

**Игнатъев Ф. Ю., Колесникова О. В., Лелюхин В. Е.**  
**F. Yu. Ignatev, O. V. Kolesnikova, V. E. Lelyukhin**

**ИССЛЕДОВАНИЕ СХОДИМОСТИ АЛГОРИТМА АВТОМАТИЧЕСКОГО  
ПРОЕКТИРОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА МЕХАНИЧЕСКОЙ  
ОБРАБОТКИ**

**INVESTIGATION OF THE CONVERGENCE OF THE AUTOMATIC DESIGN ALGORITHM  
OF THE MECHANICAL PROCESSING TECHNOLOGICAL PROCESS**

**Игнатъев Федор Юрьевич** – аспирант Дальневосточного федерального университета (Россия, Владивосток); 690091, г. Владивосток, ул. Суханова; тел. +7(999)614-15-91. E-mail: f.ignatyev@yandex.ru.

**Fedor Yu. Ignatev** – Post-Graduate Student, Far Eastern Federal University (Russia, Vladivostok); tel. +7(999)614-15-91. E-mail: f.ignatyev@yandex.ru.

**Колесникова Ольга Валерьевна** – кандидат технических наук, доцент департамента компьютерно-интегрированных производственных систем Дальневосточного федерального университета (Россия, Владивосток); 690091, г. Владивосток, ул. Суханова, 8; тел. +7(914)652-97-80. E-mail: miis@mail.ru.

**Olga V. Kolesnikova** – PhD in Engineering, Assistant Professor, Far Eastern Federal University (Russia, Vladivostok); tel. +7(914)652-97-80. E-mail: miis@mail.ru.

**Лелюхин Владимир Егорович** – кандидат технических наук, доцент департамента компьютерно-интегрированных производственных систем Дальневосточного федерального университета (Россия, Владивосток); 690091, г. Владивосток, ул. Суханова, 8; тел. +7(914)723-52-57. E-mail: lelvo@mail.ru.

**Vladimir E. Lelyukhin** – PhD in Engineering, Assistant Professor, Far Eastern Federal University (Russia, Vladivostok); tel. +7(914)723-52-57. E-mail: lelvo@mail.ru.

**Аннотация.** В работе рассматривается вопрос автоматизации проектирования технологических процессов механической обработки деталей. Отмечается, что существующие теории разработки технологических процессов не позволяют выполнить автоматизацию данного процесса. В качестве подхода к автоматизации процесса предлагается использовать положения геометрии неидеальных объектов и основанный на ней алгоритм. Представлено исследование условий, позволяющих произвести автоматическое проектирование технологического процесса механической обработки при последовательной обработке поверхностей. Выявлены и сформулированы необходимые и достаточные условия сходимости алгоритма. Исследование проводилось на основе размерных связей с помощью теории графов и алгоритма автоматического проектирования технологического процесса механической обработки деталей. Полученная информация может быть использована для создания автоматизированных систем проектирования технологических процессов.

**Summary.** The paper deals with the issue of automation of the design of technological processes for machining parts. It is noted that the existing theories for the development of technological processes do not allow the automation of this process. As an approach to automating the process, it is proposed to use the positions of the geometry of non-ideal objects and an algorithm based on it. The paper presents a study of the conditions that allow for the automatic design of the technological process of mechanical processing, with sequential surface treatment. Necessary and sufficient conditions for the convergence of the algorithm are identified and formulated. The study was carried out on the basis of dimensional relationships using graph theory and an automatic design algorithm for the technological process of machining parts. The information obtained can be used to create automated systems for the design of technological processes.

**Ключевые слова:** проектирование технологии, размерные связи, угловые размерные связи, взаимное расположение поверхностей, геометрическая конфигурация, граф размерных связей.

**Key words:** technology design, dimensional chain, angular dimensional chain, mutual arrangement of surfaces, geometric configuration, graph of dimensional chain.

### **Введение**

Процесс изготовления детали-сборочных единиц в машиностроительном производстве регламентируется технологическим процессом. Проектирование технологических процессов даже на сегодняшний день представляет собой сложную творческую задачу. В большинстве случаев основой проектирования технологических процессов является использование прошлого опыта. Формальной теории разработки технологических процессов, позволяющей выполнять их автоматическое проектирование на основе конструкции детали-сборочной единицы, не существует.

В статье рассматриваются подход к проектированию технологических процессов с использованием положений геометрии неидеальных объектов и основанный на ней алгоритм автоматического проектирования технологического процесса механической обработки деталей, разработанный В. Е. Лелюхиным и В. Г. Старостиным. Возможность применения алгоритма зависит от определения условий его сходимости.

### **Обзор существующих разработок по проектированию технологических процессов**

Вопрос автоматизации проектирования технологических процессов упирается в разработку теоретической базы, позволяющей формализовать основные положения и принципы проектирования. На сегодняшний день автоматизация проектирования технологических процессов в подавляющем большинстве основывается на использовании прошлого опыта, классификации детали-сборочных единиц по конструктивным или технологическим признакам. Такая классификация позволяет формировать некоторые «шаблоны» технологических процессов или отдельных операций, которые могут использоваться при разработке технологических процессов аналогичных детали-сборочных единиц.

В России для разработки таких «шаблонов» используются подходы на основе типовых технологических процессов, групповых технологий, модульных технологий.

Это актуально для деталей, обладающих схожими конструктивными и технологическими параметрами. Для этого используют существующие методы проектирования технологических процессов: типовой, групповой, модульный (в России); вариантный и генеративный методы (за рубежом). При разработке единичных технологических процессов всё основывается на искусстве технолога.

При разработке новых технологических процессов основой является использование прошлого опыта. В качестве основы (опыта) используются типовые, групповые и модульные технологические процессы [1; 4; 6].

Типовой технологический процесс характеризуется общим набором технологических установок, переходов, операций, для деталей с одинаковыми конструктивными признаками. Групповая технология основывается на использовании одной или нескольких технологических операций для изделий с различными конструктивными признаками, но имеющими сходные элементы, а также часть технологического процесса для их изготовления. Модульный технологический процесс основывается на представлении изделия в виде набора модулей, для которых разрабатываются соответствующие модули технологических процессов, оборудования и оснастки. Модульный технологический процесс позволяет организовать на модульном уровне элементарную базу технологических процессов, оборудования и оснастки, и на основании этих модулей строить новые технологические процессы.

За рубежом технологическая подготовка также осуществляется по имеющейся базе данных типовых технологических процессов. Существуют два подхода: модифицированный (вариантный) и генеративный [7; 10]. Модифицированный (вариантный) подход заключён в поиске наиболее похожего изделия в базе и использовании его технологии изготовления для модификации. В данном методе применяется групповая технология, позволяющая классифицировать детали в семейства. Генеративный подход состоит в распознавании у детали типовых конструктивных элементов и применении к ним типовых технологических процессов (токарная, фрезерная обработка, сверление и т. д.).

Все рассмотренные подходы используют прошлый опыт и накопленную базу технологических процессов. Совершенно другой подход к проектированию технологических процессов может быть разработан на основе формальных зависимостей, адекватно отображающих реальные законы взаимодействия и преобразования материальных объектов. Отдельные разработки в этой области существуют как в России, так и за рубежом. Однако общей системы формального проектирования пока не разработано. Развивая данную область, авторы предлагают использовать геометрию неидеальных объектов и её положения для формализации процессов порождения геометрической конфигурации и проектирования технологических процессов.

### Геометрия реальных объектов

Геометрия реальных объектов, разрабатываемая В. Е. Лелюхиным и О. В. Колесниковой, рассматривает объекты в шестимерном пространстве, позволяющем не только определять их положение как материальной точки, но и ориентацию. Положения геометрии позволяют описывать структуру размерных связей объекта и процесс порождения его геометрической конфигурации [3].

На рис. 1, а представлена модель детали с нанесёнными размерами. Для описания взаимного расположения поверхностей детали в геометрии неидеальных объектов используются графы размерных связей. В графе вершины представляют поверхности детали, а связи – размерные связи между данными поверхностями.

Поскольку геометрия реальных объектов рассматривается в шестимерном пространстве, то граф размерных связей детали проецируется на шесть измерений. Например, для детали, изображённой на рис. 1, а, существует следующее представление взаимного расположения поверхностей в виде графов размерных связей, показанных на рис. 1, б.

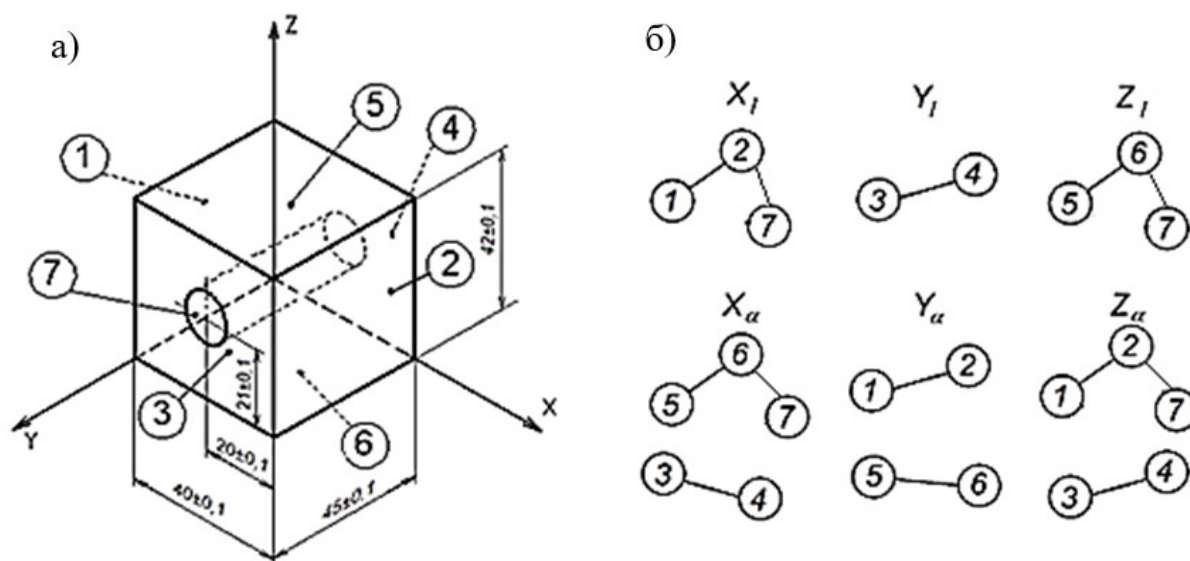


Рис. 1. Деталь с нанесёнными размерными связями (а) и соответствующие графы размерных связей (б)

Графы  $X_I$ ,  $Y_I$ ,  $Z_I$  показывают наличие линейных размерных связей между поверхностями по осям  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  соответственно. Графы  $X_\alpha$ ,  $Y_\alpha$ ,  $Z_\alpha$  отображают наличие угловых связей, заданных установленными размерами, вокруг осей  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$ . Использование графов размерных связей позволяет получить совокупности всех возможных размерных цепей и всех замыкающих звеньев. Кроме того, вид графов размерных связей, а именно их связность, даёт возможность провести анализ качества описания геометрической структуры детали. Например, в рассматриваемом примере графы размерных связей  $X_\alpha$ ,  $Y_\alpha$ ,  $Z_\alpha$  несвязны, и это говорит о недостатке установленных размеров в модели детали. Такая ситуация приводит к неоднозначности трактования конфигурации детали и, соот-

ответственно, формированию множества технологических процессов изготовления подобных друг другу деталей, которые могут отвечать совершенно различным функциональным требованиям.

Таким образом, анализ графов размерных связей позволяет формализовать процедуру проверки корректности построенной конструктором модели геометрической конфигурации детали.

### Алгоритм последовательной обработки поверхностей детали

Положения геометрии неидеальных объектов позволяют автоматически формировать процесс механической обработки деталей. Для формализации этого процесса разработан метод кодирования вида и положения поверхностей обрабатываемой детали [5]. Метод основан на использовании шестимерного вектора, в котором для каждой поверхности указываются ограниченные (фиксированные) или свободные координаты для перемещения ( $X_l, Y_l, Z_l, X_a, Y_a, Z_a$ ). Например, для задания положения плоскости  $XOY$  или параллельной ей необходимо ограничить перемещение по оси  $Z$  и повороты вокруг осей  $X$  и  $Y$ . Её шестимерный вектор будет выглядеть следующим образом: (0, 0, 1, 1, 1, 0).

Формальное описание поверхностей детали и их взаимного расположения позволило разработать алгоритм автоматического формирования технологического процесса механической обработки [5]. Вариант алгоритма, рассматривающий последовательную обработку поверхностей детали, позволяет последовательно описать процесс порождения геометрической конфигурации детали. Алгоритм позволяет формализовать процесс использования существующих (обработанных) поверхностей детали в качестве базовых для изготовления ещё не обработанных поверхностей [9].

Для реализации алгоритма строится блочная матрица (см. рис. 2, а), состоящая из шестимерных векторов, описывающих положение и взаимосвязи поверхностей детали. Матрица состоит из верхней и нижней частей. Нижняя часть представляет собой квадратную матрицу размерностью  $n \times n$ , где  $n$  – число поверхностей, которые нужно обработать (см. рис. 2, а), а верхняя часть содержит существующие поверхности. На первом шаге алгоритма в качестве существующих выступают «черновые» поверхности заготовки.

Процедура поиска решения заключается в последовательном рассмотрении столбцов матрицы до момента, когда поэлементная логическая сумма ячеек (необработанных поверхностей) матрицы совпадёт с диагональной ячейкой. Совпадение означает возможность обработки, что демонстрируется в матрице переносом строки из нижней части в верхнюю. Так, на рис. 2, а видно, что если взять поверхность 2ч в качестве базы, можно обработать поверхность 1. Поэтому на первом шаге столбец с номером 1 удаляется, а строка с номером 1 переносится в верхнюю часть матрицы (см. рис. 2, б) [9].

а)

		1	2	3	4	5	6	7
реальные поверхности	2R	1 0 0 0 1 1						
	3R			0 1 0 1 0 0				
	5R					0 0 1 0 0 0		
необработанные поверхности	1	1 0 0 0 1 1	1 0 0 0 1 1		0 0 0 0 0 1			1 0 0 0 0 1
	2	1 0 0 0 1 1	1 0 0 0 1 1			0 0 0 0 1 0		
	3			0 1 0 1 0 1	0 1 0 1 0 1		0 0 0 1 0 0	
	4	0 0 0 0 0 1		0 1 0 1 0 1	0 1 0 1 0 1			
	5					0 0 1 1 1 0	0 0 1 1 1 0	1 0 0 1 0 0
	6		0 0 0 0 1 0	0 0 0 1 0 0		0 0 1 1 1 0	0 0 1 1 1 0	
	7	1 0 0 0 0 1				0 0 1 1 0 0		1 0 1 1 0 1

б)

		2	3	4	5	6	7
реальные поверхности	2R						
	3R			0 1 0 1 0 0			
	5R					0 0 1 0 0 0	
необработанные поверхности	1	1 0 0 0 1 1		0 0 0 0 0 1			1 0 0 0 0 1
	2	1 0 0 0 1 1			0 0 0 0 1 0		
	3		0 1 0 1 0 1	0 1 0 1 0 1		0 0 0 1 0 0	
	4		0 1 0 1 0 1	0 1 0 1 0 1			
	5				0 0 1 1 1 0	0 0 1 1 1 0	1 0 0 1 0 0
	6	0 0 0 0 1 0	0 0 0 1 0 0		0 0 1 1 1 0	0 0 1 1 1 0	
	7				0 0 1 1 0 0		1 0 1 1 0 1

Рис. 2. Матрицы смежности: а – исходная; б – после 1-го шага [9]

Последовательность обработки основывается на структуре графов размерных связей. Однако в процессе проведения модельных экспериментов авторами было выяснено, что не всегда алгоритм сходится, т.е. позволяет получить решение в виде технологического процесса. Далее в статье рассматриваются условия сходимости алгоритма, позволяющие на основе вида и структуры графов размерных связей определить возможность автоматического формирования процесса обработки детали.

#### **Исследование условий сходимости алгоритма последовательной обработки**

Для проведения исследований была выбрана деталь, изображённая на рис. 1, *а*. На примере данной детали был проведён комплекс исследований:

- определение количества возможных структур и сочетаний графов размерных связей;
- моделирование конфигурации детали с различными сочетаниями графов размерных связей;
- получение технологического процесса механической обработки с помощью алгоритма последовательной обработки поверхностей детали;
- анализ структуры графов размерных связей, позволяющих сформировать технологический процесс;
- выявление и формулирование условий сходимости алгоритма последовательной обработки поверхностей детали.

В процессе проведения исследований было выяснено, что граф размерных связей представляет собой остовное дерево. Исходя из этого количество возможных остовных деревьев, а соответственно, и сочетаний графов размерных связей может быть определено с помощью формулы А. Кэли, согласно которой количество остовных деревьев в графе из  $n$  вершин равно  $n^{n-2}$  [8]. Тогда для рассматриваемого примера количество сочетаний графов размерных связей может быть легко определено и составляет 2 250 000.

Анализ структуры графов размерных связей показал, что графы в угловых направлениях образуются из сочетания графов линейных направлений. Таким образом, графы угловых размерных связей позволяют установить взаимосвязи между группами параллельных поверхностей.

Стоит отметить, что на чертежах далеко не всегда определены все угловые размерные связи. Например, на представленной на рис. 1, *а* модели проставлены не все угловые размеры. Этот факт легко увидеть при анализе графов размерных связей: на рис. 1, *б* видно, что графы угловых направлений несвязны. Как указывалось выше, данный факт приводит к неоднозначности понимания конструкции детали и возможности формирования множества технологических процессов. Соответственно, для использования формального алгоритма такая неопределённость должна быть устранена.

В процессе проведения экспериментов по формализации проектирования технологии изготовления детали выявлено, что не любое сочетание размерных связей, представленных графами, позволяет получить технологию обработки [2]. Особое внимание следует обращать на угловые связи. В зависимости от установленных угловых связей и набора черновых баз решается вопрос возможности последовательной обработки.

Анализ проведённых экспериментов позволил сформулировать несколько условий, гарантирующих сходимость алгоритма последовательной обработки:

*Условие 1.* Необходимым условием сходимости алгоритма последовательной обработки является наличие графа связей трёх измерений, который формируется из вершин и связей в угловых графах  $X_a$ ,  $Y_a$ ,  $Z_a$ , участвующих в связях между группами параллельных поверхностей.

На рис. 3 показано формирование графа связей трёх измерений для детали, изображённой на рис. 1, *а*. Полученный граф представляет собой замкнутый контур, связывающий между собой группы поверхностей по всем трём измерениям. При этом угловые связи определены между поверхностями 1, 4 и 6.

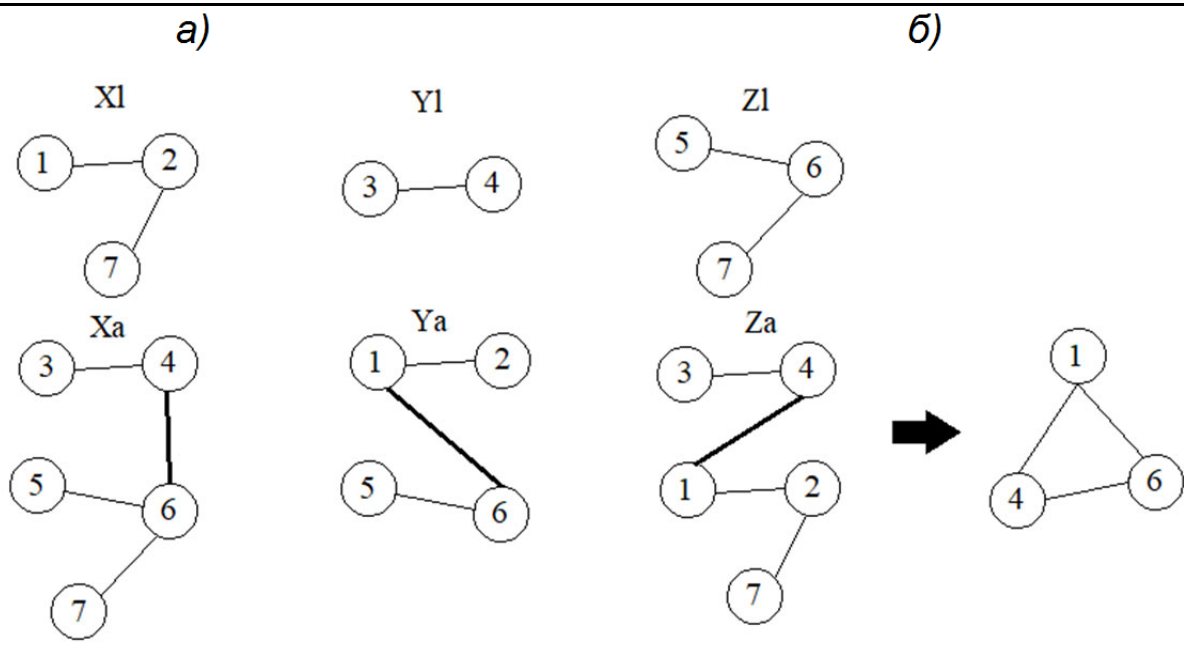


Рис. 3. Формирование графа связей трёх измерений для детали:  
 а – графы размерных связей; б – полученный граф связей трёх измерений

*Условие 2.* Достаточным условием сходимости алгоритма последовательной обработки является наличие смежных «черновых» поверхностей ко всем вершинам графа связей трёх измерений.

Пример модели графа размерных связей, отвечающей условию 2, представлен на рис. 4. В данном случае в качестве начального комплекта баз (установочная, направляющая, опорная) могут быть установлены любые сочетания «черновых» поверхностей 2ч, 3ч, 5ч.

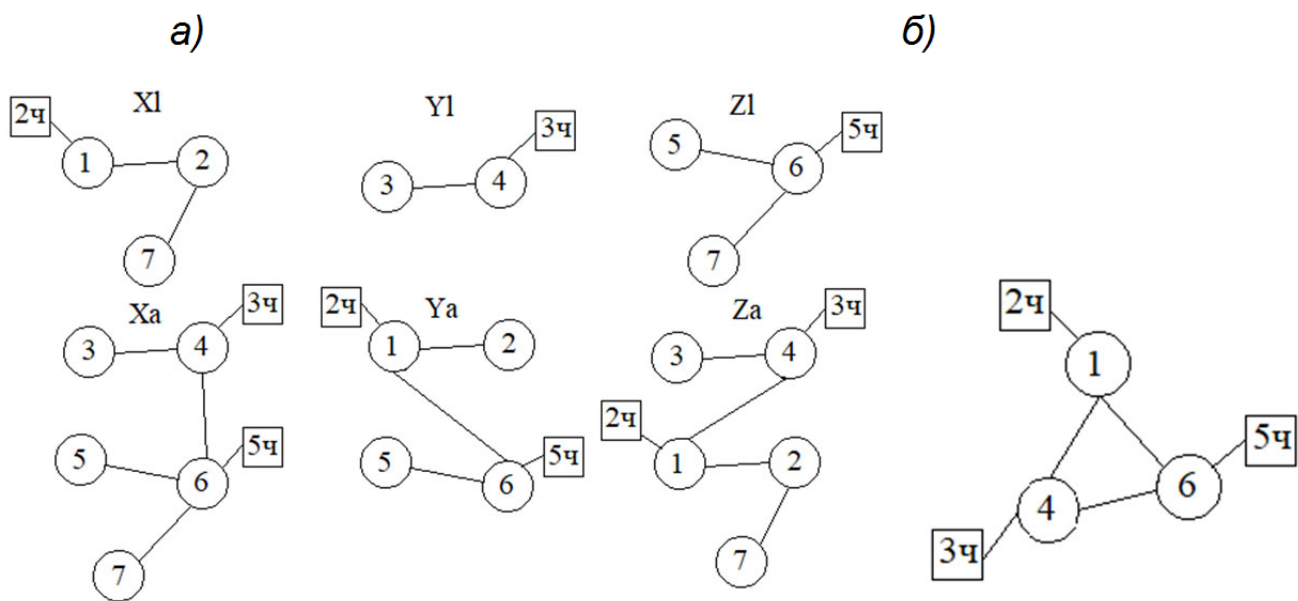


Рис. 4. Графы размерных связей для условия 2: а – графы размерных связей; б – граф связей трёх измерений с инцидентными вершинами черновых поверхностей

Проведённая серия экспериментов с различными сочетаниями начального комплекта баз показала, что соблюдение условий 1 и 2 гарантирует сходимость алгоритма и получение технологического процесса обработки детали.

*Условие 3.* В случае отсутствия у одной из вершин графа связей трёх измерений смежной существующей («черновой» или обработанной) поверхности, которую можно использовать в качестве начальной базы, достаточным условием сходимости алгоритма последовательной обработки будет являться наличие у этой вершины смежной вершины, у которой имеется смежная существующая поверхность, причём эта поверхность должна быть установочной базой, т.е. иметь три базирующие точки.

Пример конфигурации, реализующей условие 3 для детали на рис. 1, а, представлен на рис. 5.

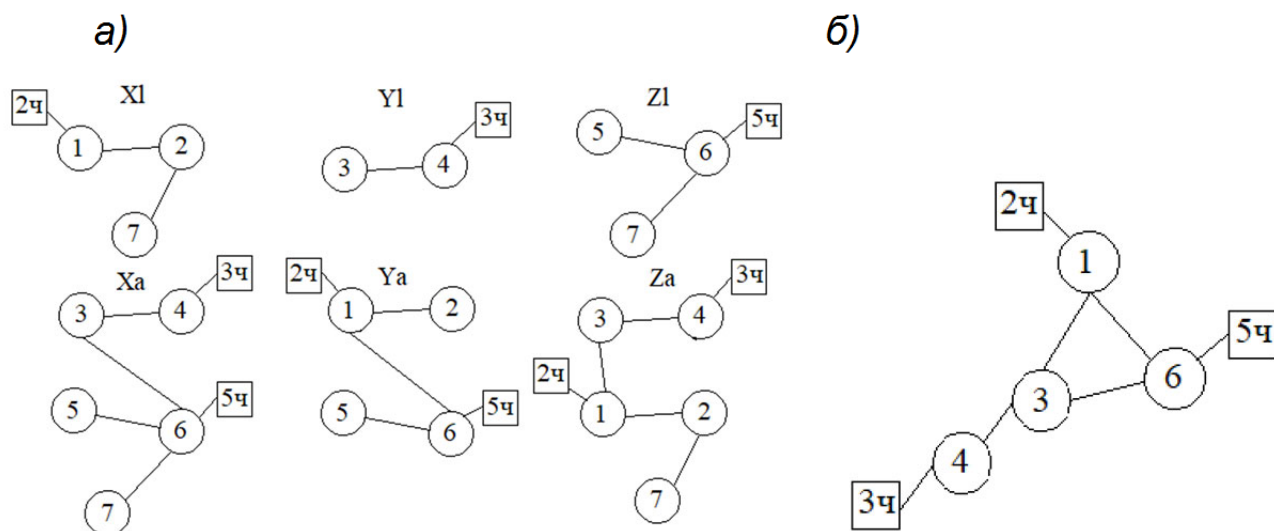


Рис. 5. Графы размерных связей для условия 3: а – графы размерных связей; б – граф связей трёх измерений с инцидентными вершинами черновых поверхностей

Для данного варианта выявлено, что обработка возможна при выбранном варианте простановки размерных связей и при условии, что черновая поверхность 3ч будет иметь три базирующие точки, т.е. первым шагом обработки будет получение поверхности 4, условно параллельной черновой поверхности 3ч.

Проведённая серия экспериментов показала, что соблюдение условий 1 и 3 гарантирует сходимость алгоритма и получение технологического процесса обработки детали.

### **Заключение**

В результате проведённых исследований определено, что для автоматического формирования технологического процесса механической обработки детали необходимо наличие следующей информации о детали:

- положение каждой поверхности детали, представленное шестимерным вектором;
- взаимное расположение поверхностей детали, представленное графами размерных связей в шести измерениях.

При наличии описанной информации о детали применение алгоритма автоматического формирования процесса механической обработки позволяет создать последовательность обработки поверхностей и соответствующих для них баз. Проведённые исследования алгоритма позволили выявить и сформулировать необходимые и достаточные условия сходимости.

Представленные результаты могут быть использованы для разработки автоматизированных компьютерных систем автоматического проектирования технологических процессов.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Базров, Б. М. Модульная технология в машиностроении / Б. М. Базров. – Л.: Машиностроение, 2001. – 367 с.
2. Лелюхин, В. Е. Влияние структуры размерных связей на формирование процесса обработки деталей / В. Е. Лелюхин, Ф. Ю. Игнатьев, О. В. Колесникова // Современные наукоёмкие технологии. – 2018. – № 7. – С. 60-64.
3. Лелюхин, В. Е. Геометрия неидеальных объектов в судостроении и судоремонте / В. Е. Лелюхин, О. В. Колесникова // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. – 2020. – № 1. – С. 31-44.
4. Митрофанов, С. П. Научная организация труда машиностроительного производства / С. П. Митрофанов. – Л.: Машиностроение, 1976. – 712 с.
5. Старостин, В. Г. Формализация проектирования процессов обработки резанием / В. Г. Старостин, В. Е. Лелюхин. – М.: Машиностроение, 1986. – 136 с.
6. Технология машиностроения. Часть II. Проектирование технологических процессов: учеб. пособие / Э. Л. Жуков, И. И. Козарь, Б. Я. Розовский, В. В. Дегтярев, А. М. Соловейчик; под ред. С. Л. Мурашкина. – СПб.: Изд-во СПбГТУ, 2000. – 498 с.
7. Achraf Skander, Lionel Roucoules, Jean-Sébastien Klein Meyer. Design and manufacturing interface modelling for manufacturing processes selection and knowledge synthesis in design. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Springer Verlag, 2008, 37 (5-6), pp. 443-454.
8. Cayley A. A theorem on trees. *Quart. J. Pure Appl. Math.*, 23 (1889), 376–378; *Collected Mathematical Papers*, Vol. 13, Cambridge University Press, 1897, 26-28.
9. O. V. Kolesnikova, V. E. Lelyukhin and F. Yu. Ignatev Formation of Schemes Generating Geometric Structure of Machine Parts. A. A. Radionov et al. (eds.). *Proceedings of the 5th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2019)*, *Lecture Notes in Mechanical Engineering*, pp. 355-363.
10. Yusri Yusof, Kamran Latif Survey on computer-aided process planning. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Springer Verlag, 2014.