

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ СБОРКИ ОСЕСИММЕТРИЧНЫХ ИЗДЕЛИЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ МАТРИЦЫ ИНЦИДЕНТНОСТИ ГРАФА

В статье рассматривается решение проблемы автоматизированного определения последовательности сборки прецизионных осесимметричных изделий. Целью данной работы является рассмотрение возможности применения ориентированного графа сборки, в частности матрицы смежности и матрицы инцидентности при теоретическом описании конструкции и проектировании технологии сборки. Данный подход соответствует решению проблемы в математической форме. Произведен анализ особенностей математического моделирования конструкции и процесса сборки. Предложена методика построения графа, отображающего связи между деталями и процесс сборки. Реализация задачи автоматизированного формирования технологического процесса сборки выполнена с применением алгоритмов и компьютерной программы, основанной на матричном представлении графов. Выполнен сравнительный анализ результатов, полученных теоретически и с применением компьютера в рамках проектирования технологических процессов сборки. Полученные результаты позволяют оперативно внести необходимые изменения в последовательность сборки, на основе чего открывается возможность контроля данных и принимаемых решений при проектировании технологических процессов сборки.

Ключевые слова: моделирование сборки, граф сборочных единиц, дерево связей, алгоритм, матрица смежности, матрица инцидентности.

Введение. Процесс проектирования технологии сборки включает два этапа [1]. Первый этап — формирование схемы сборки и маршрутного технологического процесса сборки, содержащих информацию о порядке присоединения элементов изделия, комплектности сборочных единиц и соединений. Второй этап — формирование операций, определение состава присоединяемых элементов, видов работ, средств и других параметров, образующих описание сборочных операций. Творческий процесс формирования схемы сборки и маршрутного технологического процесса сборки, в ходе которого технолог выделяет технологические сборочные единицы и определяет возможный порядок сборки, является наиболее трудоёмким и трудно формализуемым. В данной работе рассматривается первый этап проектирования технологии сборки.

При моделировании технологии сборки применяется теория графов в связи с тем, что позволяет связать теоретические положения с конкретными вычислительными алгоритмами, которые просто реализуются на компьютере. Основоположником применения математических моделей в виде гра-

фа в машиностроении является Б. С. Мордвинов [2], который ввел понятие взаимосвязанной геометрической структуры машины и ее графа. Сюда входит, в частности, задача определения последовательности сборки изделий. J. Yu и L. Xu разработали подход для автоматической разработки последовательности сборки на основе метода матрицы отношений покомпонентного вида [3]. R. Gottipolu и K. Ghosh предложили подход для создания выполняемых последовательностей сборки, основанный на анализе ограничений контакта и мобильности [4]. Q. Su разработал систематический метод для анализа геометрических ограничений между сборочными единицами, основанный на интерактивном моделировании САПР-модели [5]. T. Alfidhlani, A. M. Samadhi, I. Toha [6] разработали автоматический метод для обнаружения столкновения между сборочными единицами.

Этот метод основан на геометрической информации, полученной при сопряжении сборочных единиц. M. Kanthababu, R. Giri [7] предложили подход для создания последовательности разборки механических моделей на основе ин-

терференционной матрицы и графа соединений. Основываясь на интерференционных матрицах, М. R. Bahubalendruni, В. В. Biswal внедрили интегрированные методы, основанные на теории, используемой для извлечения критериев предикатов, таких как данные связи [8, 9], механическая выполнимость [10–12] и геометрическая выполнимость [13] для создания оптимального ASP/DSP (проектирование последовательности сборки / разборки (демонтажа)) [14].

Постановка задачи. Целью исследований является проблема определения последовательности присоединения деталей при сборке изделий на основе матриц смежности и инцидентности графа.

В качестве объектов сборки для определенности будем рассматривать осесимметричные изделия.

При построении процесса сборки следует учитывать, что процесс сборки — это процесс образования связей между деталями. Поэтому вначале необходимо выявить данные связи, что возможно на основе использования математической модели изделия в виде графа, где детали — вершины, связи — ребра.

Если определить последовательность образования связей, которые выявлены в конструкции узла, то этим решается задача определения последовательности сборки изделия.

Граф связи между деталями узла может быть представлен в виде матрицы смежности (графа), а последовательность образования связей может быть представлена в виде матрицы инцидентности данного графа, в которой последовательность столбцов, т.е. ребер будет определять последовательность сборки.

Задача исследований сводится к разработке методики построения и упорядочения матрицы инцидентности графа.

Разработанная теория.

Методика построения и упорядочения матрицы инцидентности графа.

1. Построение геометрической модели сборочной единицы (изделия).

2. Выявление контактов и силовых замыканий. Под контактом будем понимать соединение деталей, непосредственно соприкасающихся плоскими или цилиндрическими поверхностями или допускающих расположение между ними третьей детали.

3. Выявление для каждой детали связей с другими деталями с построением матрицы смежности.

4. Упорядочение деталей, составление модели конструкции сборочной единицы (на основе матрицы смежности графа) [15].

5. Построение графа с ребрами-контактами и добавление ребер силового замыкания для модели конструкции сборочной единицы.

6. Определение правил последовательности при сборке для участков, ограниченных силовыми замыканиями.

7. Построение исходной, неупорядоченной матрицы инцидентности по матрице смежности.

8. Упорядочение связей в матрице инцидентности.

9. Реализация процесса сборки.

Допущения:

1. Под силовым замыканием будем подразумевать соединение деталей, получаемое путем приложения к ним сил, гарантирующих непрерывность контакта, сохранение положения детали относительно другой детали в соответствии с конструкцией сборочной единицы (резьбовые соединения,

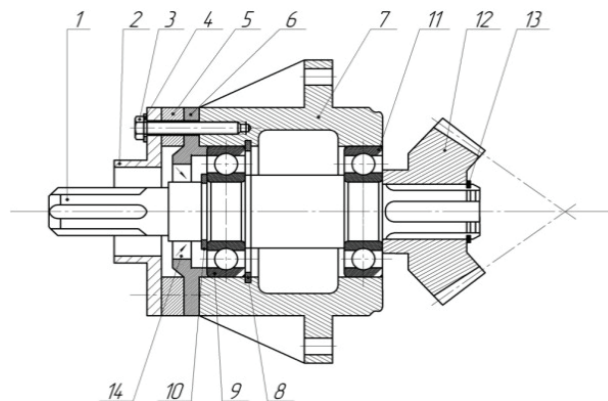


Рис. 1. Узел привода, включающий нижеперечисленные части изделия (детали): 1 — шлицевой вал, 2 — крышка, 3 — болт, 4 — шайба, 5 — проставочное кольцо, 6 — обойма уплотнения вала, 7 — корпус, 8, 10, 13 — стопорные кольца, 9 и 11 — шариковые подшипники, 12 — коническое зубчатое колесо, 14 — кольцо уплотнения вала

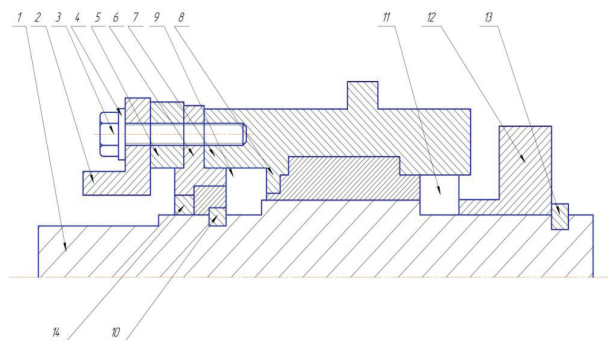


Рис. 2. Геометрическая модель конструкции узла «Вал привода»

соединения с применением стопорных колец, соединения с натягом и другие).

2. Контакт будем считать признаком связи деталей, зазор — свойством силового замыкания.

Результаты экспериментов. Рассмотрим реализацию методики на примере вала привода [16] (рис. 1), рассмотрим его характеристику, расчленение на элементы.

Для осуществления моделирования конструкции узла «Вал привода» нужно перейти к модели узла в виде его геометрической модели, в которой все детали имеют только плоские и цилиндрические поверхности (рис. 2). Преобразуем форму некоторых деталей, заменяя конические, сферические, резьбовые, фасонные поверхности плоскими и цилиндрическими поверхностями.

1. Выявление контактов и силовых замыканий.

Математическое моделирование будем осуществлять на основе упрощенной модели в виде графа, учитывающей связи только в одном — осевом — направлении (между торцами деталей).

В качестве вершин графа примем детали, а в качестве ребер графа — связи между деталями.

Под связью понимаем непосредственный контакт между деталями, определенный зазор или ограничение на взаимное расположение деталей в сборочной единице.

Будем указывать в качестве номера связи номера деталей, с которыми связана данная деталь

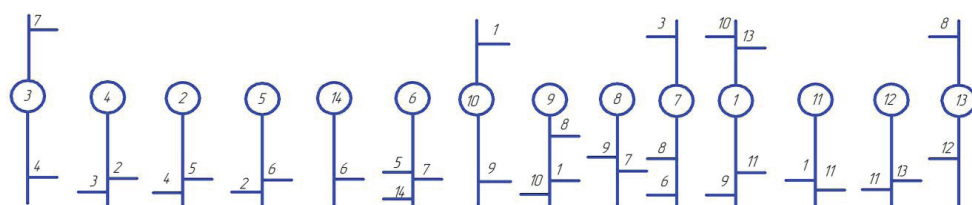


Рис. 3. Обозначение направлений и ранга связей между деталями в модели конструкции сборочной единицы

Последовательность сборки по графу контактов

3	13
4	12
2	11
5	10
14	7
6	9
10	8
9	6
8	5
7	7
1	2
11	3
12	4
13	

Таблица 1

(рис. 3). Если есть контакт между деталями, то отмечаем направление от рассматриваемой детали к сопрягаемой — вправо или влево, в зависимости от того, справа или слева расположена сопрягаемая деталь, ограничивающая смещение рассматриваемой детали.

Вид связи определяется рангом:

1-й ранг — соединение непосредственное (контакт при сборке) — можно соединить без использования других деталей — сильная связь;

2-й ранг — соединение возможно только после предварительной сборки других деталей (имеется контакт) — слабая связь;

3-й ранг — связь отмечает взаимное расположение деталей в сборочной единице без непосредственного контакта или запрет на невозможные положения.

Ранг связи указывается рядом с номером связи, отделяется от номера связи точкой.

2. Выявление для каждой детали связей 1-го и 2-го рангов с построением матрицы смежности.

2.1. Связи 1-го и 2-го рангов — это только контакты — по графу контактов (их будет на единицу меньше, чем число деталей), то есть начинать нужно

Таблица 2

Матрица смежности (результат упорядочения)

N	3	4	2	5	14	6	10	9	8	7	1	11	12	13
3	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	1	0	-2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	2	0	-2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
14	0	0	0	0	0	-2	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	2	0	0	-2	0	-2	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-2	0	0	0
9	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	-2	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	2	0	0	1	0	0	0	0	0
1	0	0	0	0	0	0	2	2	0	0	0	-1	0	-2
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	-2	0
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0
13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0

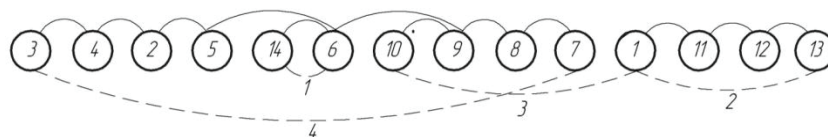


Рис. 4. Граф-дерево связей (контактов) и силовых замыканий между деталями (сплошные линии — контакты, пунктирные — силовые замыкания)

Таблица 3

Матрица инцидентности (неупорядоченные связи)

3				1										
4				1		2								
2			2		2									
5			2			2								
14													2	
6						2	2	2					2	
10												2		
9								2			2			
8										1				
7							2		1					
1	1		2							2	2			
11	1												2	
12													2	
13			2											

Таблица 4

Матрица инцидентности (упорядоченные связи)

3														1
4													2	1
2											2		2	
5										2	2			
14									2					
6							2	2	2		2			
10			2											
9			2				2							
8	1													
7	1							2						
1		2	2		1				2					
11					1									
12						2								
13							2							

с выявления контактов, в результате должно получиться дерево связей (контактов) между деталями (табл. 1).

3. Упорядочение деталей, составление модели конструкции сборочной единицы (на основе матрицы смежности графа) [17]. Процесс упорядочения заключается в перестановке строк и соответствующих столбцов таким образом, чтобы сверху от главной диагонали разместились отрицательные числа, снизу — положительные, при этом единицы приблизились к главной диагонали за счёт удаления от главной диагонали чисел, равных 2.

В результате получаем следующую информацию: порядок расположения деталей в модели конструкции сборочной единицы (табл. 2).

4. Построение графа с ребрами-контактами и добавление ребер силового замыкания (рис. 4).

Учитываются и силовые контакты — по резьбе (болты, винты) для замыкания контуров, стопорные кольца.

5. Определение правил последовательности при сборке для участков, ограниченных силовыми замыканиями.

6. Построение исходной, неупорядоченной матрицы инцидентности.

Матрица инцидентности

1. Число столбцов в матрице должно быть на 1 меньше числа деталей, а количество связей, выявленных для всех деталей, больше, т.к. для каждой детали можно указать связи со всеми остальными деталями, т.е. $n-1$ связь, таким образом, $(n-1) \cdot n/2$.

В таблице указываются все возможные связи.

2. При соединении двух деталей их связи с другими деталями объединяются и связи этих двух деталей к одной и той же детали. Поэтому число столбцов в матрице должно быть не равно $n-1$, а равно числу выявленных связей.

3. Связи заносим в таблицу инцидентности (табл. 3) по порядку, который зафиксирован в ма-

Результат работы программы AL2
Модель конструкции сб.единицы после сближения деталей
Массив связей между деталями A

1 N	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	0	-1	0	0	0	0	0	0	0
2	1	0	-2	0	0	0	0	0	0
3	0	2	0	-2	0	0	0	0	0
4	0	0	2	0	0	-2	0	0	0
5	0	0	0	0	-2	0	0	0	0
6	0	0	0	2	2	0	0	-2	0
7	0	0	0	0	0	0	0	-2	0
8	0	0	0	0	0	2	2	0	-2
9	0	0	0	0	0	0	2	0	-1
10	0	0	0	0	0	0	0	0	1
11	0	0	0	0	0	0	2	0	0
12	0	0	0	0	0	0	0	0	1
13	0	0	0	0	0	0	0	0	2
14	0	0	0	0	0	0	0	0	2

Массив расположения деталей B
3 4 2 5 14 6 10 9 8 7 1 11 12 13
Результат работы подпрограммы AL3
Последовательность соединения деталей :

!номер !перехода! !сборки !	!деталь(сб.единица) !основная !	!деталь(сб.единица) !присоединяемая !	!ранг !связи !
1	4	3	1
2	7	8	1
3	11	1	1
4	2	3	2
5	5	3	2
6	6	14	2
7	14	3	2
8	9	10	2
9	10	3	2
10	8	3	2
11	1	3	2
12	12	3	2
13	13	3	2

Рис. 5. Результаты работы программы

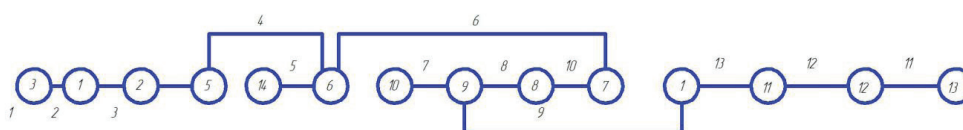


Рис. 6. Итоговая модель конструкции узла «Привод вала» с информацией о связях

трице смежности. Учитываются только связи первого и второго ранга. Связи третьего ранга нужны для построения узла, а не для определения последовательности сборки.

7. Упорядочение связей в матрице инцидентности. Следующая связь должна охватывать предыдущую.

Правило последовательности присоединения деталей нужно формулировать на основе того, что будет использоваться матрица инцидентности графа, что означает упорядочение связей между деталями, а связи — в матрице инцидентности (табл. 4).

8. Реализация процесса сборки. Перед началом сборки составляем новую таблицу. Соединенные связи объединяем и уменьшаем с каждым присоединением матрицу на одну строку и один столбец.

В результате выполнения программы на экране дисплея выводится матрица связей между деталями сборочной единицы.

При правильно подготовленных данных матрица должна быть кососимметричной.

Далее программой осуществляется моделирование конструкции сборочной единицы и маршрутно-технологического процесса сборки.

В ходе проведения сравнения и анализа отличий теоретического результата моделирования конструкции сборочной единицы и маршрутного технологического процесса сборки с компьютерным был выполнен ряд численных экспериментов.

Обсуждение экспериментов. В результате проведения численного эксперимента на экране дисплея компьютера выдается следующая информация: порядок расположения деталей в модели конструкции сборочной единицы и последовательность присоединения деталей (рис. 5).

В результате работы программы была получена корректная итоговая модель схемы сборки с информацией о связях (рис. 6).

Выводы. В статье был проведен анализ особенностей математического моделирования процессов

сборки, теоретическое исследование конструкции и схемы сборки. Построены матрицы смежности и инцидентности графа, наглядно отображающие связи между деталями и последовательность сборки изделия.

Результаты теоретических исследований дополнены исследованиями с применением компьютерной программы для автоматизированного формирования технологического процесса сборки, основанной на матричном представлении графов. Полученные результаты позволяют обеспечить автоматизированное построение модели конструкции и автоматическое построение технологической схемы сборки по теоретически сформированной модели конструкции, оперативно внести необходимые изменения в последовательность сборки, на основе чего появляется возможность контроля данных и принимаемых решений при размерном анализе конструкций и при проектировании технологических процессов сборки.

Библиографический список

1. Челищев Б. Е., Боброва И. В., Гонсалес-Сабатер А. Автоматизация проектирования технологии в машиностроении. М.: Машиностроение, 1987. 264 с.
2. Мордвинов Б. С. Исследование геометрических структур с применением методов теории графов // Известия вузов. Машиностроение. 1965. № 3. С. 111–118.
3. Yu J., Xu L. D., Bi Z. [et al.]. Extended interference matrices for exploded view of assembly planning // IEEE Transactions on Automation Science and Engineering. 2014. Vol. 11, Issue 1. P. 279–286. DOI: 10.1109/TASE.2012.2235144.
4. Gottipolu R. B., Ghosh K. A simplified and efficient representation for evaluation and selection of assembly sequences // Computers in Industry. 2003. Vol. 50. P. 251–264.
5. Su Q. Computer aided geometric feasible assembly sequence planning and optimizing. // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2007. Vol. 33, Issue 1. P. 48–57.

6. Alfadhani T., Samadhi A. M., Toha I. Automatic collision detection for assembly sequence planning using a three-dimensional solid model // *Journal of Advanced Manufacturing Systems*. 2011. Vol. 10, Issue 02. P. 277–291. DOI: 10.1142/S021968671100220X.
7. Giri R., Kanthababu M. Generating complete disassembly sequences by utilising two-dimensional views // *International Journal of Production Research*. 2015. Vol. 35, Issue 2. P. 5118–5138. DOI: 10.1080/00207543.2015.1005249.
8. Bahubalendruni M. R., Biswal B. B. Computer aid for automatic liaisons extraction from cad based robotic assembly // *IEEE 8th International Conference on Intelligent Systems and Control (ISCO)*. 2014. P. 42–45. DOI: 10.1109/ISCO.2014.7103915.
9. Bahubalendruni M. R., Biswal B. B., Kumar M. [et al.]. A note on mechanical feasibility predicate for robotic assembly sequence generation // *CAD/CAM, Robotics and Factories of the Future: Proceedings of the 28th International Conference on CARs & FoF*. 2016. P. 397–404. DOI: 10.1007/978-81-322-2740-3_38.
10. Bahubalendruni M. R., Biswal B. B. Liaison concatenation-A method to obtain feasible assembly sequences from 3D-CAD product // *Sadhana*. 2016. Vol. 41, Issue 1. P. 67–74. DOI: 10.1007/s12046-015-0453-8.
11. Bahubalendruni M. R., Biswal B. B. A review on assembly sequence generation and its automation // *Proceeding of Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*. 2016. Vol. 230, Issue 5. P. 824–838.
12. Bahubalendruni M. R., Biswal B. B., Kumar M. [et al.]. Influence of assembly predicate consideration on optimal assembly sequence generation // *Assembly Automation*. 2015. Vol. 35, Issue 4. P. 309–316.
13. Bahubalendruni M. R., Biswal B. B. An intelligent approach towards optimal assembly sequence generation // *Proceeding of Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*. 2016. Vol. 232, Issue 4. P. 531–541.
14. Viganò R., Osorio Gómez G. Automatic assembly sequence exploration without precedence definition // *International Journal on Interactive Design and Manufacturing*. 2013. Vol. 7, Issue 2. P. 79–89. DOI: 10.1007/s12008-012-0165-9.
15. Масыгин В. Б., Примак Д. Д., Волков И. А. Алгоритмы и программа для компьютерного моделирования конструкции сборочной единицы и технологического маршрута сборки // *Естественные и технические науки*. 2019. № 5. С. 169–175. DOI: 10.25633/ETN.2019.05.10.
16. Корсаков В. С., Капустин Н. М., Темпельгоф К.-Х., Лихтенберг Х. Автоматизация проектирования технологических процессов в машиностроении. М.: Машиностроение, 1985. 304 с.
17. Примак Д. Д., Волков И. А., Масыгин В. Б., Кузнецова Н. Я. Автоматизированное определение последовательности сборки с применением математических моделей в виде графа // *Ученые Омска — региону: материалы IV Регион. науч.-техн. конф.* Омск: Изд-во ОмГТУ, 2019. С. 18–24.

ВОЛКОВ Иван Александрович, аспирант кафедры «Технология машиностроения».

SPIN-код: 6172-1346

AuthorID (РИНЦ): 233687

Адрес для переписки: bki – omsk@rambler.ru

ПРИМАК Дарья Дмитриевна, аспирант кафедры «Технология машиностроения».

SPIN-код: 1861-4359

AuthorID (РИНЦ): 945942

Адрес для переписки: venenifer@yandex.ru

МАСЯГИН Василий Борисович, кандидат технических наук, доцент (Россия), профессор кафедры «Технология машиностроения».

SPIN-код: 7032-2852

AuthorID (РИНЦ): 379618

ORCID: 0000-0001-8649-5830

AuthorID (SCOPUS): 6507478238

Адрес для переписки: masyagin@omgtu.ru

АРТЮХ Роман Леонидович, кандидат технических наук, доцент кафедры «Технология машиностроения».

SPIN-код: 1024-2344

Для цитирования

Волков И. А., Примак Д. Д., Масыгин В. Б., Артюх Р. Л. Моделирование последовательности сборки осесимметричных изделий с применением матрицы инцидентности графа // *Омский научный вестник*. 2020. № 3 (171). С. 26–31. DOI: 10.25206/1813-8225-2020-171-26-31.

Статья поступила в редакцию 24.03.2020 г.

© И. А. Волков, Д. Д. Примак, В. Б. Масыгин, Р. Л. Артюх