

Математика и математическое моделирование. 2019.
№ 06. С. 1 – 18.

DOI: [10.24108/mathm.0619.0000206](https://doi.org/10.24108/mathm.0619.0000206)



© А.Н. Божко, А.С. Домников, С.В. Родионов

Математика Математическое МОДЕЛИРОВАНИЕ

Сетевое научное издание

<http://mathmelpub.ru>

ISSN 2412-5911

УДК 519.711.2

Выбор рациональной последовательности сборки изделия как задача принятия решений

Божко А.Н.^{1,*}, Домников А.С.¹,
Родионов С.В.¹

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

* abozhko@inbox.ru

В работе предлагается новый метод выбора рациональной последовательности сборки, основанный на использовании аппарата теории принятия решений. Предложена формализация важных конструкторских и технологических эвристик: согласованность с системой размерных цепей, геометрическая «свобода» при сборке, монотонность по габаритам, весу, точности и др.

Ключевые слова: сборка; последовательность сборки; функция выбора; теория принятия решений; эвристика; автоматизация проектирования сборочных процессов

Представлена в редакцию: 10.11.2019, исправлена 24.11.2019

Введение

Автоматизированный синтез процессов сборки сложных технических систем (Computer aided assembly planning, СААР) – это важная проблема инженерной практики и теории проектирования. Она особенно актуальна для современных роботизированных производств, в которых технологические инструкции на сборку должны быть описаны с предельной глубиной и детализацией. Различные аспекты СААР активно обсуждаются в публикациях, посвященных автоматизированному проектированию сложных технических систем и процессов [1-4]. Последовательность сборки – это ключевое проектное решение, от которого зависят многие эксплуатационные свойства изделия и экономические характеристики производства.

С теоретической точки зрения синтез рациональной последовательности сборки (Assembly sequence planning, ASP) изделия представляет собой сложную вычислительную задачу. В [5] доказано несколько важных теорем и получены оценки временной и пространственной сложности задачи ASP. В [6] и [7] описаны различные постановки задачи ASP, рассмотрена их сводимость и показано, что основные ее варианты относятся к классу NP-трудных задач.

В [8] рассмотрены базовые комбинаторные модели, которые используются для описания последовательности сборки и декомпозиции изделия на сборочные единицы (Subassembly units): Partial assembly tree (дерево сборки), State sequence (кортеж состояний), Directed graph (направленный граф), AND/OR graph (И – ИЛИ-граф), AND/OR tree (И – ИЛИ-дерево) и др. Получены зависимости числа допустимых комбинаторных объектов от количества вершин. Расчеты выполнены для трех самых простых графовых моделей: цепь, цикл и дерево с диаметром 2. Показано, что число этих объектов растет с факториальной скоростью.

Конструкции, которые встречаются в инженерной практике, отличаются от искусственно усложненных геометрических объектов, используемых в теоретических исследованиях. Однако, опыт технологической подготовки производства свидетельствует, что задача выбора рациональной последовательности сборки изделия очень быстро усложняется с ростом числа деталей и комплектующих [9]. В [10-13] показано, что множество допустимых альтернатив в задаче ASP увеличивается по экспоненте и, в некоторых случаях, даже быстрее. В [10] доказано, что если ограничиться только конструктивными ограничениями (Hard constraints) на допустимые сборочные планы, то рациональное решение не может быть найдено прямым перебором. В [11] предложена оценка $k(n)$ мощности множества допустимых вариантов решения задачи ASP: Показано, что $2^n \leq k(n) < n!$, где n – число деталей изделия.

В большинстве работ по СААР и ASP допустимыми считаются последовательности сборки, которые являются когерентными и геометрически разрешимыми [12,13]. Это значит, что на каждой сборочной операции реализуются механические связи (когерентность) и отсутствуют геометрические препятствия, запрещающие движение монтируемой детали в служебное положение (геометрическая разрешимость). Это минимальные конструкторские ограничения, нарушение которых исключает проектное решение из числа допустимых.

В последнее время опубликовано большое число исследований, в которых для выбора оптимальной последовательности сборки используются различные методы поисковой оптимизации, основанные на биологических и поведенческих аналогиях [14]. В подавляющем большинстве этих работ не обсуждают методы синтеза последовательностей сборки, которые допускает конструкция. Авторы полагают, что данное множество задано априори. Основная цель исследований – поиск эффективных методов, способных выбрать рациональную последовательность сборки из исходного множества альтернатив очень высокой мощности.

По своей математической постановке – это дискретная экстремальная задача. Приведем ее общую математическую постановку. На конечном множестве альтернатив $Y = \{y_i\}_{i=1}^{|Y|}$ определена целевая функция $F: Y \rightarrow R^+$, принимающая положительные рациональные значения. Требуется найти $\underset{y \in Y}{\operatorname{argextr}} F(y)$.

Отметим две особенности ASP как дискретной экстремальной задачи:

1. большая мощность множества альтернатив: $2^n \leq |Y| < n!$;

2. альтернативы являются структурными, а не элементарными объектами.

В [4, 15-18, 19, 20] упоминается большое число публикаций, посвященных оптимизации последовательности сборки сложных технических систем. В обзорах [15-18] приведено более трех сотен статей, в которых для решения ASP использованы методы поисковой оптимизации.

В [19] собрана статистика применения методов поисковой оптимизации для решения задачи ASP (рис. 1).

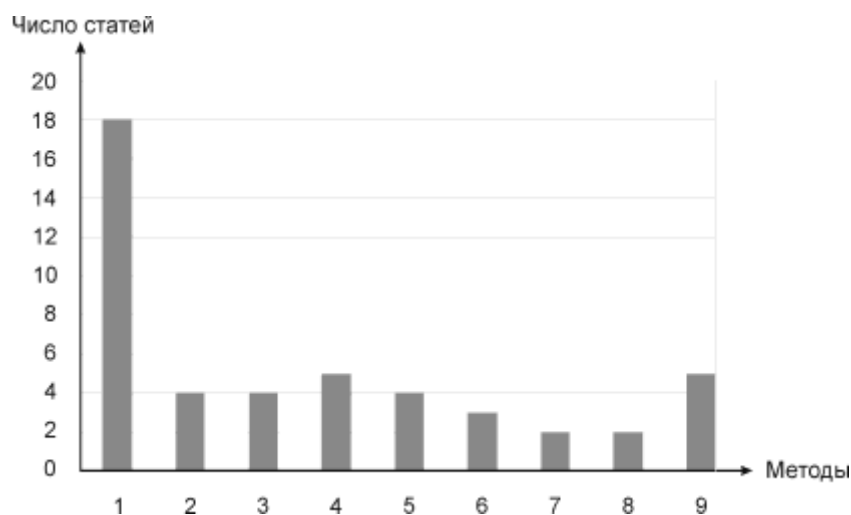


Рис. 1. Применение методов поисковой оптимизации для решения задачи ASP [19]:

- 1 – генетические алгоритмы; 2 – алгоритмы эмуляция отжига; 3 – алгоритмы колонии муравьев;
4 – алгоритмы роя частиц; 5 – нейронные сети; 6 – иммунные алгоритмы; 7 – меметические алгоритмы;
8 – эволюционные алгоритмы; 9 – гибридные алгоритмы

В большинстве работ качество альтернатив в задаче ASP оценивают одним критерием. В [21,22] обсужден многокритериальный выбор рациональных последовательностей сборки. Для оценки качества альтернатив используют следующие характеристики технологического процесса: совокупная стоимость сборки, общее время сборки, сложность сборочных операций, число направлений сборки, количество переориентаций монтируемых деталей, использование специальных приспособлений, сложность сборочных траекторий и др. [23].

На рис. 1 показано, что в относительном большинстве исследований (около 30%) использованы различные варианты генетического алгоритма. Как правило, генами являются детали изделия, а хромосомы – перестановки деталей, описывающие последовательности сборки, допустимые по различным конструктивным ограничениям. Создание новых хромосом выполняется посредством стандартных генетических операторов: селекция, кроссовер и мутация.

Опыт показал, что генетические операторы часто создают хромосомы, которые соответствуют последовательностям сборки, нарушающим основные конструкторские ограничения: когерентность и геометрическая разрешимость. Это главный недостаток генетической парадигмы решения ASP [20].

В инженерной практике накоплено множество технологических знаний о сборке изделий различного функционального назначения. В большинстве своем, это неформализованные данные, существующие в виде правил, рекомендаций, рецептов, эвристик, предпочтений эксперта, описаний успешных прецедентов и др. Поэтому выбор рациональной последовательности сборки сложного изделия является плохо определенной и слабо структурированной задачей, которая не может быть корректно решена при помощи методов математического программирования и поисковой оптимизации. В работе предлагается новый метод выбора рациональной последовательности сборки, основанный на использовании аппарата теории принятия решений.

Постановка задачи

Задачей принятия решений (ЗПР) называется пара (A, C) , в которой A – множество допустимых вариантов решения (исходное множество альтернатив, ИМА), а C – функция выбора $C: 2^A \rightarrow 2^A$, которая любому подмножеству вариантов $Y \subseteq A$ ставит в соответствие подмножество лучших альтернатив $C(Y) \subseteq Y$ [24].

В работе считается, что допустимым вариантом в задаче ASP является последовательность сборки изделия, которая удовлетворяет условиям когерентности и геометрической разрешимости (геометрического доступа). В [12, 13] предложены методы генерации альтернатив с такими свойствами, поэтому в данной статье они не рассматриваются.

Математическим описанием допустимых альтернатив служит перестановка номеров деталей или линейный порядок на множестве деталей изделия. Переход между этими математическими описаниями очевиден, поэтому без оговорок будем использовать способ, более удобный в данном контексте. Пусть X – техническая система, а $\{x_i\}_{i=1}^n$ – множество деталей. Исходным множеством альтернатив A в задаче ASP являются допустимые последовательности сборки изделия X , представленные в виде перестановок деталей $(x_{i_1}, x_{i_2}, \dots, x_{i_n}), x_{i_k} \in X, k = \overline{1, n}$ или в виде линейно-упорядоченных множеств.

Формализация эвристик

Рассмотрим несколько важных частных функций выбора, которые используются в инженерной практике для выбора рациональных сборочных планов.

Согласованность с системой конструкторских размерных цепей.

Последовательность сборки изделия должна быть согласована с системой конструкторских размерных цепей. Нарушение этого принципа может повлечь за собой появление неразрешимых размерных цепей. Обозначим C_1 функцию выбора, которая формализует данную эвристику.

Введем на множестве деталей $X = \{x_i\}_{i=1}^n$ технической системы X бинарное отношение $RC \subseteq X \times X$. Две детали x и y состоят в отношении $xRCy$, в том и только том случае, когда собственные поддетальные размеры x и y включены в одну конструкторскую сборочную размерную цепь изделия X .

Легко проверить, что отношение RC обладает следующими свойствами:

1. $\forall x \in X xRCx$ (рефлексивность);
2. $\forall x, y \in X$ из $xRCy$ следует $yRCx$ (симметричность).

Отношение с такими свойствами является отношением толерантности [25].

Рассмотрим транзитивное замыкание $T(RC)$ отношения RC . Транзитивное замыкание $T(RC) = RCURC^2URC^2U\dots URC^n$ – это минимальное транзитивное бинарное отношение, включающее толерантность RC . $T(RC)$ – рефлексивное, симметричное и транзитивное отношение, то есть является эквивалентностью на $X = \{x_i\}_{i=1}^n$. Эта эквивалентность разбивает множество $X = \{x_i\}_{i=1}^n$ на непересекающиеся классы. В классы входят детали, собственные размеры которых входят в одну размерную цепь. Отношение эквивалентности $T(RC)$ на X индуцируется системой конструкторских размерных цепей.

В процессе сборки изделия замыкающее звено получается автоматически в результате реализации составляющих звеньев размерной цепи. Данная упорядоченность переносится на детали изделия. А именно, детали-носители составляющих звеньев, в любой корректной последовательности сборки должны предшествовать деталям, которые ограничивают замыкающее звено. Это правило порождает в классах эквивалентности $T_k \in T(RC)$ собственное отношение частичного порядка. Обозначим его (T_k, \leq_k) .

В инженерной практике многократно подтвержден принцип, согласно которому сборку изделия необходимо начинать с самой длинной и важной размерной цепи [9]. Для формализации данного правила классам эквивалентности $T_k \in T(RC)$ сопоставим вектор (φ_k, n_k) , где φ_k – приоритет класса, а n_k – количество звеньев размерной цепи. Приоритет φ_k – это численная оценка важности и сложности размерной цепи, полученная экспертным путем.

Введем на классах $T_k \in T(RC)$ порядковое отношение следующим образом:

$$T_k \leq T_l \Leftrightarrow (\varphi_k, n_k) \geq (\varphi_l, n_l), \text{ что означает } \varphi_k \geq \varphi_l \wedge n_k \geq n_l.$$

На множестве $X = \{x_i\}_{i=1}^n$ определим композицию отношений порядка $P \subseteq X \times X$, формализующую как упорядоченность деталей внутри классов, так и ранжировку классов $T_k \in T(RC)$ как самостоятельных объектов. А именно, $\forall x, y \in X xPy$, если $x \leq y$ или $x \in T_k, y \in T_l$ и $T_k \leq T_l$. Упорядоченное множество (X, P) , заданное подобным образом, является упорядоченной суммой упорядоченных множеств [25]. В общем случае, множество (X, P) не является линейно-упорядоченным.

Обозначим $\sigma(X, P)$ совокупность всех линейных продолжений частичного порядка (X, P) . Все линейные порядки из $\alpha(X, P)$ сохраняют порядковые предпочтения пар деталей, порожденные размерной схемой, поэтому они являются корректными. Определим функцию выбора $C_1(Y)$ следующим соотношением $C_1(Y) = Y \cap \sigma(Y, P)$. Эта функция

предъявления Y выбирает такие и только такие линейные порядки (перестановки), которые не противоречат заданным конструкторским ограничениям.

Геометрическая «свобода»

Процесс сборки сложных изделий в значительной степени зависит от геометрических ограничений, которые собранный фрагмент изделия накладывает на возможные траектории монтируемых деталей. Сборка в условиях ограниченного геометрического доступа часто требует специальных приспособлений и может значительно увеличить длительность и стоимость технологического процесса.

В [26] разработаны теоретико-решеточные методы синтеза когерентных и геометрически разрешимых сборочных планов. Основными носителями проектной информации для этих задач служат решетки $F(X)$ и $D(X)$. На рис.2 изображена конструкция крепления вала и две решетки $F(X)$ и $D(X)$, описывающие допустимые сборочные планы данной конструкции. Решетка $D(X)$ нарисована с эмфазой. Вершины соответствуют совокупностям деталей, которые можно собрать независимо. Ребра описывают вхождение решеточных элементов. Максимальный элемент (1) – изделие, минимальный элемент (0) – пустое множество. Любая (0,1)-цепь в $F(X)$ соответствует когерентной последовательности сборки, (0,1)-цепи в $D(X)$ представляют собой когерентные и геометрически разрешимые сборочные планы

Каждой вершине $d \in D(X)$ решетки D сопоставим числовой показатель $N(d)$, равный количеству различных цепей, соединяющих d с максимальным элементом решетки (($d,1$)-цепей). Число $N(d)$ равняется количеству различных подпоследовательностей, которые продолжают сборку от собранного фрагмента d до изделия.

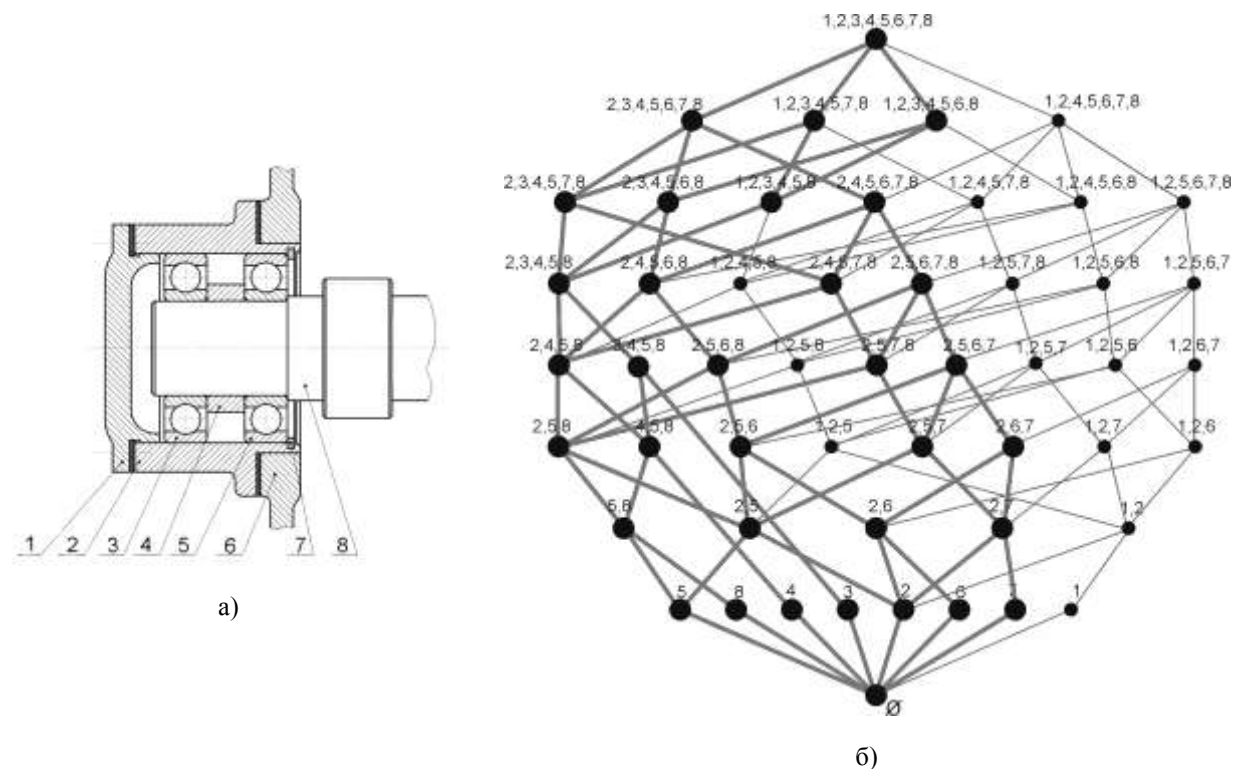


Рис. 2. Конструкция (а), решетки $F(X)$ и $D(X)$ данной конструкции (б)

Пусть $(0,1)$ -цепь $l = (0, d_1, d_2, \dots, d_{n-1}, 1)$, $d_i \in D, i = \overline{1, n-1}$ проходит по вершинам решетки $D(X)$. Сопоставим этой цепи сумму вида $\sum_{i=1}^{n-1} N(d_i)$. Это значение можно использовать для измерения геометрической «свободы» при сборке изделия в заданной последовательности. Чем больше число $\sum_{i=1}^{n-1} N(d_i)$, тем больше вариантов продолжения сборки на каждом шаге.

Обозначим $C_2 : 2^A \rightarrow 2^A$ функцию, которая из каждого предъявления $Y \subseteq A$ выбирает альтернативы с минимальными ограничениями на свободу перемещений деталей при сборке. Эту функцию можно задать следующим соотношением

$$C_2(Y) = \text{Arg max}_{l \in Y} \sum_{i=1}^{n-1} N(d_i).$$

В самом деле, если на некотором шаге процесса сборки геометрические препятствия запрещают установку детали, то для соответствующей вершины $d_k \in D(X)$ решетки $N(d_k) = 0$. И наоборот, пусть геометрические ограничения не являются критическими, тогда интервал $[d_k, 1] \subseteq D(X)$ совпадает с интервалом $[f_k, 1] \subseteq F(X)$, то есть из $d_k = f_k$ следует $[d_k, 1] = [f_k, 1]$. В этом случае числовой показатель геометрической свободы $N(d_k)$ принимает максимальное значение, равное числу $(d_k, 1)$ -цепей в решетке $F(X)$.

Порядковые эвристики

В инженерной практике используется большое число эвристик, которые выражаются в порядковых терминах. Например, точные и легко деформируемые детали должны быть установлены в конце сборочного процесса. Детали, нагруженные механическими связями, (станины, рамы, шасси и др.) монтируются первыми. Приведем несколько функций выбора, которые формализуют экспертные соображения такого типа.

Обозначим $x_1, x_2, \dots, x_k \in X$ – легко деформируемые детали изделия X . При сборке изделия такие детали желательно устанавливать последними. Пусть π – перестановка деталей, описывающая некоторую последовательность сборки X . Через $\pi(x_i)$ обозначим номер детали x_i в перестановке π . Функция $C_{\max}^i(Y) = \text{Argmax}_{\pi \in Y} \pi(x_i)$ из предъявления Y выбирает перестановки с максимальной позицией деформируемой детали x_i . Общий рациональный выбор по всей группе деформируемых деталей выполняет функция $C_3(Y) = \bigcup_{i=1}^k C_{\max}^i(Y)$. В теории принятия решений такие функции называются совокупно-экстремальными [24].

По аналогии с приведенной формализацией введем совокупно-экстремальную функцию $C_4(Y) = \bigcup_{i=1}^k C_{\min}^i(Y)$, которая минимизирует позиции монтируемых деталей в сборочном процессе.

Существует еще несколько характеристик процесса сборки, которые оценивают упорядоченность деталей по значению некоторого числового показателя. Функции выбора, формализующие эти характеристики, являются общими скалярными. Рассмотрим несколько распространенных эвристик такого типа.

Упорядоченность деталей по массе. Обозначим $m(x_i)$ массу детали x_i . Введем функцию $C_5(Y) = \text{Arg min}_{\pi \in Y} (|M(\pi)|)$, где $M(\pi)$ – множество инверсий массы в π , то есть $M(\pi) = \{(x_i, x_j) \mid \pi(x_i) < \pi(x_j) \wedge m(x_i) > m(x_j)\}$.

Упорядоченность деталей по габаритам. Согласно этой эвристике детали с большими габаритами следует устанавливать начале сборочного процесса. Это правило можно формализовать следующим образом

$$C_6(Y) = \text{Arg min}_{\pi \in Y} (|G(\pi)|),$$

где $G(\pi) = \{(x_i, x_j) \mid \pi(x_i) < \pi(x_j) \wedge g(x_i) > g(x_j)\}$, где $g(x)$ –наибольший габаритный размер детали x .

Упорядоченность по сложности операции установки. Показателями сложность монтажа могут быть: число направлений сборки, сложность траекторий перемещения детали, число сборочных переходов, количество применяемых приспособлений и др. Для любого из выбранных показателей сложные операции должны быть выполнены в начале процесса, более простые выполняются в конце. Данную технологическую эвристику формализуем при помощи функции выбора $C_7 : 2^A \rightarrow 2^A$.

Пусть $S : X \rightarrow R^+$ функция, которая каждой детали $x \in X$ ставит в соответствие положительное число $S(x)$, означающее сложность монтажа детали x в изделие X . Очевидно, что числа $S(x)$ индуцируют на X некоторый порядок, который, а общем случае, является частичным, поскольку могут существовать детали с равными значениями показателя сложности. Обозначим этот порядок (X, S) , а множество всех его линейных продолжений – $\sigma(X, S)$. Определим функцию выбора следующим соотношением $C_7 = Y \text{ I } \sigma(Y, S)$. Из каждого предъявления Y эта функция выбирает последовательности, которые антимонотонно согласованы с упорядочением по сложности, заданным функцией S .

Близость к «эталону»

В условиях, когда для принятия рациональных решений недостаточно объективной информации, инженер часто использует прецеденты. В задаче синтеза последовательности сборки прецедент – это некоторая эталонная (типовая, групповая) последовательность сборки изделий данного типа или класса. Пусть P_n – множество допустимых перестановок из n элементов. Обозначим $dist : P_n \times P_n \rightarrow R^+$ функцию расстояния между любыми двумя перестановками из P_n , а λ – перестановку, описывающую эталонную последовательность сборки. Расстояние между любыми двумя перестановками из P_n можно быть вычислено по метрике Дамерау-Левенштейна или более простым способом по формуле

$$dist(\pi_i, \pi_j) = |N(\pi_i \times \pi_j)|,$$

где N задается следующим образом $N(\pi) = \{k, k = \overline{1, n} \mid \pi(k) \neq k\}$. Из множества $Y \subseteq P_n$ функция $C_g(Y) = \underset{\pi \in Y}{\text{Arg min}} dist(\pi, \lambda)$ выбирает перестановки, которые являются ближайшими к эталону в заданной метрике.

Предпочтения эксперта

Аппарат бинарных отношений является естественным языком для описания как объективных (конструкторских, технологических, производственных и др.) ограничений, так и субъективных представлений эксперта при проектировании процесса сборки. Пусть в результате опроса специалиста или группы специалистов получена система предпочтений, формализующее экспертное знание о рациональном плане сборки. Процедуры такого типа широко используются в теории принятия решений для структурирования различных ситуаций принятия решений [24]. Процесс выявления предпочтений называется экспертизой, а источник достоверной информации – лицом принимающим решение (ЛПР).

Пусть система предпочтений ЛПР записана в содержательных терминах «раньше», «позже», «одновременно», «отказ от сравнения». Эти данные можно формализовать при помощи бинарных отношений.

Введем несколько необходимых определений [25]. Бинарное отношение $\tau \subseteq X \times X$ называется отношением предпочтения, если оно рефлексивно, то есть $\forall x \in X \ x \tau x$. Рефлексивное отношение $\tau \subseteq X \times X$ порождает на своем носителе X два подчиненных отношения: доминирования $\alpha \subseteq X \times X$ и безразличия $\beta \subseteq X \times X$. Эти отношения задаются следующим образом: $\beta = \tau \cap \tau^{-1}$, $\alpha = \tau \setminus \beta$. Безразличие на X β – это симметричная часть $\tau \subseteq X \times X$, а доминирование α – его ассиметричную часть. Легко видеть, что всегда выполняется $\alpha \cap \beta = \emptyset$ и $\alpha \cup \beta = \tau$.

Рефлексивное и антисимметричное отношение доминирования описывает превосходство объектов. И наоборот, рефлексивное и симметричное отношение безразличия формализует сходство, подобие, похожесть объектов [24].

В задаче ASP упорядочение деталей выполняется во времени, отношения доминирования и безразличия должны обладать свойством транзитивности, то есть $x\alpha y, y\alpha z \rightarrow x\alpha z$ и $x\beta y, y\beta z \rightarrow x\beta z$. Кроме того, можно полагать, что замена любого объекта на другой объект из X , который находится в отношении безразличия к первому, сохраняет отношение доминирования. Запишем это требование следующим образом: $x\alpha y, y\beta z \rightarrow x\alpha z$ и $x\beta y, y\alpha z \rightarrow x\alpha z$.

Итак, структура предпочтений ЛПП на множестве деталей задается бинарным отношением, обладающим свойствами рефлексивности и транзитивности. В теории принятия решений такие отношения называются предпорядками или квазипорядками. Приведем два важных свойства предпорядков.

1. Симметричная часть $\beta = \tau \cap \tau^{-1}$ предпорядка τ является отношением эквивалентности.
2. Факторизация τ / β предпорядка τ по его симметричной части β является отношением порядка на фактор-множестве X / β .

В инженерной практике эквивалентность $\beta = \tau \cap \tau^{-1}$ формализует вхождение деталей в сборочные единицы, а фактор-отношение τ / β задает временное упорядочение деталей и сборочных единиц в процессе сборки изделия.

На рис. 3 изображена конструкция гидравлического клапана (а) и показано отношение «доминирование-безразличие» (б) данной простой конструкции. Буквами А – Д обозначены сборочные единицы, а Е представляет собой упорядоченное множество, описывающее последовательность сборки гидравлического клапана.

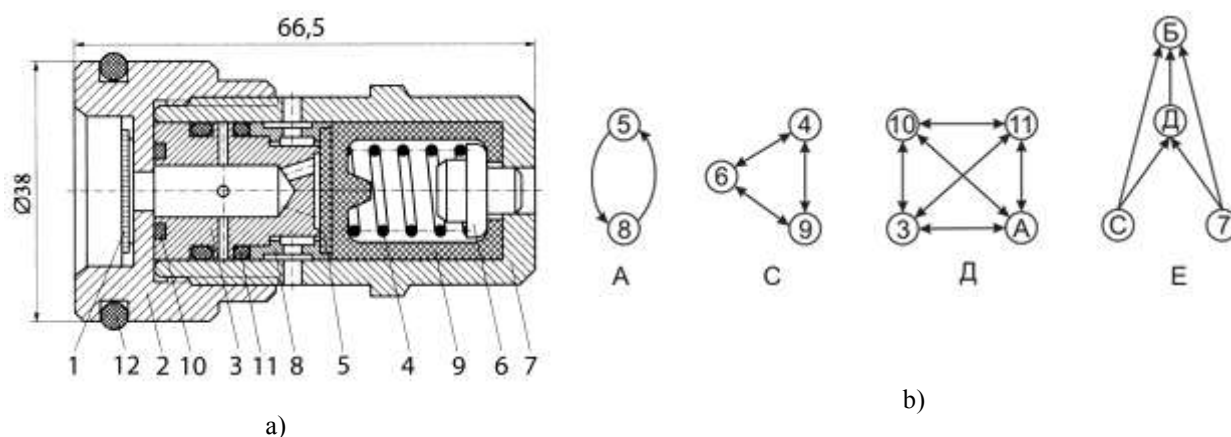


Рис. 3. Отношение доминирование-безразличие (б) на множестве деталей гидравлического клапана (а)

Множество деталей изделия X вместе с отношением τ / β , которое формализует предпочтения ЛПП, является упорядоченным множеством, которое обозначим $(X, P_{\tau/\beta})$,

В общем случае данный порядок не является линейным. Обозначим, как и ранее, $\sigma(X, P_{\tau/\beta})$ – совокупность всех линейных продолжений упорядоченного множества $(X, P_{\tau/\beta})$. Введем функцию C_{10} , которая из предъявления Y выбирает последовательности, согласованные с системой предпочтений ЛПР, $C_{10}(Y) = Y \cap \sigma(X, P_{\tau/\beta})$.

Множество функций выбора $C_1 - C_{10}$ не является замкнутым. Его можно пополнить функциями, описывающими такие важные свойства конструкции как: количество звеньев в кинематических цепях, степень статической неопределенности кинематических пар, условия сборки замкнутых кинематических цепей, расположение кинематических цепей в пространстве, свойства соединений, условия силового примыкания и др.

В теории принятия решений приведенные задачи $(A, C_i), i = \overline{1, 10}$, в которых выбор выполняется при помощи одной функции, называются частными. Общей называется задача (A, C) , в которой альтернативы оцениваются по совокупности свойств при помощи некоторой интегральной функции выбора $C: 2^A \rightarrow 2^A$ [27].

Для синтеза общей функции выбора C на основе множества частных C_i можно использовать различные подходы, например: обобщенное программирование, векторную стратификацию, методы группового принятия решений и др.

Заключение

Автоматизированный синтез рациональной последовательности сборки сложного изделия – это важная и актуальная проблема инженерной практики и теории проектирования. Она активно обсуждается в современных публикациях по СААП и ASP. В подавляющем большинстве работ этого направления считается, что априори задано множество конструктивно реализуемых вариантов последовательности сборки изделия. Авторы предлагают различные модели и алгоритмы, которые из заданного множества альтернатив высокой мощности выбирают рациональные проектные решения. Главным образом, для этого используются методы локальной поисковой оптимизации, основанные на биологических, этологических и др. аналогиях.

В работе предложен подход, основанный на парадигме теории принятия решений. Предложена формализация нескольких важных технологических и конструкторских эвристик и предпочтений ЛПР, влияющих на выбор рациональной последовательности сборки сложного изделия.

Описанный подход отличается двумя основными преимуществами. Во-первых, множество частных функций выбора является открытым. Во-вторых, подход допускает оценку и выбор альтернатив по нескольким аспектам. Для этого можно использовать различные методы генерации общей функции выбора по совокупности частных функций.

Список литературы

1. Ghandi S., Masehian El. Review and taxonomies of assembly and disassembly path planning problems and approaches // *Computer-Aided Design*. 2015. Vol. 67 – 68. Pp. 58 – 86. DOI: [10.1016/j.cad.2015.05.001](https://doi.org/10.1016/j.cad.2015.05.001)
2. Wang X., Ong S.K., Nee A.Y.C. A comprehensive survey of augmented reality assembly research // *Advances in Manufacturing*. 2016. Vol. 4. No. 1. Pp. 1-22. DOI: [10.1007/s40436-015-0131-4](https://doi.org/10.1007/s40436-015-0131-4)
3. Wang L., Keshavarzmanesh S., Hsi-Yung Feng, Buchal R.O. Assembly process planning and its future in collaborative manufacturing: a review // *The Intern. J. of Advanced Manufacturing Technology*. 2009. Vol. 41. No. 1 – 2. Pp. 132 – 144. DOI: [10.1007/s00170-008-1458-9](https://doi.org/10.1007/s00170-008-1458-9)
4. Deepak B.B.V.L., Balamurali Gunji, Bahubalendruni M.V.A. Raju, Biswal B.B. Assembly sequence planning using soft computing methods: a review // *Proc. of the Institution of Mechanical Engineers. Pt. E: J. of Process Mechanical Engineering*. 2019. Vol. 233. No. 3. Pp. 653-683. DOI: [10.1177/0954408918764459](https://doi.org/10.1177/0954408918764459)
5. Natarajan B.K. On planning assemblies // 4th Annual symp. on computational geometry: SCG'88 (Urbana-Champaign, Ill., USA, June 1988): Proc. N.Y.: ACM, 1988. Pp. 299-308. DOI: [10.1145/73393.73424](https://doi.org/10.1145/73393.73424)
6. Goldwasser M.H., Latombe J.-C., Motwani R. Complexity measures for assembly sequences // 12th IEEE Intern. conf. on robotics and automation: ICRA 1996 (Minneapolis, MN, USA, April 22-28, 1996): Proc. Vol. 2. N.Y.: IEEE, 1996. Pp. 1851 – 1857. DOI: [10.1109/ROBOT.1996.506981](https://doi.org/10.1109/ROBOT.1996.506981)
7. Wilson R.H., Kavraki L., Latombe J.-C., Lozano-Perez T. Two-handed assembly sequencing // *Intern. J. of Robotics Research*. 1995. Vol. 14. No. 4. Pp. 335 – 350. DOI: [10.1177/027836499501400403](https://doi.org/10.1177/027836499501400403)
8. Wolter J.D. A combinatorial analysis of enumerative data structures for assembly planning // IEEE Intern. conf. on robotics and automation: ICRA 1991 (Sacramento, CA, USA, April 9-11, 1991): Proc. N.Y.: IEEE, 1991. Pp. 611 – 618. DOI: [10.1109/ROBOT.1991.131649](https://doi.org/10.1109/ROBOT.1991.131649)
9. Whitney D.E. *Mechanical assemblies: Their design, manufacture and role in product development*. N.Y.; Oxf.: Oxf. Univ. Press, 2004. 517 p.
10. Yin Z.-P., Ding H., Xiong Y.-L. A virtual prototyping approach to generation and evaluation of mechanical assembly sequences // *Proc. of the Institution of Mechanical Engineers. Pt. B: J. of Engineering Manufacture*. 2004. Vol. 218. No. 1. Pp. 87 – 102. DOI: [10.1243/095440504772830237](https://doi.org/10.1243/095440504772830237)
11. Bahubalendruni M.V.A. Raju, Biswal B.B. A review on assembly sequence generation and its automation // *Proc. of the Institution of Mechanical Engineers. Pt. C: J. of Mechanical Engineering Science*. 2016. Vol. 230. No. 5. Pp. 824-838. DOI: [10.1177/0954406215584633](https://doi.org/10.1177/0954406215584633)

12. Bozhko A.N. Math modeling of sequential coherent and linear assembly plans in CAD systems // 2018 Global Smart Industry conf.: GloSIC (Chelyabinsk, Russia, November 13-15, 2018): Proc. N.Y.: IEEE, 2018. Pp. 1-5. DOI: [10.1109/GloSIC.2018.8570090](https://doi.org/10.1109/GloSIC.2018.8570090)
13. Bozhko A.N. Hypergraph model for assembly sequence problem // IoP conf. ser.: Materials Science and Engineering. 2019. Vol. 560. No. 1. P. 012010. DOI: [10.1088/1757-899x/560/1/012010](https://doi.org/10.1088/1757-899x/560/1/012010)
14. Карпенко А.П. Современные алгоритмы поисковой оптимизации. Алгоритмы, вдохновленные природой: учеб. пособие. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014. 446 с.
15. Mohd Fadzil Faisae Ab. Rashid. A hybrid ant-wolf algorithm to optimize assembly sequence planning problem // Assembly Automation. 2017. Vol. 37. No. 2. Pp. 238-248. DOI: [10.1108/AA-11-2016-143](https://doi.org/10.1108/AA-11-2016-143)
16. Muhammad Arif Abdullah, Mohd Fadzil Faisae Ab. Rashid, Zakri Ghazalli. Optimization of assembly sequence planning using soft computing approaches: A review // Archives of Computational Methods in Engineering. 2019. Vol. 26. No. 2. Pp. 461 – 474. DOI: [10.1007/s11831-018-9250-y](https://doi.org/10.1007/s11831-018-9250-y)
17. Balamurali Gunji, Deepak B.B.V.L., Bahubalendruni M.V.A. Raju, Biswal B.B. Optimal assembly sequence planning towards design for assembly using simulated annealing technique // Research into design for communities: 6th intern. conf. on research into design: ICoRD 2017 (Guwahati, India, January 9-11, 2017): Proc. Singapore: Springer, 2017. Pp. 397-407. DOI: [10.1007/978-981-10-3518-0_35](https://doi.org/10.1007/978-981-10-3518-0_35)
18. Morad Behandish and Horea T. Ilies. Haptic assembly and prototyping: An expository review. 2016. Режим доступа: <https://arxiv.org/pdf/1712.00750.pdf> (дата обращения 25.01.2020).
19. Bahubalendruni M.V.A. Raju, Biswal B.B., Deepak B.B.V.L. Optimal robotic assembly sequence generation using particle swarm optimization // J. of Automation and Control Engineering. 2016. Vol. 4. No. 2. Pp. 89 – 95. DOI: [10.12720/joace.4.2.89-95](https://doi.org/10.12720/joace.4.2.89-95)
20. Lee Dong-Ho, Kang J.-G., Xirouchakis P. Disassembly planning and scheduling: review and further research // Proc. of the Institution of Mechanical Engineers. Pt. B: J. of Engineering Manufacture. 2001. Vol. 215. No. 5. Pp. 695-709. DOI: [10.1243/0954405011518629](https://doi.org/10.1243/0954405011518629)
21. Cong Lu, Jerry Ying Hsi Fuh, Yoke San Wong. Advanced assembly planning approach using a multi-objective genetic algorithm // Cong Lu, Jerry Ying Hsi Fuh, Yoke San Wong. Collaborative product assembly design and assembly planning: methodologies and applications. Oxf.; Camb.; Phil.: Woodhead Publ., 2011. Pp. 107 – 146. DOI: [10.1533/9780857093882](https://doi.org/10.1533/9780857093882)
22. Qin Yong-Fa, Xu Zhi-Gang. Assembly process planning using a multi-objective optimization method // Intern. conf. on mechatronics and automation: ICMA 2007 (Harbin, China, August 5-8, 2007): Proc. N.Y.: IEEE, 2007. Pp. 593 – 598. DOI: [10.1109/ICMA.2007.4303610](https://doi.org/10.1109/ICMA.2007.4303610)

23. Mohd Fadzil Faisae Rashid, Windo Hutabarat, Ashutosh Tiwari. A review on assembly sequence planning and assembly line balancing using soft computing approaches // The Intern. J. of Advanced Manufacturing Technology. 2012. Vol. 59. No. 1 – 4. Pp. 335 – 349.
DOI: [10.1007/s00170-011-3499-8](https://doi.org/10.1007/s00170-011-3499-8)
24. White D.J. Decision theory. N.Y.: Taylor & Francis, 2006. 196 p.
DOI: [10.4324/9780203793695](https://doi.org/10.4324/9780203793695)
25. Roman S. Lattices and ordered sets. N.Y.: Springer, 2008. 305 p. DOI: [10.1007/978-0-387-78901-9](https://doi.org/10.1007/978-0-387-78901-9)
26. Bozhko A.N. Theoretic-lattice approach to computer aided generation of assembly units // Intern. Russian automation conf.: RusAutoCon 2018 (Sochi, Russia, September 9-16, 2018): Proc. N.Y.: IEEE, 2018. 5 p. DOI: [10.1109/RUSAUTOCON.2018.8501839](https://doi.org/10.1109/RUSAUTOCON.2018.8501839)
27. Jie Lu, Guangquan Zhang, Da Ruan, Fengjie Wu. Multi-objective group decision making: Methods, software and applications with fuzzy set techniques. Singapore: World Scientific, 2007. 390 p. DOI: [10.1142/p505](https://doi.org/10.1142/p505)



Choosing a Rational Assembly Sequence of Product as a Decision-making Problem

**A.N. Bozhko^{1,*}, A.S. Domnikov¹,
S.V. Rodionov¹**

¹Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

* abozhko@inbox.ru

Keywords: assembly; assembly sequence; choice function; theory of decision-making; heuristic; computer aided assembly planning

Received: 10.11.2019, Revised: 24.11.2019

Automated synthesis of computer-aided assembly planning (CAAP) processes is a crucial task for engineering practice and design theory. It is of especial relevance for modern robotic industries, which need in technological assembly instructions to be described in-depth and in-detail as much as possible. The assembly sequence is a key design decision on which many operational properties of the product and economic characteristics of production depend.

Choosing a rational assembly sequence planning (ASP) is a challenge. It requires significant computing resources and taking into consideration a large number of technical parameters and economic characteristics that affect the quality of design alternatives. Insights into the quality of alternatives are given as the expert's preferences rather than as the numerical criteria.

The abovementioned features do not allow us to apply the classical optimization methods or mathematical programming for making ASP decision. For this, most modern publications offer various search engine optimization methods based on biological and behavioral analogies. In this paradigm, it is believed that a set of acceptable alternatives that form the original choice space is a priori known. In most design situations this presumption is unrealistic.

In engineering practice, considerable technological knowledge about the assembly of products for different function purposes is gained. These are mostly ad hoc data that exist in the form of rules, recommendations, recipes, heuristics, expert preferences, descriptions of successful precedents, etc. The paper suggests a new method for a choice of the rational assembly sequence based on the use of the decision theory apparatus. The proposal contains formalization of important design and technological heuristics, namely consistency with the dimensional chain system, geometric “freedom” during assembly, monotony in size, weight, accuracy, etc.

A set of choice functions is open and can be completed by additional choice functions that describe engineering heuristics and decision rules that are relevant in the given design situation. The proposed approach allows the assessment and choice of alternatives according to several aspects or criteria. To do this, it is possible to use various methods of generating a common choice function from the totality of particular functions.

References

1. Ghandi S., Masehian El. Review and taxonomies of assembly and disassembly path planning problems and approaches. *Computer-Aided Design*, 2015, vol. 67 – 68, pp. 58 – 86. DOI: [10.1016/j.cad.2015.05.001](https://doi.org/10.1016/j.cad.2015.05.001)
2. Wang X., Ong S.K., Nee A.Y.C. A comprehensive survey of augmented reality assembly research. *Advances in Manufacturing*, 2016, vol. 4, no. 1, pp. 1-22. DOI: [10.1007/s40436-015-0131-4](https://doi.org/10.1007/s40436-015-0131-4)
3. Wang L., Keshavarzmanesh S., Hsi-Yung Feng, Buchal R.O. Assembly process planning and its future in collaborative manufacturing: a review. *The Intern. J. of Advanced Manufacturing Technology*, 2009, vol. 41, no. 1 – 2, pp. 132 – 144. DOI: [10.1007/s00170-008-1458-9](https://doi.org/10.1007/s00170-008-1458-9)
4. Deepak B.B.V.L., Balamurali Gunji, Bahubalendruni M.V.A. Raju, Biswal B.B. Assembly sequence planning using soft computing methods: a review. *Proc. of the Institution of Mechanical Engineers. Pt. E: J. of Process Mechanical Engineering*, 2019, vol. 233, no. 3, pp. 653-683. DOI: [10.1177/0954408918764459](https://doi.org/10.1177/0954408918764459)
5. Natarajan B.K. On planning assemblies. *4th Annual symp. on computational geometry: SCG'88* (Urbana-Champaign, Ill., USA, June 1988): Proc. N.Y.: ACM, 1988. Pp. 299-308. DOI: [10.1145/73393.73424](https://doi.org/10.1145/73393.73424)
6. Goldwasser M.H., Latombe J.-C., Motwani R. Complexity measures for assembly sequences. *12th IEEE Intern. conf. on robotics and automation: ICRA 1996* (Minneapolis, MN, USA, April 22-28, 1996): Proc. Vol. 2. N.Y.: IEEE, 1996. Pp. 1851 – 1857. DOI: [10.1109/ROBOT.1996.506981](https://doi.org/10.1109/ROBOT.1996.506981)
7. Wilson R.H., Kavvaki L., Latombe J.-C., Lozano-Perez T. Two-handed assembly sequencing. *Intern. J. of Robotics Research*, 1995, vol. 14, no. 4, pp. 335 – 350. DOI: [10.1177/027836499501400403](https://doi.org/10.1177/027836499501400403)
8. Wolter J.D. A combinatorial analysis of enumerative data structures for assembly planning. *IEEE Intern. conf. on robotics and automation: ICRA 1991* (Sacramento, CA, USA, April 9-11, 1991): Proc. N.Y.: IEEE, 1991. Pp. 611 – 618. DOI: [10.1109/ROBOT.1991.131649](https://doi.org/10.1109/ROBOT.1991.131649)
9. Whitney D.E. *Mechanical assemblies: Their design, manufacture and role in product development*. N.Y.; Oxf.: Oxf. Univ. Press, 2004. 517 p.
10. Yin Z.-P., Ding H., Xiong Y.-L. A virtual prototyping approach to generation and evaluation of mechanical assembly sequences. *Proc. of the Institution of Mechanical Engineers. Pt. B:*

J. of Engineering Manufacture, 2004, vol. 218, no. 1, pp. 87 – 102.

DOI: [10.1243/095440504772830237](https://doi.org/10.1243/095440504772830237)

11. Bahubalendruni M.V.A. Raju, Biswal B.B. A review on assembly sequence generation and its automation. *Proc. of the Institution of Mechanical Engineers. Pt. C: J. of Mechanical Engineering Science*, 2016, vol. 230, no. 5, pp. 824-838. DOI: [10.1177/0954406215584633](https://doi.org/10.1177/0954406215584633)
12. Bozhko A.N. Math modeling of sequential coherent and linear assembly plans in CAD systems. *2018 Global Smart Industry conf.: GloSIC* (Chelyabinsk, Russia, November 13-15, 2018): Proc. N.Y.: IEEE, 2018. Pp. 1-5. DOI: [10.1109/GloSIC.2018.8570090](https://doi.org/10.1109/GloSIC.2018.8570090)
13. Bozhko A.N. Hypergraph model for assembly sequence problem. *IoP conf. ser.: Materials Science and Engineering*, 2019, vol. 560, no. 1, p. 012010. DOI: [10.1088/1757-899x/560/1/012010](https://doi.org/10.1088/1757-899x/560/1/012010)
14. Karpenko A.P. *Sovremennye algoritmy poiskovoj optimizatsii. Algoritmy vdokhnovlennyye prirodoj* [Modern search engine optimization algorithms. Nature-inspired algorithms]: a textbook. Moscow: BMSTU Publ., 2014. 446 p. (in Russian).
15. Mohd Fadzil Faisae Ab. Rashid. A hybrid ant-wolf algorithm to optimize assembly sequence planning problem. *Assembly Automation*, 2017, vol. 37, no. 2, pp. 238-248. DOI: [10.1108/AA-11-2016-143](https://doi.org/10.1108/AA-11-2016-143)
16. Muhammad Arif Abdullah, Mohd Fadzil Faisae Ab. Rashid, Zakri Ghazalli. Optimization of assembly sequence planning using soft computing approaches: A review. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 2019, vol. 26, no. 2, pp. 461 – 474. DOI: [10.1007/s11831-018-9250-y](https://doi.org/10.1007/s11831-018-9250-y)
17. Balamurali Gunji, Deepak B.B.V.L., Bahubalendruni M.V.A. Raju, Biswal B.B. Optimal assembly sequence planning towards design for assembly using simulated annealing technique. *Research into design for communities: 6th intern. conf. on research into design: ICoRD 2017* (Guwahati, India, January 9-11, 2017): Proc. Singapore: Springer, 2017. Pp. 397-407. DOI: [10.1007/978-981-10-3518-0_35](https://doi.org/10.1007/978-981-10-3518-0_35)
18. Morad Behandish and Horea T. Ilies. Haptic assembly and prototyping: An expository review. 2016. Available at: <https://arxiv.org/pdf/1712.00750.pdf>, accessed 25.01.2020.
19. Bahubalendruni M.V.A. Raju, Biswal B.B., Deepak B.B.V.L. Optimal robotic assembly sequence generation using particle swarm optimization. *J. of Automation and Control Engineering*, 2016, vol. 4, no. 2, pp. 89 – 95. DOI: [10.12720/joace.4.2.89-95](https://doi.org/10.12720/joace.4.2.89-95)
20. Lee Dong-Ho, Kang J.-G., Xirouchakis P. Disassembly planning and scheduling: review and further research. *Proc. of the Institution of Mechanical Engineers. Pt. B: J. of Engineering Manufacture*, 2001, vol. 215, no. 5, pp. 695-709. DOI: [10.1243/0954405011518629](https://doi.org/10.1243/0954405011518629)
21. Cong Lu, Jerry Ying Hsi Fuh, Yoke San Wong. Advanced assembly planning approach using a multi-objective genetic algorithm. Cong Lu, Jerry Ying Hsi Fuh, Yoke San Wong. *Collaborative product assembly design and assembly planning: methodologies and applications*. Oxf.; Camb.; Phil.: Woodhead Publ., 2011. Pp. 107 – 146. DOI: [10.1533/9780857093882](https://doi.org/10.1533/9780857093882)

22. Qin Yong-Fa, Xu Zhi-Gang. Assembly process planning using a multi-objective optimization method. *Intern. conf. on mechatronics and automation: ICMA 2007* (Harbin, China, August 5-8, 2007): Proc. N.Y.: IEEE, 2007. Pp. 593 – 598.
DOI: [10.1109/ICMA.2007.4303610](https://doi.org/10.1109/ICMA.2007.4303610)
23. Mohd Fadzil Faisae Rashid, Windo Hutabarat, Ashutosh Tiwari. A review on assembly sequence planning and assembly line balancing using soft computing approaches. *The Intern. J. of Advanced Manufacturing Technology*, 2012, vol. 59, no. 1 – 4, pp. 335 – 349.
DOI: [10.1007/s00170-011-3499-8](https://doi.org/10.1007/s00170-011-3499-8)
24. White D.J. Decision theory. N.Y.: Taylor & Francis, 2006. 196 p.
DOI: [10.4324/9780203793695](https://doi.org/10.4324/9780203793695)
25. Roman S. Lattices and ordered sets. N.Y.: Springer, 2008. 305 p. DOI: [10.1007/978-0-387-78901-9](https://doi.org/10.1007/978-0-387-78901-9)
26. Bozhko A.N. Theoretic-lattice approach to computer aided generation of assembly units. *Intern. Russian automation conf.: RusAutoCon 2018* (Sochi, Russia, September 9-16, 2018): Proc. N.Y.: IEEE, 2018. 5 p. DOI: [10.1109/RUSAUTOCON.2018.8501839](https://doi.org/10.1109/RUSAUTOCON.2018.8501839)
27. Jie Lu, Guangquan Zhang, Da Ruan, Fengjie Wu. Multi-objective group decision making: Methods, software and applications with fuzzy set techniques. Singapore: World Scientific, 2007. 390 p. DOI: [10.1142/p505](https://doi.org/10.1142/p505)