

7. Степанов О.А. Применение теории нелинейной фильтрации в задачах обработки навигационной информации. – 3-е изд. – СПб: ГНЦ РФ ЦНИИ «Электроприбор», 2003. – 370 с.
8. Городецкий А.Я. Информационные системы. Вероятностные модели и статистические решения: Учеб. пособие. – СПб: Изд-во СПбГПУ, 2003. – 326 с.

*Черноножкин Василий Александрович*

— Центральный научно-исследовательский и опытно-конструкторский институт робототехники и технической кибернетики, аспирант, xou@list.ru

*Половко Сергей Анатольевич*

— Центральный научно-исследовательский и опытно-конструкторский институт робототехники и технической кибернетики, кандидат технических наук, зам. директора, eus@rtc.ru

**УДК 621:658.516.011.56**

## **ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ЛИНИЙ МНОГОНОМЕНКЛАТУРНОГО МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА**

**А.А. Баранов, А.Р. Денисов, М.Г. Левин**

В статье приведено описание модуля «Группирование», отвечающего за решение задач технологической унификации проектируемых изделий в автоматизированной системе конструкторско-технологической подготовки производства (КТПП), и обобщенный алгоритм распределения изготавливаемых изделий (балансировки) по производственным линиям.

**Ключевые слова:** календарное планирование, сети Петри, эволюционный алгоритм.

### **Введение**

Одной из тенденций развития современного производства является переход к средне- и мелкосерийности. В этих условиях ключевой проблемой становится повышение гибкости производственной системы, в частности, максимально возможное сокращение сроков подготовки производства и эффективная организация производственного процесса [1]. Однако при решении указанных задач возникает проблема рационального представления результатов технологического проектирования. Так, в соответствии с ЕСТД технологический процесс (ТП) записывается на маршрутной карте в виде линейной последовательности технологических операций (ТО) – маршрута обработки [2]. Такая форма представления позволяет упростить планирование ТП, однако в случае изменения производственных условий (изменение объемов выпуска или номенклатуры выпускаемых изделий, изменение структуры производственных линий (ПЛ) и т.п.) может снизить эффективность производства. Решить данную проблему можно через представление ТП в виде графа следования ТО (сетевого плана ТП) [3, стр. 86], что позволит повысить гибкость производственной системы, так как в этом случае маршрут обработки будет формироваться применительно к существующим в данный момент производственным условиям. Так, например, на основании сетевого плана ТП изготовления женского головного убора (рис. 1) могут быть сформированы следующие маршруты обработки: 1→2→3→4→5→6→7; 1→2→4→3→5→6→7; 1→2→4→5→3→6→7; 1→4→2→3→5→6→7; 1→4→2→5→3→6→7; 1→4→5→2→3→6→7. Однако такой подход требует более сложных алгоритмов планирования. Особенно остро проблема планирования стоит в многономенклатурном производстве, когда необходимо обеспе-

чить одновременное изготовление нескольких типов изделий заданных объемов выпуска на существующих ПЛ (балансировка ПЛ).

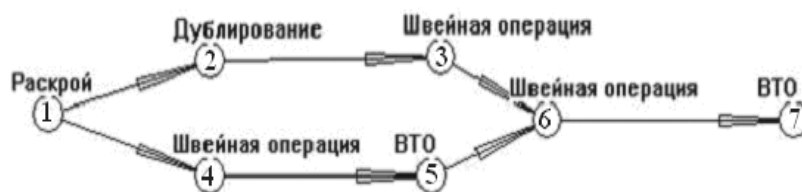


Рис. 1. Сетевой план ТП изготовления женского головного убора

В общем случае задачу балансировки ПЛ для всего множества обрабатываемых изделий  $D$  можно представить в следующем виде:

$$\forall i = \overline{1, |D|} \left( \langle G_{\text{ТП}_i}, \text{Кол}_i \rangle \Rightarrow_{\text{ПЛ}} \left\{ \langle \text{ТП}_{ij}, \text{Кпл}_{ij} \rangle \mid j = \overline{1, |\text{ПЛ}|} \right\} \right),$$

где  $G_{\text{ТП}_i}$  – сетевой план ТП изготовления  $i$ -го изделия;  $\text{Кол}_i$  – размер партии для  $i$ -го изделия; ПЛ – множество ПЛ предприятия;  $\text{ТП}_{ij}$  – маршрут обработки  $i$ -го изделия на  $j$ -м ПЛ;  $\text{Кпл}_{ij}$  – объем выпуска  $i$ -го изделий на  $j$ -м ПЛ,

$$\forall i = \overline{1, |D|} \left( \text{Кол}_i = \sum_{j=1, |\text{ПЛ}|} \text{Кпл}_{ij} \right).$$

При анализе маршрутов обработки необходимо учитывать ограничения, накладываемые структурой ПЛ предприятия, которые могут быть связаны с отсутствием в составе ПЛ оборудования, необходимого для выполнения ТО изготовления изделий, а также с расположением оборудования внутри ПЛ. Во втором случае структура ПЛ может исключить некоторые варианты маршрутов обработки одного изделия. Так, например, при развертывании сетевого плана ТП (рис. 1) на ПЛ (рис. 2) недопустимыми являются следующие маршруты:  $1 \rightarrow 4 \rightarrow 2 \rightarrow 3 \rightarrow 5 \rightarrow 6 \rightarrow 7$ ;  $1 \rightarrow 4 \rightarrow 2 \rightarrow 5 \rightarrow 3 \rightarrow 6 \rightarrow 7$ ;  $1 \rightarrow 4 \rightarrow 5 \rightarrow 2 \rightarrow 3 \rightarrow 6 \rightarrow 7$ . Это связано с тем, что структура данной ПЛ предполагает первоначальное выполнение операций раскроя и дублирования.

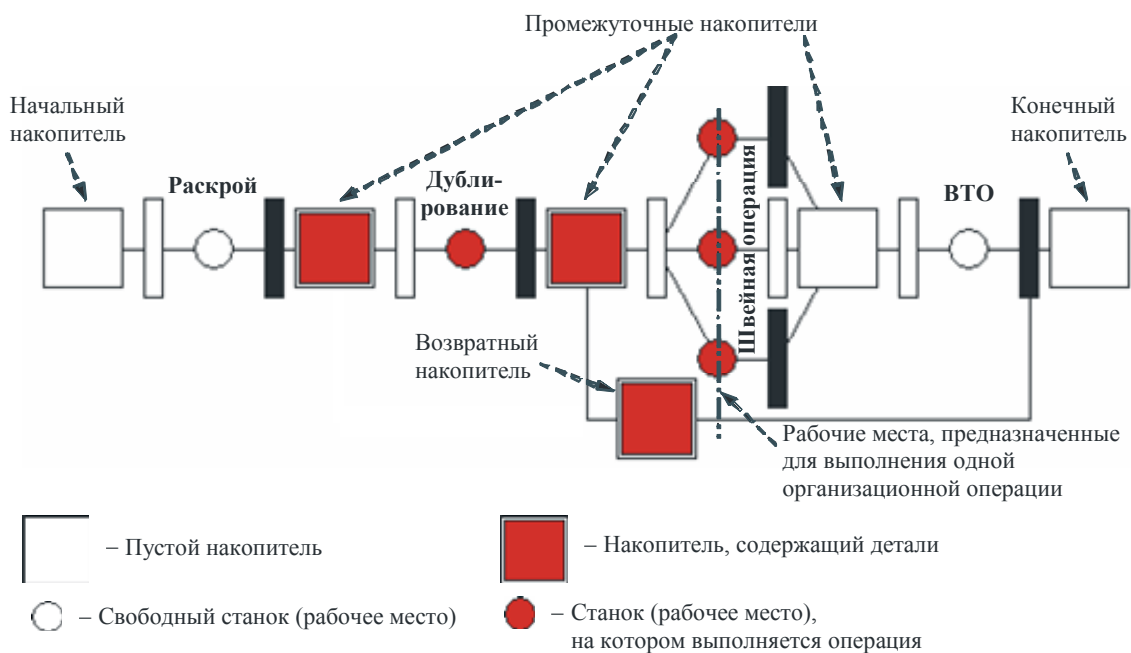


Рис. 2. Пример модели производственной линии в виде сети Петри

Для определения возможности применения маршрута обработки изделия для ПЛ может быть использован алгоритм [3, стр. 88], в соответствии с которым для сетевого плана ТП и структуры ПЛ формируются матрицы достижимости  $M_{тп}$  и  $M_{пл}$ , в которых

$$M_{ij} = \begin{cases} 0, & \text{если вершина } a_j \text{ анализируемого графа достижима из вершины } a_i; \\ 1, & \text{в противном случае.} \end{cases}$$

Далее формируется результирующая матрица  $M_p$ ,

$$M_{p_{ij}} = M_{тп_{ii}} \cdot M_{пл_{ii}} \cdot M_{тп_{jj}} \cdot M_{пл_{jj}} \cdot (M_{тп_{ij}} \oplus M_{пл_{ij}}).$$

Если полученная матрица является «нулевой», то анализируемый маршрут обработки допустим для данной ПЛ, в противном случае – недопустим. Результаты анализа маршрутов  $1 \rightarrow 2 \rightarrow 3 \rightarrow 4 \rightarrow 5 \rightarrow 6 \rightarrow 7$  и  $1 \rightarrow 4 \rightarrow 2 \rightarrow 3 \rightarrow 5 \rightarrow 6 \rightarrow 7$  на соответствие ПЛ (рис. 2) представлены на рис. 3. По результатам балансировки ПЛ определяется их загрузка:

$$Z_j = \left\{ \left\langle D_i, TP_{ij}, K_{пл_{ij}} \right\rangle \middle| i = \overline{1, |D|} \right\} \middle| j = \overline{1, |ПЛ|}.$$

При оценке эффективности полученного распределения изделий в первую очередь необходимо учитывать равномерность загрузки ПЛ. В этом случае в качестве критерия эффективности целесообразно использовать время работы предприятия при изготовлении заданных объемов выпуска:

$$T_1 = \sup_{j=1, |ПЛ|} (T(Z_j)) \rightarrow \min,$$

где  $T(Z_j)$  – время работы  $j$ -й линии при выполнении заданных для нее объемов выпуска.

Маршрут $1 \rightarrow 2 \rightarrow 3 \rightarrow 4 \rightarrow 5 \rightarrow 6 \rightarrow 7$									
		<b>Мтп</b>							
		1	2	3	4	5	6	7	
<b>Р</b>	<b>1</b>	1	0	0	0	0	0	0	
<b>Д</b>	<b>2</b>	1	1	0	0	0	0	0	
<b>Ш</b>	<b>3</b>	1	1	1	0	0	0	0	
<b>Ш</b>	<b>4</b>	1	1	1	1	0	0	0	
<b>В</b>	<b>5</b>	1	1	1	1	1	0	0	
<b>Ш</b>	<b>6</b>	1	1	1	1	1	1	0	
<b>В</b>	<b>7</b>	1	1	1	1	1	1	1	
		<b>Мпл</b>							
		<b>Р</b>	<b>Д</b>	<b>Ш</b>	<b>Ш</b>	<b>В</b>	<b>Ш</b>	<b>В</b>	
<b>Р</b>	<b>1</b>	1	0	0	0	0	0	0	
<b>Д</b>	<b>1</b>	1	1	0	0	0	0	0	
<b>Ш</b>	<b>1</b>	1	1	0	0	0	0	0	
<b>Ш</b>	<b>1</b>	1	1	0	0	0	0	0	
<b>В</b>	<b>1</b>	1	1	0	0	0	0	0	
<b>Ш</b>	<b>1</b>	1	1	0	0	0	0	0	
<b>В</b>	<b>1</b>	1	1	0	0	0	0	0	
		<b>Мр</b>							
		0	0	0	0	0	0	0	0
		0	0	0	0	0	0	0	0
		0	0	0	0	0	0	0	0
		0	0	0	0	0	0	0	0
		0	0	0	0	0	0	0	0
		0	0	0	0	0	0	0	0
		0	0	0	0	0	0	0	0
		0	0	0	0	0	0	0	0
Маршрут $1 \rightarrow 4 \rightarrow 2 \rightarrow 3 \rightarrow 5 \rightarrow 6 \rightarrow 7$									
		<b>Мтп</b>							
		1	4	2	3	5	6	7	
<b>Р</b>	<b>1</b>	1	0	0	0	0	0	0	
<b>Ш</b>	<b>4</b>	1	1	0	0	0	0	0	
<b>Д</b>	<b>2</b>	1	1	1	0	0	0	0	
<b>Ш</b>	<b>3</b>	1	1	1	1	0	0	0	
<b>В</b>	<b>5</b>	1	1	1	1	1	0	0	
<b>Ш</b>	<b>6</b>	1	1	1	1	1	1	0	
<b>В</b>	<b>7</b>	1	1	1	1	1	1	1	
		<b>Мпл</b>							
		<b>Р</b>	<b>Ш</b>	<b>Д</b>	<b>Ш</b>	<b>В</b>	<b>Ш</b>	<b>В</b>	
<b>Р</b>	<b>1</b>	1	0	0	0	0	0	0	
<b>Ш</b>	<b>1</b>	1	0	1	0	0	0	0	
<b>Д</b>	<b>1</b>	1	0	1	0	0	0	0	
<b>Ш</b>	<b>1</b>	1	0	1	0	0	0	0	
<b>В</b>	<b>1</b>	1	0	1	0	0	0	0	
<b>Ш</b>	<b>1</b>	1	0	1	0	0	0	0	
<b>В</b>	<b>1</b>	1	0	1	0	0	0	0	
		<b>Мр</b>							
		0	0	0	0	0	0	0	0
		0	0	0	0	0	0	0	0
		0	<b>1</b>	0	0	0	0	0	0
		0	0	0	0	0	0	0	0
		0	0	0	0	0	0	0	0
		0	0	0	0	0	0	0	0
		0	0	0	0	0	0	0	0
		0	0	0	0	0	0	0	0

Рис. 3. Примеры анализа применимости маршрутов обработки для ПЛ

### Структура модуля «Группирование»

Для решения задач технологической унификации интегрированная система конструкторско-технологической подготовки производства [4] должна быть дополнена соответствующим модулем «Группирование», который отвечает за группирование изделий для их совместного изготовления на многономенклатурных производственных линиях (задача балансировки), нормирование времени изготовления заданной партии изделий,

а также за планирование загрузки производственных линий при изготовлении заданных партий изделий. Для реализации модуля использован аппарат сетей Петри.

Модуль «Группирование» позволяет моделировать производственный процесс как в режиме поточного, так и в режиме бережливого производства (*Lean Manufacturing*) [5]. Эти подходы к организации производственного процесса имеют следующие принципиальные отличия.

1. Если при поточном производстве одно рабочее место чаще всего характеризуется только одним закрепленным за ним видом оборудования, то в бережливом производстве возможно закрепление нескольких видов оборудования. При этом выполняемые на одном рабочем месте технологические операции (ТО) объединяются в одну организационную (ОО).
2. В режиме поточного производства изделие последовательно проходит через все накопители – от начального до конечного, при этом возможна организация циклов через возвратные накопители (рис. 2). В режиме бережливого производства каждая ОО имеет два накопителя (для необработанных и обработанных изделий), при этом после выполнения одной операции изделия перемещаются непосредственно на входной накопитель следующей выполняемой для них операции. Однако такое перемещение возможно только в том случае, если накопитель для необработанных деталей второй операции пуст. В таком режиме порядок перемещения изделий по производственной линии произволен, а возвратные операции отсутствуют.

Модуль «Группирование» позволяет учесть следующие аспекты:

- совмещенные ОО для нескольких производственных линий. Для облегчения визуального восприятия каждая совмещаемая ОО обозначается цветом, отличным от цвета других ОО;
- операции сборки, после выполнения которых множество маркеров полуфабрикатов заменяются на маркер полученного узла, что существенно упрощает визуальный анализ результатов моделирования;
- ОО, при выполнении которых одновременно обрабатываются несколько изделий.

Структура классов, отвечающих за описание производственного процесса, представлена на рис. 4.

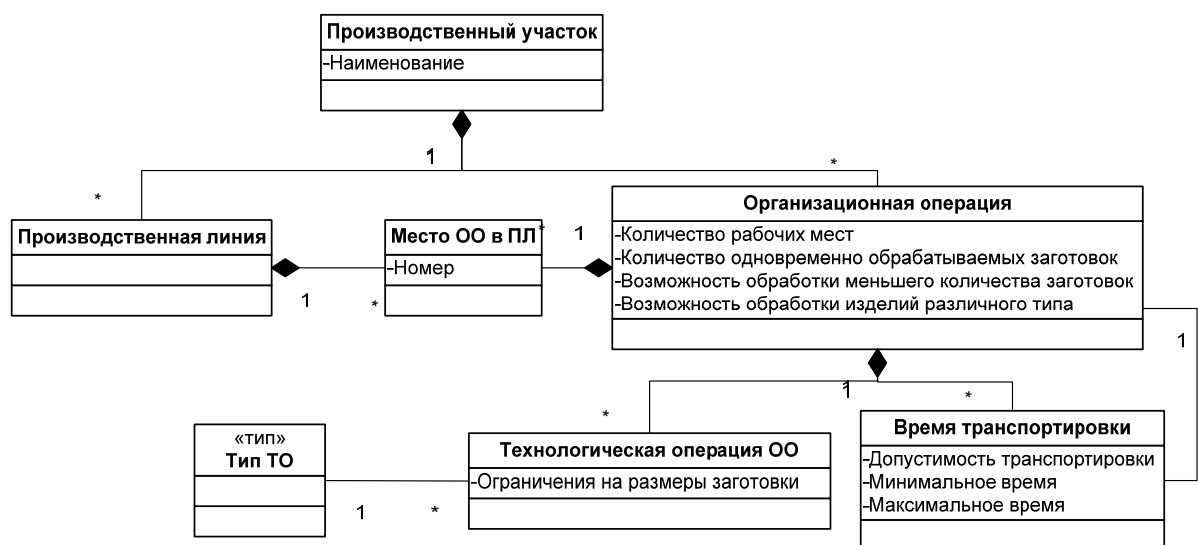


Рис. 4. Структура классов, отвечающих за описание производственного процесса

Для решения задачи балансировки необходимо учитывать возможность изготовления изделий на существующих производственных линиях. Для этого в модуле «Группирование» встроены средства описания ТП изготовления изделия в виде сетевых

го плана (рис. 1), где дуга  $A \rightarrow B$  означает, что операция  $A$  должна предшествовать операции  $B$ . Структура классов, отвечающих за описание обрабатываемых изделий, представлена на рис. 5.

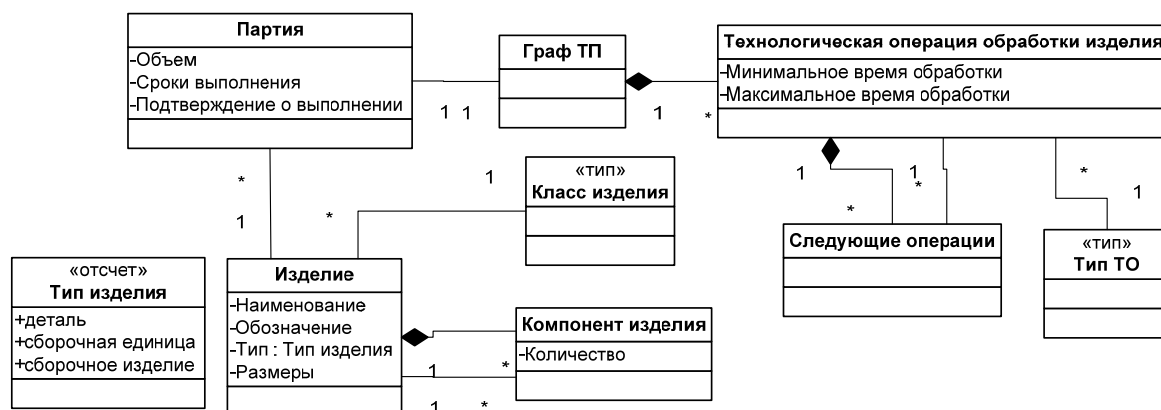


Рис. 5. Структура классов, отвечающих за описание обрабатываемых изделий

### Алгоритм распределения изделий по производственным линиям

В основу решения задачи балансировки нескольких производственных линий положен алгоритм, основанный на принципах эволюционной оптимизации.

*Шаг 1. Определение соответствий (выполнимости) технологических операций изготовления изделий и организационных операций производственных линий.* В результате выполнения этого шага для каждого сочетания «тип изделия – производственная линия» формируется матрица выполнимости, в которой в качестве столбцов выступают организационные операции производственной линии, а в качестве строк – технологические операции изготовления изделия. В каждую ячейку матрицы ставится 1, если технологическая операция может быть выполнена на рабочем месте соответствующей организационной операции, и 0 – в противном случае.

*Шаг 2. Определение всех возможных вариантов изготовления изделий.* На основе матриц выполнимости формируются все варианты изготовления изделий на каждой производственной линии. Каждый вариант проверяется на возможность его выполнения по алгоритму, приведенному в [6]. Если какой-либо вариант не может быть выполнен, то он удаляется, а оставшиеся варианты получают собственные идентификаторы.

*Шаг 3. Первоначальное формирование особей эволюционного алгоритма.* Случайным образом формируются несколько различных особей (вариантов распределения изделий по производственным линиям), где каждая особь имеет вид, представленный в таблице. При этом учитывается, что часть генов особей не будет использоваться вследствие невозможности изготовления некоторых изделий на отдельных производственных линиях.

	Линия 1		Линия 2		...	Линия М	
	№ варианта	Кол-во	№ варианта	Кол-во		№ варианта	Кол-во
Изделие 1					...		
Изделие 2							
...							
Изделие N							

Таблица. Структура хромосомы особи балансировки производственной линии

*Шаг 4. Определение максимального времени работы производственных линий для каждой особи (распределения).* Данный показатель определяет критерия «выживаемости» особей, минимум которой и будет означать наилучшее распределение изделий по производственным линиям. Вследствие наличия в модели стохастической составляющей

щей (рис. 4) необходимо проводить имитационное моделирование работы производственной системы при одном и том же распределении несколько раз, а в качестве времени работы производственных линий брать среднее время для всех экспериментов.

*Шаг 5. Циклическое улучшение полученных популяций методом эволюционной оптимизации.* При выполнении данного этапа применяются следующие виды оптимизации:

- мутация 1 – изменение варианта изготовления одного типа изделия на одной производственной линии;
- мутация 2 – перемещение одного изделия с одной линии на другую; при этом проверяется возможность такого перемещения и, если оно невозможно, новая особь считается «мертворожденной»;
- кроссинговер – обмен между двумя особями распределений одного типа изделия по производственным линиям.

### **Анализ конструкторско-технологического сходства изделий**

При выполнении шага 5 алгоритма в качестве критерия «выживаемости» используется максимальное время работы производственных линий. Это позволяет добиться наилучших показателей технологической унификации изделий. Однако при этом может сложиться такая ситуация, что на одну производственную линию попадут изделия, имеющие различные конструктивные решения. Это приведет к усложнению используемой оснастки и увеличению времени переналадки оборудования. Чтобы минимизировать такие последствия, необходимо на поздних этапах эволюционного алгоритма в качестве критерия «выживаемости» использовать конструкторско-технологическое сходство группируемых изделий на основе формирования множеств наивысшей плотности в пространстве их признаков [7]. При этом критерий «максимальное время работы производственных линий» принимает вид ограничения, например: ухудшение достигнутого на ранних этапах эволюционного алгоритма значения не должно превышать 10%.

Формирование пространства признаков изделий осуществляется по алгоритму [6]. Выделение же подмножеств в пространстве признаков группируемых изделий целесообразно проводить с использованием алгоритмов кластерного анализа, удовлетворяющих следующим условиям:

- 1) малое время работы алгоритма;
- 2) универсальность алгоритма (возможность использования алгоритма на любом множестве кластеризуемых объектов);
- 3) равномерность распределения объектов по формируемым кластерам;
- 4) независимость результатов группирования от начальных характеристик кластеров.

Проведенный сравнительный анализ [7] показал, что наилучшими с точки зрения этих критериев являются алгоритмы К-средних и искусственные нейронные сети Кохонена (ИНСК) при обучении методом «нейронного газа». Дальнейшие эксперименты показали, что существенно улучшить качество кластеризации можно через применение следующих приемов.

- *Равномерное первоначальное распределение центров кластеров.* Такой прием позволяет минимизировать зависимость результатов кластеризации от начального расположения центров кластеров (методы К-средних и ИНСК с обучением методом WTA). Для равномерного распределения все записи массива данных необходимо упорядочить по всем характеризующим их признакам. Сначала все записи сортируются по наиболее значимому признаку. Если несколько записей имеют одинаковое значение данного параметра, то они сортируются в соответствии со вторым по важности параметром, и т.д. Далее в массиве выбираются записи, определяющие начальное положение центров кластеризации, причем выбранные записи должны быть расположены в отсортированном массиве равномерно.

- *Комбинированный метод кластеризации.* В этом случае кластеризация осуществляется в два этапа – первичная кластеризация, например, с использованием ИНСК, и последующее уточнение расположения центров кластеров методом К-средних.

При проведении эксперимента было выявлено, что наилучшие результаты кластеризации достигаются при использовании комбинированного метода на основе нейронного газа и К-средних, что позволяет рекомендовать его в качестве базового метода кластерного анализа. Однако для ряда случаев лучшее качество кластеризации было достигнуто через использование метода К-средних при начальном равномерном распределении центров кластеров. Соответственно, в настройках модуля «Группирование» пользователь имеет право как самостоятельно определить метод кластеризации, используемый при анализе конструкторско-технологического сходства группируемых изделий, так и отказаться от проведения кластеризации, если необходимо добиться наилучших показателей технологической унификации.

### Заключение

Использование модуля «Группирование» позволяет достичь хорошего (близкого к оптимальному) распределения обрабатываемых изделий по производственным линиям. При этом пользователь может оценить полученную загрузку линий через время изготовления изделий на указанных производственных линиях, загрузку и время простоя оборудования внутри линий, время нахождения полуфабрикатов в накопителях, время работы линий и т.п.

### Литература

1. Беляева О.П. Организационные методы повышения гибкости производственных систем: Дис. ... канд. техн. наук / КГУ им. Н.А. Некрасова. – Кострома, 2006. – 126 с.
2. ГОСТ 3.1102-81 ЕСТД. Стадии разработки и виды документов.
3. Технологическая подготовка гибких производственных систем / С.П. Митрофанов, Д.Д. Куликов и др.; Под общ. ред. С.П. Митрофанова. – Л.: Машиностроение, 1987. – 352 с.
4. Денисов А.Р. Принципы конструкторско-технологического проектирования в условиях мелкосерийного машиностроительного производства // Изв. вузов. Приборостроение. – 2007. – Т. 50. – № 12. – С. 56–60.
5. Вумек Д.П., Джонс Д. Бережливое производство: Как избавиться от потерь и добиться процветания вашей компании. – 2-е изд. – М.: Альпина Бизнес Букс, 2005. – 473 с.
6. Денисов А.Р. Автоматизация группирования объектов машиностроительного производства: Дис. ... канд. техн. наук / БГТУ – Брянск, 2001. – 231 с.
7. Денисов А.Р. Сравнение методов кластерного анализа // Информационные технологии. – 2007. – №3. – С. 7–9.

**Баранов Андрей Александрович**

— Костромской государственный технологический университет, аспирант, andrewbaranov@rambler.ru

**Денисов Артем Руфимович**

— Костромской государственный университет им. Н.А. Некрасова, к.т.н., доцент, заведующий кафедрой, iptema@yandex.ru

**Левин Михаил Григорьевич**

— Костромской государственный университет им. Н.А. Некрасова, д.т.н., профессор, iptema@yandex.ru