

## **Применение ориентированных гиперграфов ограничений при проектировании технологии изготовления высокоточных конструкций**

© П.В. Круглов, И.А. Болотина

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва 105005, Россия

*При проектировании сборочных технологических процессов изделий машиностроения одной из задач является выбор последовательности сборки изделия (маршрута сборки), на который оказывают влияние требования к контролю и испытаниям, наличие типовых технологических процессов, регламентированная последовательность определенных операций. С точки зрения автоматизации проектирования технологического процесса проблема заключается в многовариантности сборочной технологии. Помимо этого при сборке высокоточных конструкций необходимо учитывать геометрию деталей, способы соединений и особенности сопряжений отдельных поверхностей. Для снижения доли ручного труда при проектировании технологии необходимо создать систему автоматизированного проектирования технологии сборки высокоточных конструкций. Для разработки такой системы предлагается использовать алгоритм проектирования технологических процессов сборки на основе применения ориентированных гиперграфов ограничений, в которых описываются варианты комбинаций деталей, делающих невозможной последующую сборку других деталей. Пользователь данного алгоритма поочередно рассматривает пары сопрягаемых деталей и указывает в качестве ограничений те детали, которые не могут быть установлены в сборочную единицу при сборке данной пары. Описание гиперграфа ограничений может быть представлено в графическом и табличном виде.*

*На основе гиперграфа ограничений рассчитывают варианты технологических процессов, не противоречащие ограничениям, установленным для данной сборочной единицы. Такой подход позволяет значительно сократить число рассматриваемых вариантов сборки и предложить разработчику технологии варианты, ранжированные по определенным критериям или по значению целевой функции.*

*Представленный алгоритм был апробирован при разработке технологии сборки высокоточного кумулятивного заряда, что позволило снизить число рассматриваемых вариантов технологии с более чем 5 тыс. до 32. В качестве критерия выбора вариантов сборки предложено рассмотреть возможность поточной сборки с учетом грузооборота производственного участка.*

**Ключевые слова:** последовательность сборки, технология сборки, гиперграф ограничений.

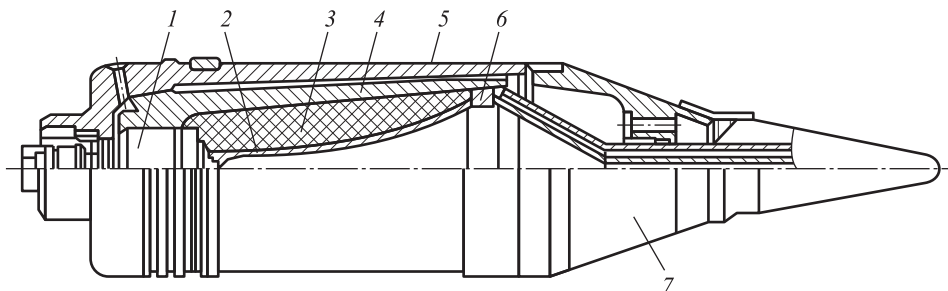
**Введение.** Разработка рациональной технологии сборки высокоточных конструкций летательных аппаратов является важной задачей

как для крупносерийного, так и для мелкосерийного производства. Обеспечение высокого качества сборки, установленного такта выпуска, снижение затрат труда и ресурсов, учет возможностей действующего производства — основные факторы, влияющие на выбор технологии сборки. Поскольку уровень автоматизации проектирования сборочных технологических процессов в существующих системах автоматического моделирования недостаточно высок, такую задачу часто приходится решать вручную. Основная проблема заключается в том, что число возможных вариантов технологии сборки существенно зависит от числа деталей на сборочном чертеже узла или агрегата. Так, при числе деталей в составе сборочной единицы  $n = 15$  число вариантов последовательностей сборки (маршрутов сборки) без учета геометрических, технологических и прочих ограничений составит  $n! \approx 1,3 * E + 12$ . В составе современных конструкций узлов, агрегатов ракетно-космической техники число деталей и сборочных единиц может достигать до нескольких сотен и тысяч наименований. Поэтому задача автоматизация проектирования технологических процессов сборки высокоточных конструкций актуальна.

**Методы решения.** Для решения такой задачи эффективным методом является применение теории графов, позволяющей снизить потребность в расчетных ресурсах [1–16]. В частности, в работах [1–4] предложено использовать граф для описания взаимосвязей между элементами конструкции и формирования на этой основе технологии сборки. Вместе с тем, при таком построении модели изделия сложно учитывать значительное число связей в конструкции. Применение в моделях конструкций математического описания гиперграфов позволяет формировать такие последовательности сборки изделия, которые учитывают полноту механических связей деталей в конструкции [5, 6]. При этом в моделях изделий учитываются условия контакта деталей, базирования деталей относительно других деталей, возможности их группирования в узлы.

Определению рациональной последовательности сборки высокоточных изделий посвящен ряд работ [7, 8]. Одним из перспективных методов генерации вариантов сборки является использование ориентированных гиперграфов с ограничениями [13–16], что при проектировании позволяет обеспечивать просмотр и анализ значительно большего числа вариантов сборки изделия по сравнению с обычным путем проектирования. Математическое описание теории ориентированных гиперграфов и их отличия от других моделей изложены в работах [10–12]. Предлагаемый в настоящей работе метод основан на введении разработчиком ограничений на возможные варианты сборки изделия, определяющих возможность или невозможность последующей сборки конструкции.

**Описание метода.** Рассмотрим применение метода для генерации вариантов сборки компактного высокоточного летательного аппарата, аналога кумулятивного заряда (КЗ) ОСС-105-F1 (далее сокращенно F1) [17], упрощенная конструкция которого представлена на рис. 1.



**Рис. 1.** Конструкция летательного аппарата F1:

1 — донный детонатор; 2 — кумулятивная воронка; 3 — заряд взрывчатого вещества (ВВ); 4 — корпус проворачивающегося КЗ; 5 — корпус снаряда; 6 — кольцо; 7 — головная часть

Представим некоторые ограничения на последовательность сборки деталей высокоточного летательного аппарата исходя из геометрических соображений. Если установлены корпус 4 проворачивающегося КЗ и кольцо 6, то нельзя установить кумулятивную воронку 2, т. е. маршрут сборки 4–6–2 будет невозможным. Причем не имеет значения, будут ли до или после сборки деталей 4 и 6 установлены другие детали — кумулятивную воронку вставить после установки этих деталей не удастся. Аналогично рассмотрим такой вариант: если установлен корпус снаряда 5 и головная часть 7, то нельзя установить корпус проворачивающегося КЗ, т. е. маршрут сборки 5–7–4 невозможен, что очевидно.

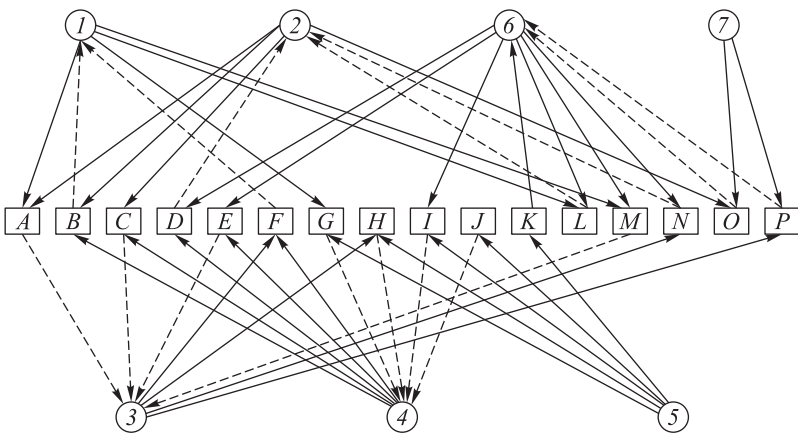
В соответствии с такой логикой для конструкции конкретного летательного аппарата разработано 16 геометрических ограничений, характеризующих невозможность сборки (табл. 1). В первом столбце таблицы закодировано ограничение, во втором и третьем столбцах указаны детали, сборка которых в маршруте не позволит установить «лишнюю» деталь, представленную в четвертом столбце.

На рис. 2 приведен ориентированный гиперграф для описания ограничений на сборку летательного аппарата F1. Гиперграф отличается от обычного графа тем, что связи на нем соединяют несколько (не обязательно две) вершин. В ориентированном гиперграфе множество вершин, соответствующих какой-либо связи, делится на множество входных вершин и множество выходных вершин.

**Ограничения на последовательность сборки летательного аппарата F1**

Код ограничения	Последовательность сборки		
	Деталь 1	Деталь 2	«Лишняя» деталь
A	1	2	3
B	2	4	1
C	2	4	3
D	4	6	2
E	4	6	3
F	4	3	1
G	5	1	4
H	5	3	4
I	5	6	4
J	5	7	4
K	5	7	6
L	6	1	2
M	6	1	3
N	6	3	2
O	7	2	6
P	7	3	6

На рис. 2 номерами 1–7 обозначены детали летательного аппарата, буквами от A до P представлены ограничения в соответствии с кодами табл. 1, сплошные линии — связи между двумя собираемыми деталями (входные вершины) и ограничениями, штриховые — связи между ограничениями и «лишними» деталями (выходными вершинами).



**Рис. 2.** Ориентированный гиперграф ограничений на сборку летательного аппарата F1

В частности, рассмотренный выше пример ограничений  $D$  4–6–2 представлен на гиперграфе следующим образом: от деталей 4 и 6 связи (сплошные линии) через ограничение  $D$  направлены на деталь 2 (штриховая линия). Другой рассмотренный пример ограничений  $J$  5–7–4.

Следующим этапом после формирования гиперграфа ограничений является генерация вариантов последовательностей сборки. При числе деталей 7 (для упрощенной конструкции летательного аппарата F1) число вариантов последовательностей сборки составляет 5 040. Понятно, что многие из них не реализуемы, и предлагаемый метод на основе гиперграфа ограничений позволяет отбросить лишние невозможные варианты, предоставляя разработчику технологии выбор из небольшого множества.

**Алгоритм метода.** Алгоритм (рис. 3) метода генерации предусматривает работу с пятью базами данных: деталей, ограничений, вариантов маршрутов размерностью  $i$ , вариантов маршрутов размерностью  $i + 1$ , маршрутов окончательная. База данных деталей формируется по сборочному чертежу в соответствии со спецификацией изделия. База данных ограничений содержит набор ограничений, накладываемых на технологию сборки (см. рис. 2, табл. 1). Базы данных вариантов маршрутов размерностью  $i$  и размерностью  $i + 1$  используются для хранения текущих промежуточных вариантов маршрутов. База данных маршрутов окончательная содержит полный набор вариантов маршрутов, соответствующих ограничениям и набор, содержащий все детали.

Генерация вариантов происходит последовательно: от числа деталей в сборке  $i = 1$  до числа деталей в сборке  $n = i + 1$ . Сначала создаются маршруты размерностью 1 (под размерностью понимается число деталей в маршруте), например, после первого шага будут сгенерированы маршруты сборки 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7. Затем генерируются маршруты размерностью 2 путем поочередного прибавления к текущему варианту маршрута деталей из соответствующей базы данных, например, 1–2, 1–3, 1–4, ..., 2–1, 2–3, 2–4, ..., 3–1, 3–2, 3–4, ... и т. д. Начиная с размерности 3 (варианты 1–2–3, 1–2–4, 1–2–5 и т. д.) проводится проверка генерируемого маршрута на соответствие ограничениям из базы данных ограничений. Те варианты маршрутов, которые не соответствуют ограничениям, удаляются и в дальнейшем не будут использоваться для генерации на их основе маршрутов большей размерности. Такой подход позволяет значительно сократить объем расчетов, поскольку будут сразу отсекаются целые ветви нереализуемых маршрутов.

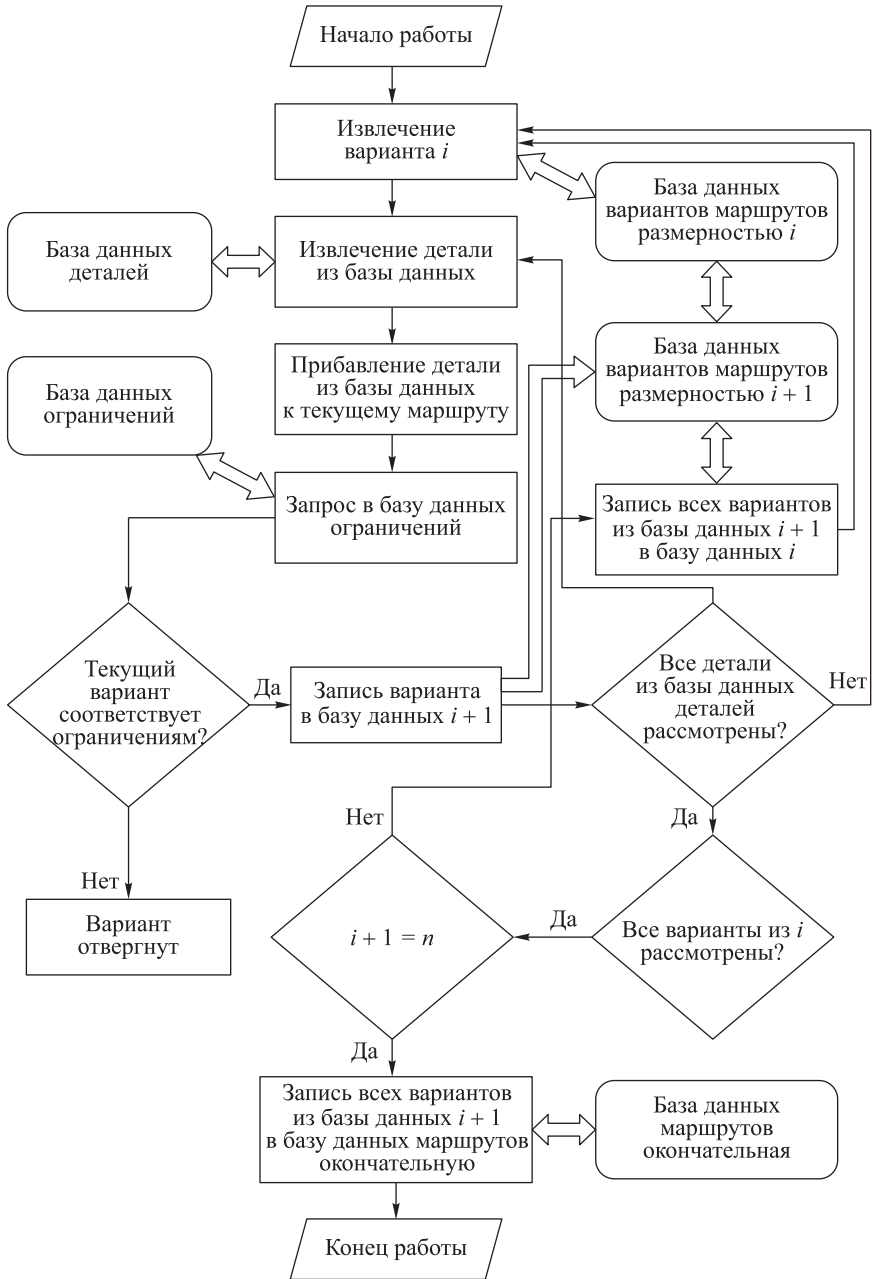


Рис. 3. Алгоритм работы метода

После генерации всех вариантов маршрутов размерностью  $n$  ( $n$  — число деталей в спецификации) происходит формирование окончательной базы данных маршрутов.

**Результаты расчета.** На основании работы алгоритма было сформировано 64 варианта последовательности сборки летательного аппарата F1, которые представлены в табл. 2. Для примера рассмот-

рим вариант № 17: 2–3–1–4–6–5–7. Последовательность сборки, согласно этой кодировке, будет следующей: кумулятивная воронка 2 собирается с шашкой ВВ 3, устанавливается донный детонатор 1, вся сборка помещается в корпус вращающегося КЗ 4, далее устанавливается кольцо 6, опускается в корпус снаряда 5 и закрывается головной частью 7.

Таблица 2

**Варианты последовательности сборки летательного аппарата F1**

№	Вариант	№	Вариант	№	Вариант
1	1–3–2–4–5–6–7	23	2–3–6–1–4–7–5	45	3–2–1–6–4–7–5
2	1–3–2–4–6–5–7	24	2–3–6–1–7–4–5	46	3–2–1–6–7–4–5
3	1–3–2–4–6–7–5	25	2–3–6–7–1–4–5	47	3–2–6–1–4–5–7
4	1–3–2–6–4–5–7	26	2–6–3–1–4–5–7	48	3–2–6–1–4–7–5
5	1–3–2–6–4–7–5	27	2–6–3–1–4–7–5	49	3–2–6–1–7–4–5
6	1–3–2–6–7–4–5	28	2–6–3–1–7–4–5	50	3–2–6–7–1–4–5
7	1–3–4–2–5–6–7	29	2–6–3–7–1–4–5	51	4–1–3–2–5–6–7
8	1–3–4–2–6–5–7	30	2–6–7–3–1–4–5	52	4–1–3–2–6–5–7
9	1–3–4–2–6–7–5	31	3–1–2–4–5–6–7	53	4–1–3–2–6–7–5
10	1–3–4–5–2–6–7	32	3–1–2–4–6–5–7	54	4–1–3–5–2–6–7
11	1–4–3–2–5–6–7	33	3–1–2–4–6–7–5	55	4–1–5–3–2–6–7
12	1–4–3–2–6–5–7	34	3–1–2–6–4–5–7	56	4–5–1–3–2–6–7
13	1–4–3–2–6–7–5	35	3–1–2–6–4–7–5	57	5–4–1–3–2–6–7
14	1–4–3–5–2–6–7	36	3–1–2–6–7–4–5	58	6–2–3–1–4–5–7
15	1–4–5–3–2–6–7	37	3–1–4–2–5–6–7	59	6–2–3–1–4–7–5
16	2–3–1–4–5–6–7	38	3–1–4–2–6–5–7	60	6–2–3–1–7–4–5
17	2–3–1–4–6–5–7	39	3–1–4–2–6–7–5	61	6–2–3–7–1–4–5
18	2–3–1–4–6–7–5	40	3–1–4–5–2–6–7	62	6–2–7–3–1–4–5
19	2–3–1–6–4–5–7	41	3–2–1–4–5–6–7	63	6–7–2–3–1–4–5
20	2–3–1–6–4–7–5	42	3–2–1–4–6–5–7	64	7–6–2–3–1–4–5
21	2–3–1–6–7–4–5	43	3–2–1–4–6–7–5		
22	2–3–6–1–4–5–7	44	3–2–1–6–4–5–7		

Анализ данных табл. 2 показывает, что минимальное число вариантов маршрутов (по одному) начинается со сборки деталей контура летательного аппарата — корпуса и головной части. Детали, с которых начинается наибольшее число вариантов, — заряд ВВ (20 вариантов), донный детонатор и кумулятивная воронка (по 15 вариантов). В дальнейшем предполагается, что разработчик технологии сборки, выбирая командную деталь, автоматически будет получать из базы данных вариантов те маршруты, которые начинаются с этой детали.

Из результатов расчетов следует, что при замене двух первых деталей в последовательности остальные детали в варианте сборки дублируют другой, уже рассчитанный вариант. Данная особенность позволяет сократить половину числа вариантов сборки: с 64 до 32.

Варианты, сгенерированные предлагаемым методом, учитывают только геометрические ограничения на сборку деталей и не учитывают технологических, организационных требований, которые могут существенно влиять на маршрут сборки. Такие требования могут быть формализованы и могут независимо дополнить гиперграф без дополнительного пересчета вариантов. При добавлении нового ограничения в табл. 1 в соответствии с методом достаточно проверить на выполнение этого ограничения тот состав вариантов, который уже сформирован в табл. 2.

Выбор варианта может проводиться на основе целевой функции, с помощью которой будут учитываться такие факторы, как масса детали, число сопрягаемых поверхностей и их точность, наличие допусков на погрешности расположения осей и поверхностей в сборочной единице и другие показатели. Для развития данной методики проводятся формализация таких факторов и подбор их весовых коэффициентов, что позволит разработчику технологии выбирать вариант маршрута сборки, руководствуясь дополнительными критериями.

Одним из критериев при выборе варианта сборочной технологии для серийного производства может являться грузооборот по участку, при расчете которого будут учитываться масса детали и расстояние перемещения детали и уже собранного узла по участку сборки. В настоящее время проводятся подготовка данных и разработка алгоритма для такого расчета.

**Заключение.** В работе описан метод генерации вариантов технологии сборки высокоточных конструкций на основе ориентированных гиперграфов, позволяющий разработчикам технологии анализировать значительно большее число вариантов сборки изделия, по сравнению с обычным путем проектирования. Предложен ориентированный гиперграф ограничений для высокоточной конструкции летательного аппарата, рассмотрен алгоритм работы метода, проведен расчет 32 вариантов сборки такого изделия.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Корсаков В.С., Капустин Н.М., Темпельгоф К.-Х. и др. *Автоматизация проектирования технологических процессов в машиностроении*. Москва, Машиностроение, 1985. 304 с.
- [2] Павлов В.В. *Некоторые особенности АСТПП в производстве сложных изделий. Автоматизация технологической подготовки на основе ЕСТПП*. Москва, Издательство стандартов, 1976, с. 152.



- [3] Ершов В.И., Павлов В.В. и др. *Технология сборки самолетов*. Москва, Наука, 1986, 456 с.
- [4] Соломенцев Ю.М., Митрофанов В.Г., Павлов В.В. и др. *Информационно-вычислительные системы в машиностроении CALS-технологии*. Москва, Наука, 2003, 292 с.
- [5] Божко А.Н. Выбор рациональной последовательности сборки изделия. *Наука и образование. Электрон. издание*, 2010, № 7. URL: <http://technomag.bmstu.ru/doc/147483.html> (дата обращения 27.11.2015).
- [6] Божко А.Н. Моделирование механических связей изделия. *Наука и образование. Электрон. издание*, 2011, № 3. URL: <http://technomag.bmstu.ru/doc/168373.html> (дата обращения 27.11.2015).
- [7] Тарасов В.А., Баскаков В.Д., Круглов П.В. Методика проектирования технологии изготовления высокоточных деталей боеприпасов. *Оборонная техника*, 2000, № 1-2, с. 89–92.
- [8] Тарасов В.А., Баскаков В.Д., Круглов П.В. Научные основы проектирования технологии изготовления прецизионных кумулятивных зарядов. Экстремальные состояния вещества. Детонация. Ударные волны. *Тр. междунар. конф. «III Харитоновские тематические научные чтения»*. Саров, ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2002, с. 254–257.
- [9] Евгеньев Г.Б. *Интеллектуальные системы проектирования*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2009, 334 с.
- [10] Белоусов А.И., Пастуховский А.В. Ориентированные гиперграфы и системы подстановок. *Фундаментальная и прикладная математика*, 1996, т. 2, № 4, с. 1163–1186.
- [11] Зыков А.А. Гиперграфы. *Успехи математических наук*, 1974, № 6, с. 89–154.
- [12] Горбатов В.А. *Основы дискретной математики*. Москва, Высшая школа, 1986, 311 с.
- [13] Тарасов В.А., Круглов П.В., Пастуховский А.В. Применение ориентированных гиперграфов для проектирования технологии сборки зарядов. Экстремальные состояния вещества. Детонация. Ударные волны. *Тр. междунар. конф. «XI Харитоновские тематические научные чтения»*. Саров, ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2009, с. 743–748.
- [14] Тарасов В.А., Круглов П.В., ред. Михайлов А.Л. Методика проектирования технологии сборки зарядов с использованием ориентированных гиперграфов. Экстремальные состояния вещества. Детонация. Ударные волны. *Тр. междунар. конф. «XIII Харитоновские тематические научные чтения»*. Саров, ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2011, с. 776–780.
- [15] Тарасов В.А., Круглов П.В. Метод генерации проектных решений сборки изделий с применением ориентированных гиперграфов. *Наука и образование. Электрон. издание*, 2012, № 1. URL: <http://technomag.bmstu.ru/doc/260312.html> (дата обращения 15.01.2016).
- [16] Тарасов В.А., Круглов П.В., Болотина И.А. Метод формирования совокупности допустимых вариантов сборки изделий на основе применения ориентированных гиперграфов. *Наука и образование. Электрон. журнал*, 2012, № 2. URL: <http://technomag.bmstu.ru/doc/339658.html> (дата обращения 15.01.2016).
- [17] Бабкин А.В., Велданов В.А., Грязнов Е.Ф., ред. Селиванов В.В. *Средства поражения и боеприпасы*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008, 984 с.

Статья поступила в редакцию 05.05.2016

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Круглов П.В., Болотина И.А. Применение ориентированных гиперграфов ограничений при проектировании технологии изготовления высокоточных конструкций. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2016, вып. 5.

<http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2016-05-1494>

*Статья подготовлена по материалам доклада, представленного на XL Академических чтениях по космонавтике, посвященных памяти академика С.П. Королева и других выдающихся отечественных ученых — пионеров освоения космического пространства, Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана, 26–29 января 2016 г.*

**Круглов Павел Владимирович** окончил МГТУ им. Н.Э. Баумана в 1996 г. по специальности «Ракетостроение». Канд. техн. наук, доцент кафедры «Технологии ракетно-космического машиностроения» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 40 научных публикаций в области технологий специального машиностроения. e-mail: [kruglov@sm.bmstu.ru](mailto:kruglov@sm.bmstu.ru)

**Болотина Ирина Алексеевна** окончила МВТУ им. Н.Э. Баумана в 1983 г. по специальности «Производство летательных аппаратов». Ассистент кафедры «Технологии ракетно-космического машиностроения» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Имеет 8 авторских свидетельств на изобретения, автор более 20 печатных трудов в области технологии машиностроения.

## Application of oriented constraint hypergraphs in designing manufacturing technology precision structure

© P.V. Kruglov, I.A. Bolotina

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russia

*When designing the assembly processes of engineering products one of the tasks is to select a sequence of product assembly (assembly route), which is influenced by the requirements for inspection and testing, the availability of standard processes, regulated sequence of certain operations. In terms of design process automation, multi-variance of assembly technology is the problem. In addition, in precision structure assembling it is necessary to take into account the geometry of the components, methods of connection and patterns of individual surfaces conjugation. To reduce the manual labor in the design of technology it is necessary to create a system of computer-aided design for technology of high-precision structure assembling. To develop such a system it is proposed to use the design algorithm of technological assembly processes based on oriented constraint hypergraphs describing variants of part combinations, making impossible subsequent assembling other components. When using this algorithm the pairs of conjugated parts are considered alternately and those parts which cannot be installed in the assembly unit in assembling the pairs are indicated as restrictions. Constraint hypergraph description can be presented both in graphical and tabular form.*

*Variants of processes not contradicting with the constraints for a given assembly unit are calculated on the basis of the constraint hypergraph. This approach can significantly reduce the number of assembly options under consideration and offer the technology developer a list of options, ranked according to certain criteria or the value of the objective function.*

*This algorithm has been tested in the development of assembly technology for high-precision shaped charge. It reduced the number of considered technology options from more than 5000 to 32. It is proposed to consider the possibility of progressive assembly taking into account production section turnover as a criterion of assembly option selection.*

**Keywords:** *sequence of assembly, assembly technology, constraint hypergraph.*

### REFERENCES

- [1] Korsakov V.S., Kapustin N.M., Tempel'gof K.Kh., et al. *Avtomatizatsiya proektirovaniya tekhnologicheskikh protsessov v mashinostroenii* [Computer Aided Design of Technological Processes in Mechanical Engineering]. Moscow, Mashinostroyeniye Publ., 1985, 304 p.
- [2] Pavlov V.V. *Nekotorye ocoennosti ASTPP v proizvodstve slozhnykh izdeliy. Avtomatizatsiya tekhnologicheskoy podgotovki na osnove ESTPP* [Some Features of the Automated System for Technological Preparation of Production in Manufacturing Complex Products. Automation of Technological Preparation Based on Unified System of Technological Preparation of Production]. Moscow, Standart Publ., 1976, p. 152.
- [3] Ershov V.I., Pavlov V.V., et al. *Tekhnologiya sborki samoletov* [Technology of Aircraft Assembling]. Moscow, Nauka Publ., 1986, 456 p.

- [4] Solomentsev Yu.M., Mitrofanov V.G., Pavlov V.V., et al. *Informatsionno-yuchislitelnye sistemy v mashinostroenii. CALS-tehnologii* [Information and Computer Systems in Mechanical Engineering. CALS-Technologies]. Moscow, Nauka Publ., 2003, 292 p.
- [5] Bozhko A.N. *Nauka i obrazovanie: elektronnoe nauchnoe izdanie — Science and Education: Electronic Scientific Journal*, 2010, no. 7. Available at: <http://technomag.bmstu.ru/doc/147483.html> (accessed 27 November 2015).
- [6] Bozhko A.N. *Nauka i obrazovanie: elektronnoe nauchnoe izdanie — Science and Education: Electronic Scientific Journal*, 2011, no. 3. Available at: <http://technomag.bmstu.ru/doc/168373.html> (accessed 27 November 2015).
- [7] Tarasov V.A., Baskakov V.D., Kruglov P.V. *Oboronnaya tekhnika — Defence Technology*, 2000, no. 1–2, pp. 89–92.
- [8] Tarasov V.A., Baskakov V.D., Kruglov P.V. Nauchnye osnovy proektirovaniya tekhnologii izgotovleniya pretsizionnykh kumulyativnykh zaryadov [Scientific Basis for the Design of Precision Shaped Charge Manufacturing Techniques.]. *Ekstremalnye sostoyaniya veshchestva. Detonatsiya. Udarnye volny. Trudy mezhdunarodnoy konferentsii III kharitonovskie tematicheskie nauchnye chteniya* [Extreme States of Matter. Detonation. Shock Waves. Proceedings of the International Conference: III Khariton Topical Scientific Conference]. Sarov, FGUP “RFYaTs-VNIIEF Publ., 2002, pp. 254–257.
- [9] Evgenev G.B. *Intellektualnye sistemy proektirovaniya* [Intelligent Design Systems]. Moscow, BMSTU Publ., 2009, 334 p.
- [10] Belousov A.I., Pastukhovskiy A.V. *Fundamentalnaya i Prikladnaya Matematika — Fundamental and Applied Mathematics*, 1996, vol. 2, no. 4, pp. 1163–1186.
- [11] Zykov A.A. *Uspekhi matematicheskikh nauk — Advances of Mathematical Sciences*, 1974, no. 6, pp. 89–154.
- [12] Gorbatov V.A. *Osnovy diskretnoy matematiki* [Fundamentals of Discrete Mathematics]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1986, 311 p.
- [13] Tarasov V.A., Kruglov P.V., Pastukhovskiy A.V. Primenenie orientirovannykh gipergrafov dlya proektirovaniya tekhnologii sborki zaryadov [Application of Oriented Hypergraphs for Designing Charge Assembling Technology]. *Ekstremalnye sostoyaniya veshchestva. Detonatsiya. Udarnye volny. Trudy mezhdunarodnoy konferentsii XI kharitonovskie tematicheskie nauchnye chteniya* [Extreme States of Matter. Detonation. Shock Waves. Proceedings of the International Conference: XI Khariton Topical Scientific Conference]. Sarov, FGUP “RFYaTs-VNIIEF” Publ., 2009, pp. 743–748.
- [14] Tarasov V.A., Kruglov P.V. Metodika proektirovaniya sborki zaryadov s ispolzovaniem orientirovannykh gipergrafov [Methods of Designing Charge Assembling Technology Using Oriented Hypergraphs]. Mikhaylov A.L., ed. *Ekstremalnye sostoyaniya veshchestva. Detonatsiya. Udarnye volny. Trudy mezhdunarodnoy konferentsii XIII kharitonovskie tematicheskie nauchnye chteniya* [Extreme States of Matter. Detonation. Shock Waves. Proceedings of the International Conference: XIII Khariton Topical Scientific Conference]. Sarov, FGUP “RFYaTs-VNIIEF” Publ., 2011, pp. 776–780.
- [15] Tarasov V.A., Kruglov P.V. *Nauka i obrazovanie: elektronnoe nauchnoe izdanie — Science and Education: Electronic Scientific Journal*, 2012, no. 1. Available at: <http://technomag.bmstu.ru/doc/260312.html> (accessed 15 January 2016).
- [16] Tarasov V.A., Kruglov P.V., Bolotina I.A. *Nauka i obrazovanie: elektronnoe nauchnoe izdanie — Science and Education: Electronic Scientific Journal*, 2012,

no. 2. Available at: <http://technomag.bmstu.ru/doc/339658.html> (accessed 15 January 2016).

[17] Babkin A.V., Veldanov V.A., Gryaznov E.F. *Sredstva porazheniya i boepripasy* [Ordnance and Munitions]. Moscow, BMSTU Publ., 2008, 984 p.

**Kruglov P.V.** graduated from Bauman Moscow State Technical University in 1996. Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Department of Technology of Space Rocket Engineering, Bauman Moscow State Technical University. Author of over 40 research publications in the field of technology of special machinery. e-mail: [kruglov@sm.bmstu.ru](mailto:kruglov@sm.bmstu.ru)

**Bolotina I.A.** graduated from Bauman Moscow Higher Technical School in 1983. Assistant Lecture, Department of Technology of Space Rocket Engineering, Bauman Moscow State Technical University. Author of 8 Certificates of Authorship and over 20 research publications in the field of mechanical engineering.