

УДК 658.512: 67.02

doi: 10.18698/0536-1044-2023-11-45-52

Совершенствование методического обеспечения для проектирования технологического процесса узловой сборки летательных аппаратов на основе применения гиперграфов ограничений

А.А. Лушкин, П.В. Круглов, И.А. Болотина

МГТУ им. Н.Э. Баумана

Methodological support improvement in the aircraft technological processes design based on using the constraint hypergraphs

A.A. Lushkin, P.V. Kruglov, I.A. Bolotina

Bauman Moscow State Technical University

Проектирование технологического процесса сборки изделия — важный этап технологической подготовки его производства, который существенно влияет на трудоемкость и себестоимость. В настоящее время на производственных предприятиях автоматизирована большая часть этапов разработки технологического процесса изготовления изделия. Однако проектирование технологического процесса сборки изделия до сих пор выполняют вручную, поэтому его автоматизация является современной и актуальной задачей. Рассмотрена классификация существующих методов автоматизации проектирования технологического процесса сборки. Сформулированы и проанализированы основные проблемы, возникающие при решении этой задачи. Проведен обзор сборочной модели устройства для технического обслуживания раскрываемых космических конструкций в рамках автоматизации проектирования технологического процесса его сборки. Описаны конструктивные ограничения, накладываемые на сборку, связи между деталями и отличительные особенности сборки рассматриваемого изделия. Предложен вариант последовательности сборки этого устройства, ожидаемый при корректной работе разрабатываемого алгоритма.

Ключевые слова: гиперграф ограничений, сборочная модель, параллельная сборка, автоматизация проектирования последовательности сборки

Assembly technological process design is an important stage in technological preparation of the product manufacture significantly influencing labor intensity and production cost. Currently, most stages in design and development of the technological processes in product manufacture are automated at the production enterprises. However, assembly design is still manual, which results in a fact that design automation of the assembly technological process becomes a modern and urgent task. The paper considers classification of the existing methods in solving the problem of automating the assembly technological design process, main problems in solving this problem are being formulated and analyzed. The assembly model of a device for servicing the deployable space structures was reviewed as part of automating the design technological process of its assembly. Design restrictions imposed on the assembly, connections between components and distinctive features of the product assembly in

question are described. The device assembly sequence option is proposed, it could be expected with the developed algorithm correct operation.

Keywords: constraint hypergraph, assembly model, parallel assembly, assembly sequence design automation

Проектирование технологического процесса сборки изделия до сих пор осуществляют вручную. Ввиду большой трудоемкости работ, выполняемых при ручном проектировании [1], и возможности создания нерациональных маршрутных технологических процессов сборки автоматизация проектирования технологического процесса сборки изделия становится актуальной задачей.

Цель работы — создание методического обеспечения для автоматизации проектирования технологического процесса сборки изделия на основе гиперграфов ограничений.

В работе [1] дан подробный обзор современных методов автоматизации проектирования технологического процесса сборки изделия. Рассмотрим некоторые из них.

Методы автоматизации проектирования технологического процесса сборки изделия. Эти методы можно подразделить на три группы.

Методы первой группы основаны на логической системе, состоящей из правил или ограничений [2, 3]. В качестве базы правил в первую очередь выступает геометрическая разрешимость сборки изделия, но также могут быть использованы технологические сборочные ограничения. Одним из самых эффективных способов оперирования ограничениями является применение различных графов и гиперграфов [4].

Достоинства методов первой группы заключаются в линейности и простоте формирования правил логической системы, а также в сравнительно высокой эффективности алгоритма. К их недостаткам относится трудоемкость формирования правил для многокомпонентных сборок (более 100 деталей), а также отсутствие преемственности между сформированными логическими системами, т. е. необходимость создания индивидуального набора ограничений для каждого отдельного случая.

Методы второй группы основаны на экспертных знаниях [5, 6]. Здесь происходит формирование базы данных экспертных знаний о различных конструктивных и технологических сборочных ограничениях и ее дальнейшее ис-

пользование при проектировании технологического процесса сборки изделия и последовательности сборки (ПС).

Главное достоинство методов второй группы состоит в преемственности, т. е. в применении накопленного опыта для решения новых задач, что особенно эффективно в отношении технологических ограничений на сборку, так как они являются более типовыми, чем конструктивные.

К недостаткам второй группы методов относятся высокая трудоемкость подготовки исходной базы данных, отсутствие универсальности, затруднительная и неоднозначная формализация базы данных для ее эффективного использования.

Методы третьей группы построены на принципе сборки изделия путем разборки [7, 8]. Здесь рассматривают процесс пошаговой разборки готовой собранной 3D-модели изделия. Этот процесс осуществляется системой автоматически путем анализа существующих связей между деталями и обнаружения несоответствия геометрических характеристик при их виртуальном разъединении [9]. Полученную последовательность разборки инвертируют, превращая в ПС.

Достоинства методов третьей группы заключаются в высокой эффективности (так как многие нереализуемые ПС исключаются автоматически) и автоматизированном извлечении исходных данных для проектирования ПС из САД-файла сборки, что снимает с оператора большой объем работы и значительно повышает степень автоматизации всей системы.

Недостатками методов третьей группы являются высокая сложность рабочего алгоритма, необходимость больших вычислительных мощностей и ограниченная применимость таких систем в силу трудности учета и обработки различных способов соединения деталей.

На основании изложенного и выводов, сделанных в работах [10, 11], можно выделить три основные проблемы, возникающие при решении задачи автоматизации проектирования ПС.

Первая проблема — определение формата исходных данных, в качестве которых выступают

геометрические характеристики деталей, связи между ними и технологические ограничения, накладываемые на эти связи. Архитектура и эффективность всей системы автоматизации проектирования ПС зависит от выбранного формата исходных данных: ограничений и правил, баз данных или САД-файла сборки изделия.

Вторая проблема — повышение эффективности алгоритма. С увеличением числа сборочных компонентов вычислительные мощности возрастают экспоненциально. Таким образом, сокращение числа альтернативных (нереализуемых) ПС является основным способом оптимизации таких систем.

Третья проблема — интегрирование или взаимодействие системы автоматизации проектирования ПС с существующими САД/САМ-системами. Геометрические характеристики деталей и связи между ними заложены в САД-файл сборки. Обеспечение автоматического извлечения этих данных для работы алгоритма значительно повысит степень автоматизации технологического процесса сборки изделия, а также его эффективность.

В отечественной работе [12] предложен перспективный метод первой группы, основанный на использовании гиперграфов ограничений геометрической разрешимости сборки изделия. Этот метод в дальнейшем выбран за основу для создания алгоритма, закладываемого в программное обеспечение для автоматизации проектирования технологического процесса сборки изделия.

Из зарубежных исследований следует выделить работу польских ученых, в которой они представили версию программного обеспечения с использованием алгоритма, основанного на направленных графах и гиперграфах ограничений [13]. Однако, несмотря на значительные достижения в решении этой задачи автоматизации проектирования ПС, этот алгоритм, как и многие другие, имеет следующие основные недостатки:

- отсутствие автоматизации получения исходных данных, т. е. все данные, необходимые для программного обеспечения определяют и вводят вручную;
- отсутствие учета технологических сборочных ограничений, определяющих приоритет сборочных операций, и позволяющих выбрать оптимальную ПС из возможных;
- применение большей части предложенных решений рассмотрено только для случая после-

довательной сборки, при которой ПС можно записать в одну строку.

Рассмотрим модель прототипа устройства для технического обслуживания раскрываемых космических конструкций [14]. Предполагаем, что его будут использовать космонавты при выходе в открытый космос в качестве точки крепления и страховки. Устройство будет перемещаться вдоль рельсовой направляющей с возможностью фиксации в требуемом положении посредством пружинного механизма. Это повышает безопасность выполнения задач в условиях открытого космоса, минимизируя риск запутывания страховочных приспособлений.

Рассматриваемый прототип предполагает возможность параллельной сборки его отдельных деталей, что требует создания более совершенного алгоритма. При этом ПС нельзя записать в виде одной строки, где все компоненты следуют друг за другом. Она будет представлять собой несколько строк, в которых базовая (с наибольшим количеством связей) деталь, будет дублироваться, участвуя в каждой параллельной сборочной операции.

Помимо параллельности ПС предложенная модель имеет еще одну особенность, как правило, не учитываемую в других исследованиях. Модель позволяет протестировать алгоритм учета повторяющихся элементов при выведении результирующей ПС. Алгоритм, способный обрабатывать модели с описанными особенно-

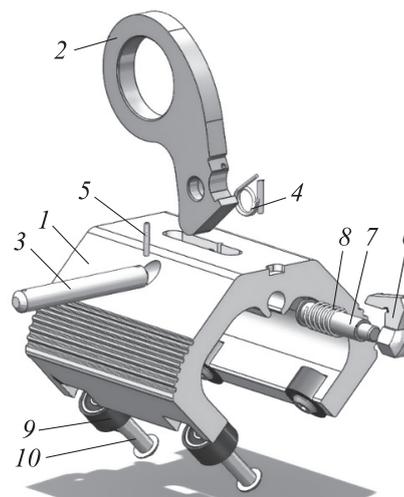


Рис. 1. Модель прототипа устройства для технического обслуживания раскрываемых космических конструкций:
1 — корпус; 2 — ответная пластина; 3 — поворотная ось; 4 и 6 — пружина кручения и сжатия; 5 — фиксатор оси; 7 — запирающий штифт; 8 — стопорный элемент; 9 — ось подшипника; 10 — подшипник

стями, будет обладать значительно большей областью применения, чем алгоритмы, существующие на сегодняшний день.

Одним из способов решения этой задачи является технология обнаружения подборок, т. е. сборочных единиц внутри общей сборки изделия [7]. В качестве итогового результата работы алгоритма запланировано получение оптимизированного набора ПС в виде таблицы с количеством строк, равным количеству параллельных сборочных операций.

Модель прототипа устройства для технического обслуживания раскрываемых космических конструкций приведена на рис. 1. Она состоит из семнадцати составляющих, десять из которых уникальные, а в состав оставшихся входят повторяющиеся элементы. Это означает, что набор конструктивных ограничений для работы алгоритма необходимо формировать только для десяти уникальных деталей. Количество этих ограничений равно 16.

Помимо конструктивных ограничений необходима информация о связях между деталями, т. е. о соединениях между ними. Число этих связей — 12. Изделие имеет два механических неразъемных соединения с использованием пружинных штифтов. Остальные соединения (механические и резьбовые) являются разъемными.

Совокупность данных о связях между деталями и о конструктивных ограничениях, накладываемых на эти связи, позволяет определить допускаемые ПС, которые будут сформированы в ходе выполнения алгоритма. Оптимальные ПС выбирают из допускаемых путем наложения дополнительных технологических ограничений, таких как трудоемкость сборки, удобство монтажа, логистика производства и др.

Связи между деталями удобно представить в виде графа (рис. 2). В качестве базовой детали

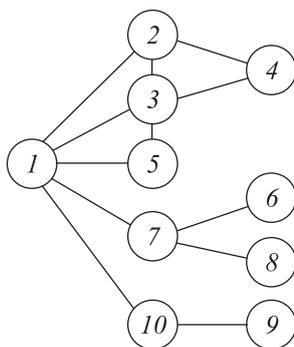


Рис. 2. Граф связей

выбран корпус 1. Граф связей наглядно отображает все взаимосвязи между деталями сборки и упрощает формирование конструктивных ограничений [15].

При последующем усовершенствовании создаваемой системы автоматизации проектирования ПС граф связей и фрагменты реализуемых ПС можно будет извлекать автоматически из САД-файла сборки [16–18].

Результаты. Конструктивные ограничения на сборку рассматриваемой модели или ограничения геометрической разрешимости сборки по аналогии с тем, как это было реализовано в работе [12], приведены в табл. 1, где номера деталей соответствуют таковым, указанным на рис. 1.

Каждому ограничению соответствует одна строка табл. 1. Для формирования ограничений рассматривают пары деталей, которые имеют между собой хотя бы одну связь. Номера деталей, формирующих пару, указаны на одной строке в первых двух столбцах. В последнем столбце записан номер детали, которую нельзя

Таблица 1

Конструктивные ограничения сборки устройства для технического обслуживания раскрываемых космических конструкций

Первая деталь	Вторая деталь	Исключаемая деталь
1	2	4
1	3	2
1	3	4
1	3	7
1	5	3
1	7	6
1	10	9
7	8	6
7	8	1
2	3	4
2	3	1
3	5	1
3	5	2
3	5	4
3	4	2
3	4	1

Таблица 2

Пример применения предлагаемого алгоритма

Номер промежуточной ПС	Последовательность сборки деталей	
	для первого варианта ПС	для второго варианта ПС
1	6 — 7 — 1 — 8	10 — 9 — 1 (×4)
2	2 — 4 — 1 — 3 — 5	6 — 7 — 1 — 8
3	10 — 9 — 1 (×4)	2 — 4 — 1 — 3 — 5

устанавливать в сборочную единицу, если перед ней будут собраны детали из рассматриваемой пары.

В качестве примера рассмотрим первую строку табл. 1. Деталь 4 нельзя устанавливать, если сначала между собой будут соединены детали 1 и 2. Такой подход позволяет исключить ветви нереализуемых ПС на ранних этапах проектирования ПС, значительно оптимизируя работу алгоритма, и снижая количество вычислений.

Пример применения предлагаемого алгоритма для рассматриваемого изделия при двух вариантах ПС приведен в табл. 2, где номера деталей соответствуют таковым, указанным на рис. 1. Каждый вариант состоит из трех промежуточных ПС. Для непрерывно повторяющихся промежуточных ПС в скобках указан множитель соответствующих количеству повторений.

Впоследствии из этих вариантов ПС будет выбран один — наиболее рациональный — путем наложения технологических сборочных ограничений и учета различных критериев. Такими частными критериями могут быть трудоемкость и себестоимость технологического процесса сборки изделия, штучное время отдельных сборочных операций, маршруты перемещения собираемых деталей по производственным участкам и рабочим местам, а также комплексный критерий, в котором каждый из перечисленных частных критериев будет учтен с определенным весовым коэффициентом [19].

Выводы

1. Показано, что для создания универсальной системы автоматизированного проектирования ПС изделия необходимо задать наиболее широкие границы ее применимости и универсальный способ вывода результата.

2. Установлено, что перспективным подходом к автоматизации проектирования технологического процесса сборки изделия является совместное использование методов трех типов.

3. Предложен алгоритм автоматизации проектирования технологического процесса сборки изделия, включающий в себя два этапа:

- генерацию реализуемых ПС методом сборки путем разборки с автоматическим извлечением исходных данных из САД-файла сборки изделия при сохранении возможности ручного ввода ряда конструктивных ограничений для дополнительной оптимизации системы и повышения ее универсальности;

- определение наиболее рациональной ПС путем наложения технологических ограничений на полученное множество ПС; технологические ограничения удобно хранить в подготовленной базе данных, поскольку, как правило, они имеют типовой характер, и их разнообразие в рамках сборочных операций относительно невелико; наличие такой базы данных значительно облегчает работу оператора, не исключая возможности внесения новых ограничений.

Литература

- [1] Лушкин А.А., Круглов П.В. Методическое обеспечение для проектирования технологических процессов узловой сборки летательных аппаратов на основе применения гиперграфов ограничений. *XLV Академические чтения по космонавтике*. Т. 4. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2021, с. 121–125.
- [2] Божко А.Н., Родионов С.В. Методы искусственного интеллекта в автоматизированном проектировании процессов сборки. *Наука и образование: научное издание*, 2016, № 8, URL: <http://engineering-science.ru/doc/844719.html>

- [3] Чимитов П.Е. Построение последовательности сборки планера самолета на основе образа изделия. *Вестник СибГАУ*, 2009, № 2, с. 218–222.
- [4] Тарасов В.А., Круглов П.В. Метод генерации проектных решений сборки изделий с применением ориентированных гиперграфов. *Наука и образование: научное издание*, 2012, № 1, URL: <http://engineering-science.ru/doc/260312.html>
- [5] Анисин Д.А., Морозов И.В. Автоматизация проектирования технологического процесса проектирования. *Труды МАИ*, 2012, № 51. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=29162>
- [6] Самсонов О.С., Шенаев М.О., Саутенков М.Е. и др. Разработка информационного обеспечения для проектирования и моделирования технологических процессов сборки изделий авиационной техники. *Известия Самарского научного центра РАН*, 2014, т. 16, № 1–5, с. 1601–1608.
- [7] Agrawal D., Kumara S., Finke D. Automated assembly sequence planning and subassembly detection. *IIE Annual Conf. IIE*, 2014, pp. 781–788.
- [8] Лаврентьева М.В., Чимитов П.Е., Карлина Ю.И. Реализация алгоритма распознавания 3d-модели изделий авиамашиностроения. *Современные технологии. Системный анализ. Моделирование*, 2017, № 2, с. 54–60.
- [9] Gunjia V.M., Deepak B.B.V.L., Khamari B.K. CAD-based automatic clash analysis for robotic assembly. *Int. J. Math. Eng. Manag. Sci.*, 2019, vol. 4, no. 2, pp. 432–441, doi: <http://dx.doi.org/10.33889/IJMEMS.2019.4.2-035>
- [10] Hommem de Mello L.S., Lee S. Computer-aided mechanical assembly planning. *Springer*, 1991. 446 p.
- [11] Ахатов Р.Х., Чимитов П.Е. Выбор последовательности сборки в условиях автоматизированного проектирования технологического процесса. *Научный вестник Норильского индустриального института*, 2008, № 2, с. 19–22.
- [12] Круглов П.В., Болотина И.А. Применение ориентированных гиперграфов ограниченных при проектировании технологии изготовления высокоточных конструкций. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2016, № 5, doi: <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2016-5-1494>
- [13] Suszyński M., Żurek J. Computer aided assembly sequence generation. *Manag. Prod. Eng. Rev.*, 2015, vol. 6, no. 3, pp. 83–87.
- [14] Бакулин В.Н., Борзых С.В. Подход для построения динамических моделей процесса раскрытия трансформируемых космических конструкций. *Доклады РАН. Физика, технические науки*, 2021, т. 499, № 1, с. 66–72, doi: <https://doi.org/10.31857/S2686740021040040>
- [15] Божко А.Н. Выбор рациональной последовательности сборки изделия. *Наука и образование: научное издание*, 2010, № 7. URL: <http://engineering-science.ru/doc/147483.html>
- [16] Bahubalendruni M.V.A.R., Biswal B.B., Deepak B. Computer aided assembly attributes retrieval methods for automated assembly sequence generation. *Int. J. Mech. Mechatron. Eng.*, 2017, vol. 11, no. 4, pp. 759–767, doi: <https://doi.org/10.5281/zenodo.1130002>
- [17] Michniewicz J., Reinhart G., Boschert S. CAD-based automated assembly planning for variable products in modular production systems. *Procedia CIRP*, 2016, vol. 44, pp. 44–49, <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.02.016>
- [18] Melckenbeeck I., Burggraeve S., Van Doninck B. Optimal assembly sequence based on design for assembly (DFA) rules. *Procedia CIRP*, 2020, vol. 91, pp. 646–652, <https://doi.org/10.1016/j.procir.2020.02.223>
- [19] Севостьянов И.В. Рациональная последовательность проектирования технологических процессов сборки. *Научные труды Винницкого национального технического университета*, 2015, № 1. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=23296600>

References

- [1] Lushkin A.A., Kruglov P.V. [Methodological support for the design of technological processes of nodal assembly of aircraft based on the use of hypergraphs of constraints]. *XLV Akademicheskie chteniya po kosmonavtike*. Т. 4 [XLV Academic Readings on Cosmonautics. Vol. 4]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2021, pp. 121–125. (In Russ.).

- [2] Bozhko A.N., Rodionov S.V. Artificial intelligence methods in computer aided design of assembly processes. *Nauka i obrazovanie: nauchnoe izdanie* [Science and Education: Scientific Publication], 2016, no. 8. URL: <http://engineering-science.ru/doc/844719.html> (in Russ.).
- [3] Chimitov P.E. The airframe's assembly sequence planning used an item images. *Vestnik SibGAU* [Vestnik SibSAU], 2009, no. 2, pp. 218–222. (In Russ.).
- [4] Tarasov V.A., Kruglov P.V. Method of generating design solutions for assembly of the product, using oriented hypergraphs. *Nauka i obrazovanie: nauchnoe izdanie* [Science and Education: Scientific Publication], 2012, no. 1, URL: <http://engineering-science.ru/doc/260312.html> (in Russ.).
- [5] Anisin D.A., Morozov I.V. Procedure for reviewing and making a decision on publication of the paper. *Trudy MAI*, 2012, no. 51. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=29162> (in Russ.).
- [6] Samsonov O.S., Shenaev M.O., Sautenkov M.E. et al. Development of information support for design and modeling the assembly technological processes of aircraft equipment. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra RAN* [Izvestia RAS SamSC], 2014, vol. 16, no. 1–5, pp. 1601–1608. (In Russ.).
- [7] Agrawal D., Kumara S., Finke D. Automated assembly sequence planning and subassembly detection. *IIE Annual Conf. IIE*, 2014, pp. 781–788.
- [8] Lavrentyeva M.V., Chimitov P.E., Karlina Yu.I. Realization of the machine-building products 3d model recognition algorithm. *Sovremennyye tekhnologii. Sistemnyy analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2017, no. 2, pp. 54–60. (In Russ.).
- [9] Gunjia B.M., Deepak B.B.V.L., Khamari B.K. CAD-based automatic clash analysis for robotic assembly. *Int. J. Math. Eng. Manag. Sci.*, 2019, vol. 4, no. 2, pp. 432–441, doi: <http://dx.doi.org/10.33889/IJMEMS.2019.4.2-035>
- [10] Hommem de Mello L.S., Lee S. *Computer-aided mechanical assembly planning*. Springer, 1991. 446 p.
- [11] Akhatov R.Kh., Chimitov P.E. Selection of the assembly sequence in a computer-aided process design environment. *Nauchnyy vestnik Noril'skogo industrial'nogo instituta*, 2008, no. 2, pp. 19–22. (In Russ.).
- [12] Kruglov P.V., Bolotina I.A. Application of oriented constraint hypergraphs in designing manufacturing technology precision structure. *Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii* [Engineering Journal: Science and Innovation], 2016, no. 5, doi: <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2016-5-1494> (in Russ.).
- [13] Suszyński M., Żurek J. Computer aided assembly sequence generation. *Manag. Prod. Eng. Rev.*, 2015, vol. 6, no. 3, pp. 83–87.
- [14] Bakulin V.N., Borzykh S.V. An approach for building dynamic models of the process of disclosure of transformable space structures. *Doklady RAN. Fizika, tekhnicheskie nauki*, 2021, vol. 499, no. 1, pp. 66–72, doi: <https://doi.org/10.31857/S2686740021040040> (in Russ.). (Eng. version: *Dokl. Phys.*, 2021, vol. 66, no. 8, pp. 243–248, doi: <https://doi.org/10.1134/S1028335821080024>)
- [15] Bozhko A.N. Choice of rational balance of assembly of a product. *Nauka i obrazovanie: nauchnoe izdanie* [Science and Education: Scientific Publication], 2010, no. 7. URL: <http://engineering-science.ru/doc/147483.html> (in Russ.).
- [16] Bahubalendruni M.V.A.R., Biswal B.B., Deepak B. Computer aided assembly attributes retrieval methods for automated assembly sequence generation. *Int. J. Mech. Mechatron. Eng.*, 2017, vol. 11, no. 4, pp. 759–767, doi: <https://doi.org/10.5281/zenodo.1130002>
- [17] Michniewicz J., Reinhart G., Boschert S. CAD-based automated assembly planning for variable products in modular production systems. *Procedia CIRP*, 2016, vol. 44, pp. 44–49, <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.02.016>
- [18] Melckenbeeck I., Burggraefe S., Van Doninck B. Optimal assembly sequence based on design for assembly (DFA) rules. *Procedia CIRP*, 2020, vol. 91, pp. 646–652, <https://doi.org/10.1016/j.procir.2020.02.223>
- [19] Sevostyanov I.V. Rational sequence of assembly process design. *Nauchnye trudy Vinnitskogo natsionalnogo tekhnicheskogo universiteta* [Scientific Works of Vinnitsia National Technical University], 2015, no. 1. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=23296600> (in Russ.).

Информация об авторах

ЛУШКИН Андрей Андреевич — аспирант кафедры «Технологии ракетно-космического машиностроения». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: lushkin.andrew@yandex.ru).

КРУГЛОВ Павел Владимирович — доктор технических наук, профессор кафедры «Технологии ракетно-космического машиностроения». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: kpv17@bmstu.ru).

БОЛОТИНА Ирина Алексеевна — старший преподаватель кафедры «Технологии ракетно-космического машиностроения». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: bolotina_i@bmstu.ru).

Information about the authors

LUSHKIN Andrey Andreevich — Postgraduate, Technology of Rocket and Space Engineering Department. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: lushkin.andrew@yandex.ru).

KRUGLOV Pavel Vladimirovich — Doctor of Science (Eng.), Professor, Technology of Rocket and Space Engineering Department. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: kpv17@bmstu.ru).

BOLOTINA Irina Alekseevna — Senior Lecturer, Technology of Rocket and Space Engineering Department. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: bolotina_i@bmstu.ru).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Лушкин А.А., Круглов П.В., Болотина И.А. Совершенствование методического обеспечения для проектирования технологического процесса узловой сборки летательных аппаратов на основе применения гиперграфов ограничений. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2023, № 11, с. 45–52, doi: 10.18698/0536-1044-2023-11-45-52

Please cite this article in English as:

Lushkin A.A., Kruglov P.V., Bolotina I.A. Methodological Support Improvement in the Aircraft Technological Process Design Based on Using the Constraint Hypergraphs. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2023, no. 11, pp. 45–52, doi: 10.18698/0536-1044-2023-11-45-52



**Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана
предлагает читателям учебное пособие**

«Практическое применение численных методов»

Авторы: К.В. Титов, А.А. Очков

Соответствует учебным модулям программ дисциплин «Численные методы», «Численные методы и методы оптимизации». Включает в себя описание применения численных методов в математических программных пакетах. Представлены методы прогнозирования, широко применимые как в технике, так и в экономике.

Для студентов МГТУ им. Н.Э. Баумана, обучающихся по направлениям подготовки 15.03.02 «Технологические машины и оборудование», специализация «Вакуумная и компрессорная техника физических установок» и 15.04.02 «Технологические машины и оборудование», специализация «Проектирование нефтегазовых комплексов».

По вопросам приобретения обращайтесь:

105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.
Тел.: +7 499 263-60-45, факс: +7 499 261-45-97;
press@bmstu.ru; <https://bmstu.press>