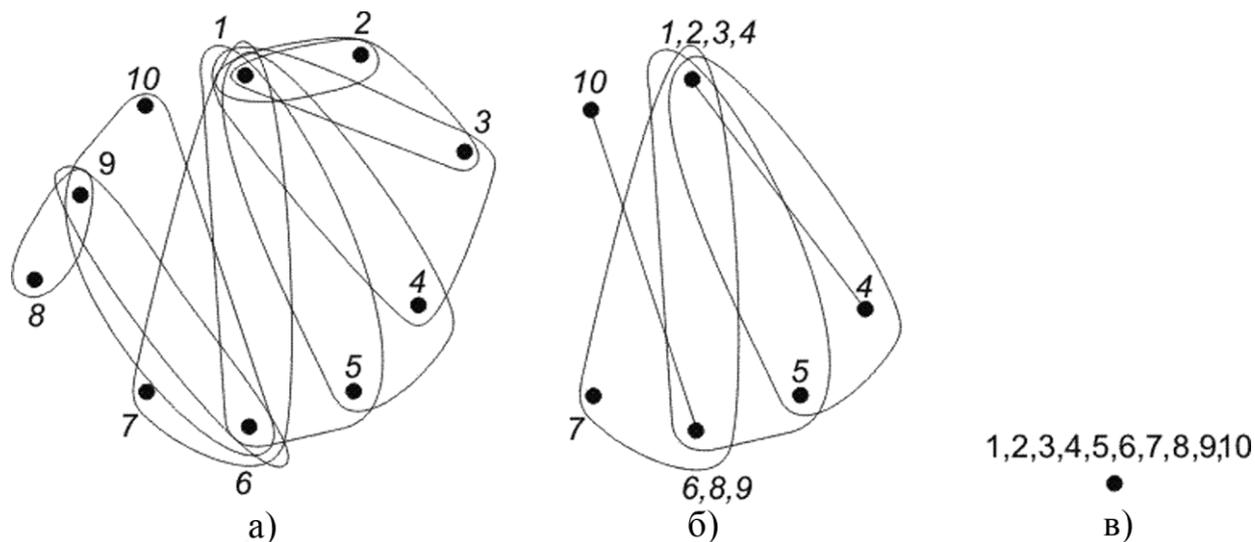


Рис. 3. Гиперграфы, описывающие стартовое (а) и промежуточное (б) и финальное (в) состояния сборочного процесса

Определение 1. Гиперграф $H = (X, R, W)$ назовем стягиваемым (s-гиперграфом), если существует последовательность $H_0 \dots H_{n-1}$, для элементов которой выполняются следующие требования [9]:

1. $H_0 = H$;
2. H_{n-1} представляет собой одновершинный гиперграф;
3. для всех H_j и $H_{j+1} \in P(H)$, $j = \overline{0, n-2}$ справедливо соотношение $|R_j| - 1 = |R_{j+1}|$;
4. каждый элемент последовательности H_{j+1} получается из предыдущего H_j стягиванием ребра кратности 2, $j = \overline{0, n-2}$. Будем называть такое стягивание нормальным.

Значительный практический и научный интерес представляют формулировки необходимых и достаточных условий стягиваемости гиперграфов, задающих механические структуры изделий различных классов. В работах [8-10] приводится

несколько утверждений, относящихся к стягиваемости гиперграфов механических связей изделий, элементы которых ведут себя как абсолютно твердые тела в процессе сборки. Приведем основные результаты.

Утверждение. Пусть существует последовательность нормальных стягиваний гиперграфа $H = (X, R, W)$, переводящая H в одновершинный гиперграф без петель. Тогда выполняются условия:

среди ребер H существует по крайней мере одно ребро степени 2; (1)

гиперграф является связным; (2)

количество вершин $|X|$ и ребер $|R|$ гиперграфа H удовлетворяют линейному ограничению $|X| = |R| + 1$. (3)

В [8] приводится доказательство этого важного утверждения, в данной работе ограничимся лишь содержательными аргументами в пользу его справедливости. Необходимость условия (1) доказывает первая операция нормального стягивания, которая применяется к вершинам исходного гиперграфа. Связность (2) следует из существования последовательности нормальных стягиваний, переводящей гиперграф в точку. Рассмотрим более подробно условие (3).

В процессе сборки любого изделия координация и закрепление первой детали или сборочной единицы (СЕ) выполняется посредством внешнего приспособления, поэтому она не нуждается во внутреннем базировании. Для установки любого другого элемента (детали или СЕ) требуется только один комплект конструкторских баз, который определяет его положение относительно собранного фрагмента. Это значит, что количество полных комплектов баз должно быть на единицу меньше общего числа деталей изделия. В гиперграфовых терминах это выражается простым линейным соотношением $|X| = |R| + 1$.

Если $|X| > |R| + 1$, то гиперграф превращается в плохо скоординированную структуру, поскольку его существующих связей оказывается недостаточно для фиксации положения каждой вершины в смысле определения 1. Если $|X| \gg |R| + 1$, то гиперграф может стать настолько разреженным, что потеряет формальную связность.

Обсудим очень важный с прикладной и теоретической точек зрения случай, когда справедливо неравенство $|X| < |R| + 1$. Это соотношение свидетельствует об избытке механических связей и влечет за собой эффект перебазирования.

Избыточность связей и перебазирование

Пребазирование – это ситуация, когда установка некоторой детали или сборочной единицы выполняется с одновременной координацией по двум или более полным комплектам конструкторских баз.

Рассмотрим перебазирование на примере узла, приведенного на рис. 1. Пусть детали с номерами с 1 до 4 собраны. Рассмотрим связи, соединяющие остальные детали узла. Гиперграф, представляющий данную сборочную ситуацию, представлен на рис. 4,а. Он удовлетворяет условиям стягиваемости и процедура нормальных стягиваний гиперребер

превращает его в одновершинный гиперграф за 6 операций. Между деталями 9 и 10 нет механической связи, поскольку на приведенном чертеже их разделяет прокладка. Предположим, что она отсутствует, и эти детали находятся в контакте друг с другом. (В некоторых альбомах машиностроительных чертежей подобные узлы изображаются без прокладки.) Тогда гиперграф механических связей будет выглядеть так, как показано на рис. 4,б, и для него $|X| < |R| + 1$.

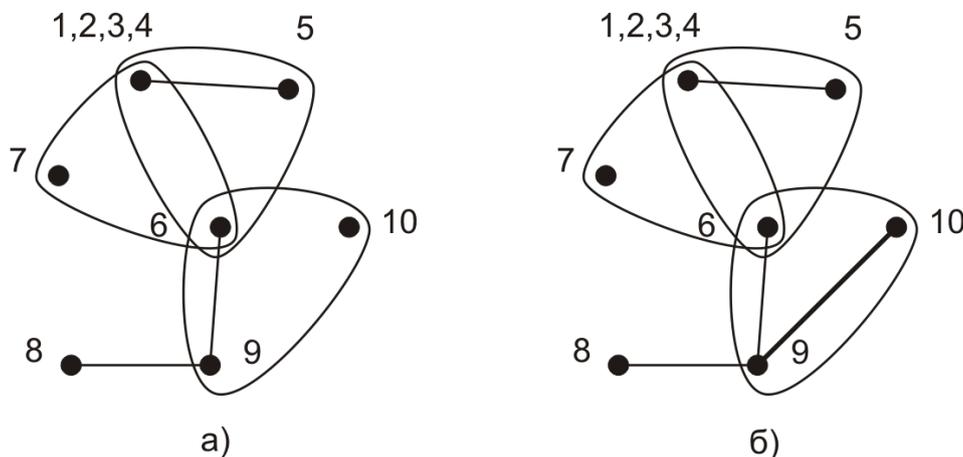


Рис. 4. Гиперграф после стягивания вершин 1-4: без связи между вершинами 9 и 10 (а), со связью между вершинами 9 и 10 (б)

Легко проверить, что любая последовательность сборки изделия со структурой, показанной на рис. 4,б, приводит к необходимости установки крышки (поз 10 на рис. 1), с ориентацией по двум полным комплектам конструкторских баз. Некоторые сборочные ситуации такого типа представлены на рис. 5.

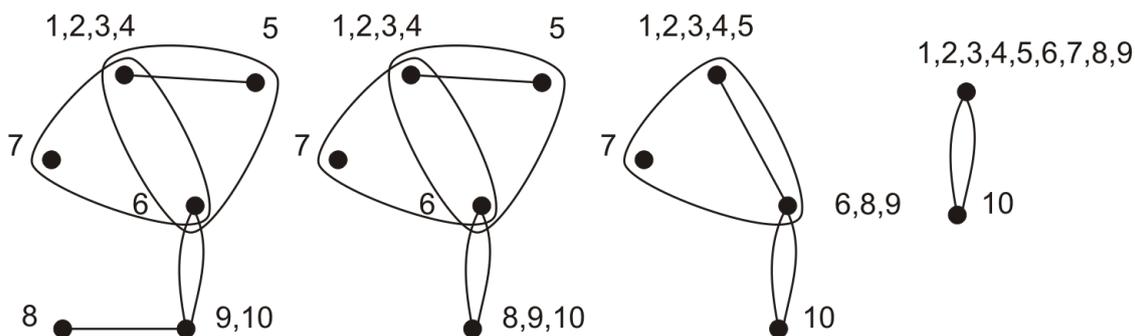


Рис. 5. Модели сборочных ситуаций с перебазированием

Такая геометрическая и механическая переопределенность крайне нежелательна, поскольку порождает неразрешимые размерные цепи и требует специальных технологических мероприятий по устранению избыточных механических связей.

Практика технологической подготовки производства показывает, что в конструкциях машин средней и высокой сложности, с большим числом деталей и механических связей,

достаточно часто встречаются избыточные механические связи, вызывающие эффект перебазирования [11]. Тому имеется множество причин, например погрешности проектирования, толкование кинематических связей как позиционных, условности изображения конструктивных элементов на сборочных чертежах и противоречия в ЕСКД и пр. Не свободно от ошибок данного типа и компьютерное геометрическое моделирование и автоматизированное проектирование, поскольку современные САД-системы не имеют средств анализа механических структур на корректность и избыточность.

Постановка задачи

Пусть гиперграф $H = (X, R, W)$, описывающий механические связи некоторого изделия, содержит избыточные ребра, то есть для H выполняется не равенство $|X| < |R| + 1$. Требуется устранить избыточность и привести гиперграф к линейному ограничению (3) удалением $|R| - |X| + 1$ ребер, не нарушив при этом условий (1) и (2).

Определение 2. Операцию удаления избыточных ребер в гиперграфе H , в результате которой он становится стягиваемым, будем называть линейризацией.

Эта операция может продуцировать гиперграфы, обладающие различными структурными свойствами и, тем самым, влиять на поведение изделия в процессе сборки, эксплуатации и ремонта. Реальные проектные ситуации, возникающие в технологической и практике, дают основания для формулировки различных критериев оптимальности в задаче линейризации гиперграфа механических связей. Приведем несколько практически важных и теоретически интересных критериев линейризации.

1. Объединение заданных деталей в одну сборочную единицу. Например, этого требуют детали, для которых необходима операция совместного контроля, пригонки или регулировки.
2. Согласованность с системой конструкторских размерных цепей. Детали, которые формируют замыкающий размер конструкторской размерной цепи, должны быть установлены после деталей-носителей составляющих звеньев.
3. Замкнутость относительно конструкторской размерной схемы. Детали, образующие каждую размерную цепь конструкторской размерной схемы, должны входить в отдельную сборочную единицу.
4. Возможность сборки изделия в некоторой фиксированной последовательности. Данная последовательность может быть типовой, групповой для класса изделий или просто обусловлена технологической практикой данного производства.
5. Существование заданной схемы сборочного состава. Это важный и очень трудный для реализации критерий, частным случаем которого является принцип идентичности технологической и конструкторской структур изделия.
6. Собираемость. Высокая собираемость означает, что изделие допускает большое число различных последовательностей сборки. Это дает основания для постановки и

решения различных задач рационального выбора, в которых решающими правилами служат технологические или экономические критерии. Чем больше число возможных последовательностей сборки, тем менее жесткими являются условия базирования. Это значит, что последующий выбор по технологическим или экономическим критериям будет располагать более богатым набором альтернатив.

7. Расчленяемость. Расчленяемость представляет собой способность конструкции делиться на фрагменты, которые могут собираться независимо друг от друга. Если конструкция обладает хорошей расчленяемостью, то это значит, что ее проще реализовать в различных производственных и технологических системах, особенности которых могут быть неизвестны на стадии конструирования. Для конструкций такого типа упрощаются процедуры разборки при полном или селективном ремонте. Их легче адаптировать к различным планировкам производственных помещений и типам производства.

Анализ показывает, что все перечисленные свойства являются структурными свойствами изделия. Они закладываются на стадии конструкторской подготовки производства, существуют латентно в виде избыточной системы соединений и сопряжений, и объективируются на этапе технологической подготовки в форме линеаризованного гиперграфа механических связей.

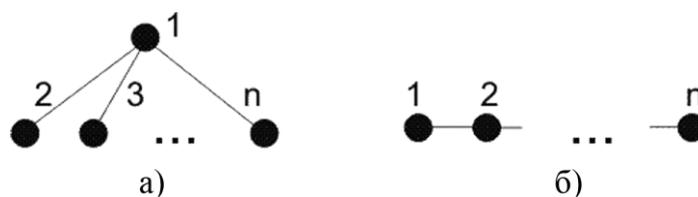


Рис. 6. Простейшие s -гиперграфы: звезда (а) и цепь (б)

Рассмотрим две простейшие механические структуры, приведенные на рис.6. Здесь показаны s -гиперграфы (звезда и цепь) с одинаковым числом вершин, но полярными структурными свойствами. Легко видеть, что звезда – это структура изделия, которое не допускает декомпозиции на сборочные единицы, но отличается высокой собираемостью. Она имеет $(n-1)!$ различных последовательностей нормальных стягиваний – максимальное число среди всех s -гиперграфов равной мощности. Напротив, цепь допускает всего лишь $2(n-1)$ таких последовательностей, но этот гиперграф демонстрирует высокую способность к декомпозиции, то есть расчленяемость. В самом деле, независимое стягивание возможно для любых двух соседних вершин цепи. В результате получается более короткая цепь, которая, в свою очередь, наследует это свойство.

Задача в общей постановке, когда в гиперграфе могут присутствовать ребра любой степени (кратности), а его избыточность может быть сколь угодно велика, представляет большой теоретический интерес, но кажется трудной для исчерпывающего аналитического решения. Гиперграфы, порожденные реальными конструкциями, имеют

существенные ограничения на число ребер и степень вершин. Можно утверждать, что для изделий, детали которых при сборке ведут себя как абсолютно твердые тела, максимальная степень ребер гиперграфа механических связей равна 4. Это число деталей в группировке, где одна из деталей базируется по классической схеме с ориентацией по трем конструкторским базам: установочной, направляющей и опорной. Причем, эти базы принадлежат разным деталям изделия.

Намного сложнее получить оценку верхней границы избыточности, то есть максимальное значение величины $E = |R| - |X| + 1$. Это число зависит от множества факторов, которые зачастую трудно учесть и измерить, например числа деталей, типа технической системы, отраслевой принадлежности изделия, оригинальности конструкции, глубины проработки проекта и много другого. Анализ массива чертежей изделий общего машиностроения (муфт, редукторов, коробки скоростей и пр.) показал, что эти хорошо отработанные конструкции отличаются сравнительно невысокой избыточностью связей [11]. На основе выборки из тридцати изделий разной сложности получена верхняя оценка избыточности связей – $E \approx 0,1 \times V$, то есть количество лишних связей не превышает 10% от числа вершин изделия. Можно уверенно полагать, что для у конструкций, не прошедших столь глубокую проверку, избыточность будет выше.

В работе [9] обсуждается линеаризация гиперграфа механических связей по критерию максимальной собираемости. Эта задача рассмотрена в общей постановке, когда не учитываются описанные ограничения на степени гиперребер и число лишних связей. Предложен эвристический алгоритм линеаризации, а его состоятельность подтверждена вычислительным экспериментом.

Авторы данной статьи разработали эвристический алгоритм линеаризации гиперграфов по критерию максимальной расчленяемости. Он основан на следующих допущениях:

1. Все механические связи считаются равноценными. Это значит, что не учитывается подлинная конструкторская значимость каждой связи и в процессе решения задачи может быть удалена любая из них.
2. Максимальная степень гиперребер равна 4.
3. Количество гиперребер, подлежащих удалению в процессе линеаризации, удовлетворяет соотношению $E \approx 0,1 \times V$.

Этот алгоритм и необходимые вычислительные эксперименты, подтверждающие его корректность будут описаны в следующей статье.

Выводы

1. Отношение базирования деталей изделия имеет переменную местность, поэтому, в общем случае, его невозможно описать в графовых терминах. Гиперграф является корректной математической моделью позиционных механических связей, доставляющих деталям определенность положения в составе изделия.

2. Если в процессе сборки детали изделия можно рассматривать как абсолютно твердые тела, то количество ребер гиперграфа механических связей должно быть на единицу меньше числа вершин. Нарушение этого условия превращает механическую структуру в недоопределенную или переопределенную. В первом случае недостаток взаимной координации деталей делает сборку невозможной, во втором случае избыток связей влечет за собой перебазирование. Большая часть конструкций является переопределенными и содержат избыточные механические связи.
3. В работе рассмотрены различные критерии удаления избыточных механических связей. Подробно обсуждается критерий максимальной расчленяемости, позволяющий получить механическую структуру, которая допускает множество различных схем сборочного состава.

Список литературы

1. Daniel E. Whitney. Mechanical Assemblies: Their Design, Manufacture, and Role in Product Development. Oxford University Press, 2004. 518 p.
2. De Fazio T., Whitney D.E. Simplified generation of all mechanical assembly sequences // IEEE Journal of Robotics and Automation. 1987. Vol. 3, no. 6. P. 640-658. DOI: [10.1109/JRA.1987.1087132](https://doi.org/10.1109/JRA.1987.1087132)
3. Antonsson E.K., Cagan J. Formal Engineering Design Synthesis. Cambridge University Press, 2005. 500 p.
4. Homem De Mello L.S., Sanderson A.C. A correct and complete algorithm for the generation of mechanical assembly sequences // IEEE Transactions on Robotics and Automation. 1991. Vol. 7, no. 2. P. 228- 240. DOI: [10.1109/70.75905](https://doi.org/10.1109/70.75905)
5. Lee Y. Q., Kumara S. R. T., Individual and group disassembly sequence generation through freedom and interference spaces // Journal of Design and Manufacturing. 1992. Vol. 2. P. 143-154.
6. Homem de Mello L.S., Lee S. Computer-Aided Mechanical Assembly Planning. Springer US, 1991. 464 p. (The Springer International Series in Engineering and Computer Science; vol. 148). DOI: [10.1007/978-1-4615-4038-0](https://doi.org/10.1007/978-1-4615-4038-0)
7. Айгнер М. Комбинаторная теория: пер. с англ. М.: Мир, 1982. 558 с.
8. Божко А. Н., Бетин Е. А. Анализ стягиваемости гиперграфов // Информационные технологии. 2005. № 12. С. 6-12.
9. Божко А. Н., Сюсюкалов Б. С. Математические модели базирования и избыточности в механических системах // Информационные технологии. 2014. № 3. С. 13-18.
10. Божко А.Н. Выбор рациональной последовательности сборки изделия // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2010. № 7. Режим доступа: <http://technomag.edu.ru/doc/147483.html> (дата обращения 01.10.2014).

11. Жуков К.П., Гуревич Ю.Е. Атлас конструкций механизмов, узлов и деталей машин. М.: Станкин, 2004. 671 с.
12. Исследования по прикладной теории графов: сб. ст. / Под ред. А.С. Алексева. Новосибирск: Наука, 1986. 169 с.
13. Павлов В.В. Математическое обеспечение САПР в производстве летательных аппаратов. М.: МФТИ, 1978. 68 с.
14. Сборка и монтаж изделий машиностроения: справочник. В 2 т. Т. 1 / под ред. В.С. Корсакова, В.К. Замятина. М.: Машиностроение, 1983. 480 с.
15. Своятыцкий Д.А. Моделирование процессов сборки в робототехнических комплексах. Минск: Наука и техника, 1983. 93 с.
16. Челищев Б.Е., Боброва И.В., Гонсалес-Сабатер А. Автоматизация проектирования технологии в машиностроении. М.: Машиностроение, 1987. 264 с.

Decomposition Criterion-based Redundancy Removal in Mechanical Structures

A.N. Bozhko^{1,*}, A.S. Krivolapova¹

[*abozhko1@gmail.com](mailto:abozhko1@gmail.com)

¹Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

Keywords: mechanical structure, mechanical connection, assembly, base, redundancy, hypergraph, decomposition

The most important design solutions of production engineering for the assembly operation are an assembly sequence and assembly chart. Both are closely linked with each other and therefore are recorded in the single process flow sheet that is an assembly chart.

Capability for successive order assembling and splitting into assembly units depends on a set of the product design properties from which the main ones are position mechanical connections used to locate details within a product. An adequate mathematical model of the mechanical connections of technical system is a hyper graph. It allows us to give the correct description of the location relation of variable-locality.

The analysis of the array of drawings shows that many designs contain redundant mechanical connections. The inequality $|R| - |X| + 1 > 0$ is a criterion of redundancy, where $|X|$ is the number of tops of the hyper graph (details), and $|R|$ is the number of hyper edges (full assembly bases). Excess of mutual coordination is a harmful phenomenon which at designing stage exhibits as unsolvable dimension chains, while at the assembly stage it shows as relocation. Redundant connections should be removed from a design at the earliest design-for-manufacturing stages. Removal of connections generates mechanical structures with different assembly properties. The work offers some important criteria of generation of irredundant mechanical structures. The paper considers in detail a maximum decomposition criterion, which allows us to receive structures with the greatest capability to split into assembly units. It shows that such structures exhibit high flexibility in assembling and are adaptable to various specifications and production processes.

References

1. Daniel E. Whitney. *Mechanical Assemblies: Their Design, Manufacture, and Role in Product Development*. Oxford University Press, 2004. 518 p.

2. De Fazio T., Whitney D.E. Simplified generation of all mechanical assembly sequences. *IEEE Journal of Robotics and Automation*, 1987, vol. 3, no. 6, pp. 640-658. DOI: [10.1109/JRA.1987.1087132](https://doi.org/10.1109/JRA.1987.1087132)
3. Antonsson E.K., Cagan J. *Formal Engineering Design Synthesis*. Cambridge University Press, 2005. 500 p.
4. Homem De Mello L.S., Sanderson A.C. A correct and complete algorithm for the generation of mechanical assembly sequences. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 1991, vol. 7, no. 2, pp. 228- 240. DOI: [10.1109/70.75905](https://doi.org/10.1109/70.75905)
5. Lee Y. Q., Kumara S. R. T., Individual and group disassembly sequence generation through freedom and interference spaces. *Journal of Design and Manufacturing*, 1992, vol. 2, pp. 143-154.
6. Homem de Mello L.S., Lee S. *Computer-Aided Mechanical Assembly Planning*. Springer US, 1991. 464 p. (*The Springer International Series in Engineering and Computer Science*; vol. 148). DOI: [10.1007/978-1-4615-4038-0](https://doi.org/10.1007/978-1-4615-4038-0)
7. Aigner M. *Combinatorial Theory*. New York, Springer New York, 1979. 483 p. DOI: [10.1007/978-1-4615-6666-3](https://doi.org/10.1007/978-1-4615-6666-3) (Russ. ed.: Aigner M. *Kombinatornaia teoriia*. Moscow, Mir Publ., 1982. 558 p.).
8. Bozhko A. N., Betin E. A. On a Contractability Property of Hypergraphs. *Informatsionnye tekhnologii = Information Technology*, 2005, no. 12, pp. 6-12. (in Russian).
9. Bozhko A. N., Syusyukalov B. S. Mathematical Models for Basing and Redundancy in Mechanical Systems. *Informatsionnye tekhnologii = Information Technology*, 2014, no. 3, pp. 13-18. (in Russian).
10. Bozhko A.N. Choice of rational balance of assembly of a product. *Nauka i obrazovanie MGTU im. N.E. Baumana = Science and Education of the Bauman MSTU*, 2010, no. 7. Available at: <http://technomag.edu.ru/doc/147483.html> , accessed 01.10.2014. (in Russian).
11. Zhukov K.P., Gurevich Yu.E. *Atlas konstruksiy mekhanizmov, uzlov i detaley mashin* [Atlas of constructions of mechanisms, components and parts of machines]. Moscow, Stankin Publ., 2004. 671 p. (in Russian).
12. Alekseev A.S., ed. *Issledovaniya po prikladnoy teorii grafov: sb. st.* [Research in applied graph theory: collected papers]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1986. 169 p. (in Russian).
13. Pavlov V.V. *Matematicheskoe obespechenie SAPR v proizvodstve letatel'nykh apparatov* [CAD mathematical software in aircraft production]. Moscow, MFTI Publ., 1978. 68 p. (in Russian).

14. Korsakov V.S., Zamyatin V.K. *Sborka i montazh izdeliy mashinostroeniya: spravochnik. V 2 t. T. 1* [Assembly and installation of mechanical engineering products: handbook. In 2 vols. Vol. 1]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1983. 480 p. (in Russian).
15. Svoyatytskiy D.A. *Modelirovanie protsessov sborki v robototekhnicheskikh kompleksakh* [Modeling of assembly processes in robotic complexes]. Minsk, Nauka i tekhnika Publ., 1983. 93 p. (in Russian).
16. Chelishchev B.E., Bobrova I.V., Gonsales-Sabater A. *Avtomatizatsiya proektirovaniya tekhnologii v mashinostroenii* [Computer-aided design of mechanical engineering technology]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1987. 264 p. (in Russian).