

6. *Teodorović D., Dell'Orco M.* Bee Colony Optimization – a Cooperative Learning Approach to Complex Transportation Problems // *Advanced OR and AI Methods in Transportation: Proceedings of 16th Mini-EURO Conference and 10th Meeting of EWGT (13-16 September 2005)*. – Poznan: Publishing House of the Polish Operational and System Research, 2005. – P. 51-60.
7. *Quijano N., Passino K.M.* Honey Bee Social Foraging Algorithms for Resource Allocation: Theory and Application. – Columbus: Publishing house of the Ohio State University, 2007. – 39 p.
8. *Clerc M.* Particle Swarm Optimization. ISTE, London, UK, 2006.
9. *Курейчик В.В., Полуанова Е.Е.* Эволюционная оптимизация на основе алгоритма колонии пчел // *Известия ЮФУ. Технические науки*. – 2009. – № 12 (101). – С. 41-46.
10. *Курейчик В.М., Лебедев Б.К., Лебедев О.Б.* Решение задачи размещения на основе эволюционного моделирования // *Известия Академии наук. Теория и системы управления*. – 2007. – № 4. – С. 78-90.

**Лебедев Борис Константинович**

Технологический институт федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Южный федеральный университет» в г. Таганроге.

E-mail: lbk@tsure.ru.

347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44.

Тел.: 88634371743.

Кафедра систем автоматизированного проектирования; профессор.

**Лебедев Владимир Борисович**

Кафедра системного анализа и телекоммуникаций; доцент.

**Lebedev Boris Konstantinovich**

Taganrog Institute of Technology – Federal State-Owned Autonomy Educational Establishment of Higher Vocational Education “Southern Federal University”.

E-mail: lbk@tsure.ru.

44, Nekrasovsky, Taganrog, 347928, Russia.

Phone: +78634371743.

Department of Computer Aided Design; Professor.

**Lebedev Vladimir Borisovich**

Department of System Analysis and Telecommunications; Associate Professor.

УДК 681.3.001.63

**В.Н. Кучуганов, М.А. Наборщиков**

**РАСПРЕДЕЛЕНИЕ РАБОТ С ПОМОЩЬЮ ГЕНЕТИЧЕСКОГО  
АЛГОРИТМА**

*Предложен эволюционный метод проектирования технологических схем распределения труда. Укрупненно порядок действий предопределен технологическим процессом. Конкретный план работ формируется исходя из реального состояния ресурсов, в первую очередь, невозобновляемых: оборудование, люди, время. Алгоритм рассмотрен на примере работы цеха по пошиву мужской и женской защитной одежды.*

*Планирование производственное; процесс технологический; ресурс невозобновляемый; алгоритм генетический; локус; место рабочее.*

**V.N. Kuchuganov, M.A. Naborschikov**

**WORK DISTRIBUTION BY MEANS OF A GENETIC ALGORITHM**

*In the paper an evolutionary method for the design of work distribution flowcharts is proposed. In general terms the workflow is predetermined by the manufacturing process. The concrete working schedule is generated basing on the as-is state of the resources, above all of nonrenewa-*

*ble ones, i.e. equipment, people, time. The algorithm is considered as applied to the operation of a workshop tailoring men's and women's protective clothing.*

*Production planning; manufacturing process; nonrenewable resource; genetic algorithm; locus; work place.*

Задачи оперативного планирования в производственной сфере, особенно в мелкосерийном и единичном производстве, возникают постоянно. Как правило, оперативное планирование полностью отдается на откуп мастеру, прорабу и т.п. Технолог не прописывает детально, как можно реализовать заданную им технологию, уделяя основное внимание соблюдению конструкторско-технологических параметров. Поэтому мастер имеет некоторую степень свободы и, в зависимости от ситуации, окончательное решение, в частности, по распределению заданий, принимает субъективно.

В классической постановке задачи планирования и составления расписаний [1] – это сложные задачи комбинаторики, решение которых всегда содержит переборы. И это вынуждает разработчиков сокращать количество учитываемых факторов, в том числе, человеческий. Поэтому в реальных условиях мелкосерийного и единичного производства использование эволюционных методов поиска оптимального решения является весьма перспективным.

Генетические алгоритмы – это класс адаптивных алгоритмов, планирующих поведение биологических систем [2,3,5,6]. Процесс поиска решения итерационный.

В работе предлагается генетический алгоритм оперативного планирования, который решает задачу в несколько другой постановке: заданы технологические процессы для изготовления каждого вида продукции заказа, алгоритм ищет оптимальное распределение невозобновляемого ресурса – рабочих мест.

Сущность алгоритма раскрывается на примере работы цеха по пошиву мужской и женской защитной одежды (мелкосерийное и крупносерийное производство).

**Заказ** – список комплектов одежды с указанием количества.

**Модель** – это комплект одежды, например, костюм, состоящий из определенного для этой модели перечня изделий. Например, модель М.02-05 (внутрифирменный код модели, утвержден в документе технического описания модели) имеет наименование «Костюм летний мужской для защиты от производственных загрязнений и от вредных биологических факторов».

**Изделие** – элемент костюма, например, куртка, полукомбинезон, брюки.

**Узел** – группа деталей изделия (спинка, подкладка, рукав).

**Технологическая последовательность** – документ, содержащий описание технологического процесса изготовления швейного изделия в технологической последовательности с указанием неделимых операций и соответствующих данных о технологических параметрах каждой операции, средствах оснащения и трудовых нормативах [4].

**Этап технологической последовательности** – уровень обработки изделия: на начальном этапе выполняются подготовительные операции (например, застрочить верхний срез кармана полочки куртки), затем операции монтажа (например, стачать плечевые срезы спинки и полочки куртки) и заключительные операции (например, очистка готового изделия от производственного мусора и влажно-тепловая обработка).

На данном производстве выделяют следующие этапы:

1. Подготовительные операции.
2. Изготовление деталей (обработка отдельных деталей).
3. Изготовление узлов.
4. Монтаж (сборка).
5. Заключительные операции.

**Технологическая операция** – это часть технологического процесса, выполняемая непрерывно на одном рабочем месте, над одним изделием, одним или несколькими рабочими. Это технологически законченный цикл работы, расчленение которого на составные части невозможно (например, стачивание боковых срезов) или нецелесообразно (например, втачивание левого и правого рукавов в проймы) вследствие технологической связанности.

В число технологических операций, регламентированных технологическим процессом, добавляются **вспомогательные операции**, которые необходимо выполнить перед или после основной операции (например, взять полочку куртки и карман куртки из пачки кроя и положить карман на полочку куртки по отмеченной линии) и которые приходится учитывать при оперативном планировании.

**Рабочее место (РМ)** – это неделимое в организационном отношении (в данных конкретных условиях) звено производственного процесса, обслуживаемое одним или несколькими рабочими, предназначенное для выполнения одной или нескольких производственных или обслуживающих операций, оснащенное соответствующим оборудованием и технологической оснасткой.

**Организационная операция** – группа технологических операций, выполняемых одним исполнителем на одном рабочем месте.

Как правило, одно изделие исполняется на одном РМ, если заказ большой, то на нескольких. Если организационная операция по длительности превышает одну смену, то образуется остаток, переходящий на другой день.

**Технологическая схема разделения труда** – описание организационных технологических операций, включая контроль и перемещение по всем видам работ, выполняемых *на одном технологическом процессе* в технологической последовательности с указанием данных о средствах оснащения и трудовых нормативах.

**Производственное задание** – список комплектов одежды с указанием количества, направленных на обработку в цех. Задание может быть сформировано на определенный период времени (рабочая смена, неделя, декада, месяц) или рассчитано для выполнения всего заказа.

**Такт потока (конвейера)** – промежуток времени, через который производится запуск каждого нового комплекта кроя или выпуск каждой последующей единицы готовой продукции. Такт потока может быть определен по-разному в зависимости от способа задания мощности потока, т.е. в зависимости от заданного выпуска изделий в смену  $M_{см}$  или заданного количества рабочих в потоке  $N$ .

Если такт потока вычисляется как

$$T = \frac{\text{Продолжительность смены}}{\text{Количество РМ}},$$

то получим организационную операцию, равную сменно-суточному заданию.

Если такт потока

$$T = \frac{\text{Продолжительность смены}}{\text{Количество изделий}},$$

то организационные операции будут формироваться так, чтобы все работы с изделием заканчивались в одно время [5].

#### **Ограничения и соглашения.**

1. Последовательное выполнение этапов.
2. Некоторые технологические операции выполняются строго последовательно. Последовательность определяет технолог.
3. Одно изделие может изготавливаться на нескольких одинаковых и (или) различных РМ.
4. Одновременно можно изготавливать несколько одинаковых или различных изделий.

**Популяция** – множество вариантов оперативного плана.

**Особь** (хромосома) – оперативный план.

**Ген** – цепочка технологических операций, которые нельзя переставить местами. Длина цепочки  $l \geq 1$ .

Цепочки последовательных технологических операций выделяет технолог. Если точнее, то и технолог, и мастер, и швея знают, что нельзя, например, вначале обметать петли, а потом разметить их местоположение.

**Локус** – рабочее место (РМ), на котором выполняется цепочка технологических операций. Локус РМ вмещает несколько генов.

На участке пошива имеется множество РМ, на которых могут выполняться одинаковые функции, хотя и с различными показателями. Имеется справочник по взаимозаменяемому оборудованию.

Локусы рабочих мест частично упорядочены в соответствии с вышеуказанными этапами технологического процесса.

**Аллель** (локус, где ген занимает устойчивое состояние) – такое РМ, откуда ген (цепочку) перемещать не желательно.

**Организационная операция** – несколько цепочек технологических операций по одному изделию на одном РМ. Представляет собой блок из нескольких генов, сформированный так, что длительность организационной операции равна или кратна такту потока.

На рис. 1  $g_i$  – ген (неделимая цепочка технологических операций);  $PM_j$  – локус (рабочее место, на котором выполняются технологические операции).

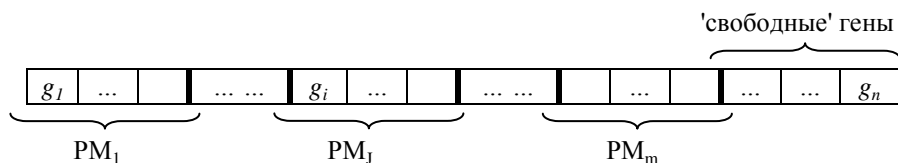


Рис. 1. Код строки хромосомы

В первых популяциях оперативные планы могут содержать «свободные» гены – такие технологические операции, которые не нашли своего места из-за нерационального распределения по рабочим местам.

На рис. 2 изображен код  $i$ -того гена, подстроки которого:

$A$  – номер рабочего места;  $G$  – длина цепочки;

$B$  – номер заказа;

$H$  – номер организационной операции;

$C$  – номер модели;

$I$  – время начала операции;

$D$  – номер изделия;

$J$  – длительность операции;

$E$  – номер узла;

$K$  – качество исполнения

$F$  – номер цепочки;

организационной операции;

$L$  – этап технологического процесса.

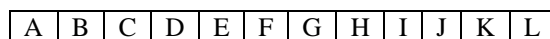


Рис. 2. Представление подстроки гена

Ген переходит на другое рабочее место, меняя параметр качества и иницируя новую (под)цепочку, которая может притягивать «родственные» гены из той же технологической последовательности.

Мутация – это случайный выбор генов и перестановка местами с соседними в пределах хромосомы.

**Оператор мутации.** Случайным образом выбирается ген цепочки технологических операций и меняется местами с геном на ближайшем РМ, совместимом по оборудованию. При этом проверяется возможность перестановки по длительности такта потока. Задается вероятность выполнения оператора мутации.

В первую очередь, мутируют гены длиной 1, потом 2 и т.д.

**Оператор скрещивания.** Скрещивание осуществляется между парой родительских хромосом так, что потомку передаются блоки из генов, по длительности равные такту потока, т.е. скрещивание многоточечное, при котором потомку передаются заполненные локусы – загруженные рабочие места.

Задачей программы является формирование такого плана распределения всех заданных работ, в котором суммарное отклонение длительностей организационных операций (производственных заданий) от такта потока было минимальным:

$$1 / \sum_{j=1}^m \Delta T_j \rightarrow \max, \quad (1)$$

где  $\Delta T_j$  – отклонение  $j$ -той организационной операции от такта потока.

**Укрупненный алгоритм.**

1. Классификация действий по признаку взаимозаменяемости с целью ограничить генетический поиск в пределах классов действий.

2. Формирование множества генов технологических операций и вычисление их параметров для каждого возможного РМ.

3. Формирование начальной популяции, состоящей из единственной особи в виде строки из таких генов, которые в совокупности образуют некий вариант схемы распределения труда, обеспечивающей выполнение заказа при имеющихся ресурсах. Для этого множество генов разбивается на подмножества генов, принадлежащих одной технологической последовательности, изделию, этапу. Внутри подмножеств осуществляется сортировка по времени, качеству и другим критериям.

4. Пока не выполнено условие останова алгоритма, т.е. результат формулы (1) перестанет увеличиваться, выполнять генетический поиск, иначе перейти к пункту 12.

5. Мутация.

6. Отбор из текущего поколения двух особей, обладающих одинаковыми признаками (этапом технологической последовательности, типом оборудования, оборудованием) с наиболее высокой приспособленностью.

7. Скрещивание.

8. Вычислить значение функции приспособленности потомков. Создать *аллель* в случае, когда потомок удовлетворяет условию:

$$F(u_j) = 1 / \Delta T_j \rightarrow \max,$$

где  $\Delta T_j$  – отклонение от такта потока  $j$ -ой организационной операции.

9. Поместить потомков в новое поколение.

10. Редукция – сокращение наименее приспособленных особей по количеству «свободных» (не распределенных) генов технологических операций.

11. Возврат к пункту 4.

12. Вывод результата работы на экран.

**Тестовый пример.**

Задача: с помощью генетического алгоритма распределить работы для заказа, состоящего из 100 зимних курток модели М.02-20.

Количество исполнителей на швейном участке 30 человек.

Время, затрачиваемое на изготовление одного изделия – 14664,8 сек.

Технологический процесс состоит из 202 технологических операций.

Допустимое отклонение от такта потока 15 %.

Такт потока –  $488,83 \pm 73,32$  сек.

Количество итераций – 231.

Расчетное время выполнения заказа 51 рабочая смена.

Всего организационных операций – 36.

Выпуск в смену – 59 шт.

На рис. 3 показаны результаты работы программы.

В результате присутствуют организационные операции с трудоемкостью менее 1. Такая трудоемкость обусловлена специфичным оборудованием, например, орг. операция № 35 включает одну технологическую операцию (рис. 3) «Наметить месторасположение петли на пластроне, на поясе, обметать 2 петли» технологом указано оборудование JUKI-782, которое нигде больше не встречается.

1С:Предприятие – Автоматизированная система "Партнер-информ"							
Файл Правка Таблица Операции Технология Планирование Фактический учет Сотрудники Сервис Окна Справка							
А: СхемаРазделенияТруда *							
34	<b>Организационная операция №34</b>	4		М	407,5	0,84	JUKI-5550, Отделочная лапка 0,2
КМЖ.23	Проложить вступку по планке для пристегивания на расстоянии 0,2см от края	2		М	78,5		JUKI-5550, Отделочная лапка 0,2
КМЖ.25	Проложить строчку на расстоянии 0,2 от края по отлету и концам воротника	3		М	65		JUKI-5550
КМЖ.26	Настрочить верхний воротник на шов втачивания нижнего воротника	4		М	104		JUKI-5550
КМЖ.27	Настрочить пояс на 0,1 см от шва притачивания, подгибая срез нижней части пояса внутрь	3		М	160		JUKI-5550
	<b>Итого</b>						
35	<b>Организационная операция №35</b>	3		С/М	41,6	0,09	JUKI-782
КМЖ.28	Наметить месторасположение петли на пластроне, на поясе, обметать 2 петли	3		С/М	41,6		JUKI-782
	<b>Итого</b>						
36	<b>Организационная операция №36</b>	3		С/М	322,9	0,67	Двухигльная с отключающимися иглами
КМЖ.2	Проложить отделочные строчки по плечевому шву строчками на расстоянии 0,2/0,7 см от края	3		С/М	36,7		Двухигльная с отключающимися иглами
КМЖ.7	Проложить отделочные строчки по верхней части проймы спинки и полочек строчками на расстоянии 0,2/0,7 см от края	3		С/М	67,9		Двухигльная с отключающимися иглами
КМЖ.11	Проложить отделочные строчки по боковому шву куртки на расстоянии 0,2/0,7 см от края	3		С/М	85		Двухигльная с отключающимися иглами
КМЖ.21	Проложить отделочную строчку по шву притачивания пластрона строчками на расстоянии 0,2/0,7 см от края	3		С/М	133,3		Двухигльная с отключающимися иглами
	<b>Итого</b>						
	<b>ВСЕГО, сек.</b>				14530	30	
	<b>час.</b>				4,04		

Рис. 3. Фрагмент итоговой схемы разделения труда

**Заключение.** Таким образом, предлагаемый генетический алгоритм оперативного планирования можно охарактеризовать следующими особенностями:

1. Задан укрупненный план действий в виде технологического процесса, который должен соблюдаться неукоснительно.

2. Конкретный план работ формируется исходя из реального состояния (наличия) ресурсов, в первую очередь, невозобновляемых: оборудование, люди, время. Благодаря такому подходу, естественным образом выявляется нехватка или излишек ресурсов, что позволяет формулировать планы поставок.

3. Классификация действий по признаку взаимозаменяемости и ограниченный генетический поиск в пределах классов действий.

4. Код хромосомы – варианта оперативного плана состоит из генов, отображающих последовательные операции, выполняемые на одном рабочем месте. Соответственно построены операторы скрещивания и мутации.

5. Локусом является рабочее место и в нем может разместиться несколько генов неделимых технологических операций.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Томас Х. Кормен, Чарльз И. Лейзерсон, Рональд Л. Ривест, Клиффорд Штайн. Алгоритмы: построение и анализ / 2-е изд. – М.: Вильямс, 2006. – С. 1296.
2. Курейчик В.М., Лебедев Б.К., Лебедев О.К. Поисковая адаптация: теория и практика. – М.: Физматлит, 2006. – С. 272.
3. Емельянов В.В., Курейчик В.В., Курейчик В.М. Теория и практика эволюционного моделирования. – М.: Физматлит, 2003. – С. 432.
4. Кокеткин П.П., Кочегура Т.Н. Промышленная технология одежды: справочник – М.: Легпромбытиздат, 1988. – С. 640.
5. Курейчик В.М. Модифицированные генетические операторы // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2009. – № 12 (101). – С. 7-15.
6. Курейчик В.В., Курейчик В.М., Родзин С.И. Концепция эволюционных вычислений, инспирированных природными системами // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2009. – № 4 (93). – С. 16-24.

**Кучуганов Валерий Никонорович**

ГОУ ВПО «Ижевский государственный технический университет».

E-mail: kuchuganov@istu.ru.

426034, УР, г. Ижевск, ул. Студенческая, д. 7.

Тел.: 83412588910.

Кафедра автоматизированных систем обработки информации и управления; заведующий кафедрой; д.т.н.; профессор.

**Наборщиков Михаил Александрович**

Кафедра автоматизированных систем обработки информации и управления; аспирант.

**Kuchuganov Valeriy Nikonorovich**

State Educational Institution of Higher Professional Education "Izhevsk State Technical University".

E-mail: kuchuganov@istu.ru.

7, Studencheskaya Street, Izhevsk, 426034, Udmurt Republic.

Phone: +73412588910.

The Department of Automated Information Processing and Control Systems; Head of Department; Dr. of Eng. Sc.; Professor.

**Naborschikov Mikhail Alexandrovich**

The Department of Automated Information Processing and Control Systems; Postgraduate Student.

УДК 681.325

**О.Б. Лебедев, В.Ю. Зорин**

**УПАКОВКА НА ОСНОВЕ МЕТОДА МУРАВЬИНОЙ КОЛОНИИ\***

*Рассматривается муравьиный алгоритм решения задачи одномерной упаковки. Описывается структура графа поиска решений, процедура поиска решений на графе, способы отложения и испарения феромона. В работе используется циклический (anti-cycle) метод муравьиных систем. Экспериментальные исследования проводились на IBM PC. По сравнению с существующими алгоритмами достигнуто улучшение результатов.*

*Роевой интеллект; муравьиная колония; адаптивное поведение; одномерная упаковка.*

---

\* Работа выполнена при поддержке: РФФИ (грант № 09-01-00509), г/б № 2.1.2.1652.