

УДК 004.94:519.85

**В. А. ПОПОВ, Ю. А. БЕЛОКОНЬ, Я. В. КРУПЕЙЧЕНКО, С. А. ДУРНЕВ**

*Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», Украина*

## **АНАЛИЗ МЕТОДОВ ПОСТРОЕНИЯ РАСПИСАНИЙ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ЛИНИЙ**

*Проведен обзор и анализ методов построения расписаний. Обоснована целесообразность применения приближенных методов построения расписаний. Разработан эвристический алгоритм построения расписаний производственных технологических линий, на основе которого были проведены расчеты. Показано, что в зависимости от выбранной последовательности, при которой детали поступают в обработку на технологические линии, меняется конечное время выполнения всего заказа. Для уменьшения затрат времени, потраченного на решение поставленной задачи, эвристический алгоритм программно реализован в среде Eclipse.*

**Ключевые слова:** теория расписаний, методы построения технологических расписаний, эвристический алгоритм, производственные технологические линии.

### **Введение и постановка задачи**

В наше время наблюдается бурное развитие информационных компьютерных технологий и их внедрение во все сферы деятельности человека. Более остро необходимость комплексного внедрения информационных систем управления стоит перед предприятиями машино- и авиастроения [1].

Для авиастроительных предприятий с различной производственной структурой одной из важнейших задач внутрицехового планирования является установление календарного плана загрузки оборудования. Расчеты календарных графиков выполняются во всех системах оперативно-производственного планирования, однако из-за сложности задачи результаты этих расчетов далеко не в полной мере удовлетворяют условиям рациональной организации производства, как правило, в силу непредвиденных обстоятельств календарные графики нарушаются в первые же часы работы цеха. На реальный производственный процесс оказывают воздействие большое количество внешних факторов. В связи с этим, для обеспечения сроков выполнения заказов, производственная программа на отдельно взятом участке может изменяться. Это ведет к необходимости оперативной корректировки расписания. Поэтому трудность построения календарного плана заключается не только в предварительном расчете оптимального (наилучшего) варианта использования имеющегося оборудования для своевременного выполнения производственных заданий, но также и в необходимости эффективного преобразования поступающей информации о ходе производства с целью внесения соответствующих коррек-

тив в первоначальный вариант плана. Такие задачи из-за большого объема вычислительных работ можно решить только с помощью ЭВМ. Компьютеризированные системы позволяют существенным образом повысить оперативность производственного управления на предприятии. Внедрение таких систем на предприятии помогло бы контролировать движение и производство деталей и узлов, т. к. задача оперативно-календарного планирования в значительной мере влияет на результаты работы предприятия в целом [2].

Задачи теории расписаний имеют не только важное теоретическое значение, как относящееся в основном к классу NP-полных задач, но и получили широкое практическое распространение во множестве инженерных и управленческих задач. Везде, где требуется упорядочить и распределить какие-либо ресурсы между агентами (исполнителями), возникает вопрос эффективного планирования. Оптимальность планирования в значительной степени определяет технико-экономические показатели производственных и бизнес-процессов [3]. Построение оптимального плана распределения даже на современных многопроцессорных системах может занять длительное время при использовании точных методов решения, например, ветвей и границ. С другой стороны, применяемые в настоящее время для таких задач быстрые, но приближенные списочные методы, такие, как метод критического пути (МКП), могут давать большую погрешность, приближающуюся к 30% [4]. Такое отклонение от оптимума в большинстве случаев является неприемлемым. Возникает необходимость в методах, характеризующихся сочетанием противоречивых свойств: полиномиальной зависимостью времени счета от размерно-

сти задачи и точностью, близкой к оптимальной (по крайней мере значительно лучшей, чем у МКП). К такому классу методов относятся эвристические и эволюционно-генетические алгоритмы, которые являются на сегодняшний момент наиболее гибкими и эффективными из всех известных приближенных алгоритмов.

Среди множества задач о расписании на основе анализа литературы и промышленного опыта можно выделить следующие задачи, которые требуют непосредственного практического решения:

1. Непрерывный поток поступающих деталей на заданную линию с заданными характеристиками, где требуется определить такой порядок обработки для заданных технологий, чтобы загрузка всех агрегатов и производительность всего комплекса линий была максимальной без учета емкости буферных систем (буфер считается бесконечным).

2. Исходная заданная масса деталей с известной номенклатурой заранее задана и требуется определить такое расписание, чтобы производительность была максимальной (при условии бесконечно или конечного буфера).

Указанные прикладные задачи в данной работе предлагается решать с помощью эвристических алгоритмов, так как применение строгих формализованных (включая генетические [5] и др. алгоритмы) требует значительных временных затрат и применения компьютерной поддержки. Таким образом, целью данного исследования является повышение эффективности работы производственных процессов и нахождение оптимальной производственной информации, используя эвристический алгоритм. Для достижения поставленной цели необходимо:

1. Проанализировать существующие принципы и методы построения расписаний работ на машиностроительных предприятиях.

2. Разработать эвристический алгоритм для построения расписания обработки деталей на технологических линиях, минимизирующего длительность выполнения заказа.

3. Привести пример решения задачи на основе разработанного эвристического алгоритма.

4. Реализовать программно.

## 1. Принципы распараллеливания алгоритмов построения расписаний

Рассмотрим принципы создания параллельных алгоритмов, которые позволят строить расписания обработки комплектующих деталей и сборки готовых изделий для предприятий с дискретным характером производства. Для построения расписаний работ на уровне предприятий в [6] предлагается строить «каркасные» расписания работ. При их по-

строении все партии комплектующих деталей каждого этапа сборки делятся на группы, детали которых в одной последовательности проходят производственные системы и участки предприятия. После этого определяются времена обработки деталей каждой группы на тех производственных участках предприятия, где обрабатывается соответствующая группа деталей. Каждая из сформированных групп деталей рассматривается как обобщенная деталь, а производственный участок, на котором обрабатывается эта группа деталей, рассматривается как обобщенный станок. Это позволяет использовать для построения «каркасных» расписаний обработки таких групп деталей на уровне предприятия традиционные методы построения расписаний обработки деталей [7]. Если же количество производственных систем и участков на предприятии оказывается значительным, то построение планов и расписаний работ может занимать весьма большое время, что в свою очередь может существенно снизить эффективность управления предприятием. Однако особенности описанных методов построения расписаний позволяют распараллелить вычисления и за счет этого существенно сократить время построения планов и расписаний работ.

Дело в том, что при построении «каркасного» расписания работ на предприятии требуется определить времена обработки каждой группы на тех производственных участках предприятия, где соответствующая группа деталей обрабатывается. Для определения времени обработки деталей каждой группы на производственных участках предприятия могут использоваться оценочные модели, или эти времена могут быть определены путем построения расписания обработки соответствующей группы. Причем эти времена могут вычисляться независимо друг от друга в любой последовательности. Поэтому на многопроцессорных вычислительных средствах можно организовать параллельные вычисления времени обработки групп деталей на соответствующих производственных системах и участках.

В связи с этим, для построения «каркасного» расписания работ может быть предложен алгоритм, состоящий из следующих шагов.

Шаг 1. Произвести разделение комплектующих деталей каждого  $i$ -го изделия на  $p_i$  групп в соответствии с приведенным выше правилом. Такое разделение на группы для каждого изделия осуществляется только раз и может использоваться до тех пор, пока не производится модернизация изделия, технологии обработки деталей или производства. Перейти к Шагу 2.

Шаг 2. Положить  $i$  равным 1 и перейти к Шагу 3.

Шаг 3. Сформировать матрицу времени обра-

ботки групп деталей  $i$ -го изделия на производственных системах предприятия  $A_i$ , размерность которой равна  $p_i \times m$  ( $m$  – количество производственных участков). Каждый элемент такой матрицы  $a_{i\ell j}$  определяет время обработки  $\ell$ -й группы деталей  $i$ -го изделия на  $j$ -м производственном участке. Для этого параллельно вычисляются времена обработки групп деталей  $i$ -го изделия на всех используемых производственных системах предприятия.

Шаг 4. Построить «каркасное» расписание обработки групп деталей  $i$ -го изделия на производственных системах предприятия и определить время обработки комплектующих деталей  $i$ -го изделия. Перейти к Шагу 5.

Шаг 5. Проверить все ли времена обработки комплектующих деталей изготавливаемых изделий определены. Если определены все времена, то следует переход к Шагу 6. В противном случае  $i$  полагается равным  $i+1$  и следует переход к Шагу 3.

Шаг 6. Определить порядок сборки изделий с использованием алгоритмов, использующих идею алгоритма решения задачи Джонсона [8]. Положить  $i$  равным 1. Перейти к Шагу 7.

Шаг 7. Произвести «склеивание» расписаний смежных по обработке групп деталей на всех производственных участках предприятия для  $i$ -го изделия по определенному на Шаге 6 порядку сборки. Переход к Шагу 8.

Шаг 8. Проверить, для всех ли изделий произведено «склеивание» расписаний смежных по обработке групп деталей. Если «склеены» расписания обработки групп деталей для всех изделий, то построение расписания работ завершается. В противном случае  $i$  полагается равным  $i+1$  и следует переход к Шагу 7.

## 2. Приближенные методы построения расписаний выполнения $n$ заданий на $m$ машинах

Рассмотрим эффективные приближенные методы построения расписаний выполнения  $n$  заданий на  $m$  машинах (Job-Shop-Problem). На основе установленных свойств допустимых и оптимальных расписаний на первых шагах работы алгоритма устанавливается факт совместности исходной системы ограничений, вычисляются нижние границы критерия эффективности в оптимальном решении. Алгоритм приближенного решения задачи строится на основе построения на каждом шаге допустимого расписания выполнения работ на наиболее напряженной машине и корректировки наиболее ранних и допустимых наиболее поздних сроков начала выполнения каждой операции на других машинах,

сроки выполнения на которых еще не назначены.

Обобщенная задача Джонсона заключается в построении оптимальной последовательности выполнения производственных заданий, а также определения начальных и конечных сроков операций, входящих в каждое из этих заданий, обеспечивающих минимальное время выполнения всего комплекса работ.

Существенная особенность такой постановки заключается в том, что для каждой детали множество операций одинаково. Хотя данное ограничение на практике снимается достаточно просто, вводя, например, псевдооперации с нулевой длительностью, однако оно играет ключевую роль в размерности поставленной задачи. В такой постановке задача была решена на практике множество раз [8, 9], но ее применение на реальном производстве остается невозможным в случае использования универсального оборудования или необходимости учета оборудования разной производительности. В этом случае приходится дополнительно применять методы агрегирования на этапе постановки задачи и/или методы интерпретации решения после его получения. Это значительно снижает ценность получаемых результатов. Чтобы избежать этого, предложена расширенная постановка рассматриваемой задачи, лишенная указанных недостатков.

**Постановка задачи.** Пусть на  $m$  классах машин, в каждом из которых не более чем  $R_k$  станков, должно быть выполнено  $n$  производственных заданий. Все задания состоят из одной и той же последовательности операций, входящих в задание (или могут быть дополнены операциями нулевой длительности). Таким образом, тройка индексов  $i = 1, \dots, n$ ;  $k = 1, \dots, m$ ;  $\ell = 1, \dots, R_k$  определяет конкретный станок для операции каждого задания. Необходимо отметить, что пара индексов  $\{i, k\}$  является уникальной и внесение индекса  $\ell$  необходимо только для решения задачи. Последовательность операций  $\Pi = \{1, \dots, m\}$  в рамках каждого задания определена набором ограничений задачи. Время выполнения каждой операции обозначено в виде  $t(i, k)$ , а граничные сроки начала и окончания выполнения  $i$ -го задания через  $b_i$  и  $V_i$ , соответственно. Количество машин вида  $k$  обозначено  $R_k$ , а граничные времена использования каждой  $\ell$ -й из них через  $h_k^\ell$  и  $H_k^\ell$ . Набор ресурсных ограничений при необходимости может быть легко расширен до набора интервалов времени использования каждой из машин.

Дополнительно обозначим:

$x(i, k, \ell)$  – время начала выполнения операции

на машине  $\ell$  вида  $k$ ;

$v(i,k,\ell)$  – допустимый наиболее ранний срок начала выполнения операции;

$\sigma(i,k,\ell) = x(i,k,\ell) + t(i,k)$  – время завершения операции;

$T_i = \sigma(i,m)$  – время завершения  $i$ -го задания;

$T = \max T_i, 1 \leq i \leq m$  – время завершения выполнения всего комплекса заданий.

Необходимо найти такую оптимальную последовательность времен обработки всех операций (расписание), т.е.  $x(i,k,\ell)$  и  $\sigma(i,k,\ell)$  для определенного комплекса заданий с учетом ограничений на использование оборудования и сроки обработки заданий, которая минимизирует общее время  $T$  выполнения всего комплекса работ.

**Алгоритм решения задачи.** Обычно для решения рассматриваемой задачи применяются эвристические методы, в которых оптимальное расписание строится последовательно и вначале состоит только из одной операции. Затем эта последовательность пополяется второй операцией текущего задания или первой операцией иного задания и т.д. Частичным планом  $P^S$  называется последовательность заданий, для которых уже определены сроки и машины. Общая последовательность обработки заданий –  $I$ , подпоследовательность выполненных заданий –  $I_1^S = \{i_1^S, \dots, i_R^S\}$  (очередность выполнения именно в соответствии индексов последовательности).  $I_2^S = I/I_1^S$  – оставшаяся часть нераспределенных заданий.

В основе предлагаемого метода решения лежит модификация метода ветвей и границ, рассмотренная в [10]. Необходимо также заметить, что решение обобщенной задачи Джонсона есть последовательность заданий, в которой оборудование будет их обрабатывать. В предлагаемой постановке недостаточно найти последовательность запуска заданий в обработку, необходимо также определить, на каком конкретном оборудовании необходимо обрабатывать ту или иную операцию. Таким образом, в пространстве допустимых решений частичные планы могут отличаться только оборудованием, на котором обрабатывается каждая операция.

Существует две классические стратегии ветвления в методе ветвей и границ (односторонняя и фронтальная). В односторонней стратегии каждое ветвление фиксируется по параметру (например, по лучшей нижней оценке) и, таким образом, получается быстрое допустимое решение и оценка сверху всего расписания. Во фронтальной стратегии варианты рассматриваются по уровням (то есть сначала все возможные варианты первого уровня и для каж-

дого из них находятся оценки снизу и сверху). Далее следует отсеивать варианты и для оставшихся из них строится новый уровень. В первой стратегии требуется много расчетного времени, а во второй – памяти. В данной работе предлагается использовать смешанную стратегию, где каждый найденный вариант с помощью односторонней стратегии будет расширяться новыми вариантами во фронтальном смысле. В результате применения такой стратегии на начальных этапах поиска будут проверены возможные варианты на глобальный экстремум, и далее будут просматриваться наиболее перспективные варианты.

Точность и скорость оценки вариантов для реальных задач сильно зависят от эвристики формирования оценки [8].

### 3. Алгоритм для приближенного решения задачи

**Постановка задачи.** Требуется составить план производства продукции на определенный период, обеспечивающий минимизацию сроков выполнения производственного заказа в условиях известных характеристик производственного процесса.

Целевая функция  $T$  – время, необходимое для производства всех изделий в требуемом объеме, будет выглядеть следующим образом:

$$T = \max(T_1, T_2, \dots, T_j, \dots, T_L) \rightarrow \min,$$

где  $T_j$  – суммарное время работы  $j$ -й производственной линии за выбранный период;

$L$  – количество производственных линий.

$$T_{jk} \leq R,$$

где  $T_{jk}$  – суммарное время работы  $j$ -й производственной линии за  $k$ -е сутки,

$R$  – рабочее время производственных линий (часов в сутках), остальное время отводится на профилактическое обслуживание и ремонтные работы.

$$T_{jk} = \sum_{i=1}^N \frac{x_{ijk}}{P_{ij}} + hM, \quad (1)$$

где  $x_{ijk}$  – объем производства изделий  $i$ -й номенклатуры на  $j$ -й линии за  $k$ -е сутки,  $x_{ijk} \geq b$ ;

$b$  – минимальный размер партии производства, обусловленный технологическими ограничениями и требованиями к качеству продукции,

$P_{ij}$  – объем производства изделий  $i$ -й номенклатуры на  $j$ -й линии за единицу времени (производительность линии); в случае, когда  $P_{ij}$  равняется нулю, производство изделий  $i$ -й номенклатуры на  $j$ -й линии невозможно;

N – количество номенклатурных позиций;

h – дополнительные временные издержки, возникающие на линии при смене производственной номенклатуры и типа сырья;

M – количество таких мероприятий в сутках по подготовке линии к производству изделий другой номенклатуры [11].

**Алгоритм приближенного решения задачи:**

Шаг 1. Находим продолжительность изготовления партии изделий на каждой линии.

Шаг 2. Выбираем последовательность изготовления изделий на производственных линиях.

Шаг 3. Находим суммарное время изготовления всех изделий на каждой линии с учетом времени простоев и времени переналадки.

Шаг 4. Находим максимальное время загрузки производственных линий.

Шаг 5. Для оптимизации полученного времени, проводим несколько таких расчетов, в каждом из которых меняем последовательность обработки изделий на производственных линиях.

Шаг 6. Из полученных результатов выбираем наименьшее значение времени изготовления заказа.

**4. Пример решения задачи на основе приближенного алгоритма**

Исходные данные:

1. На рассматриваемом предприятии работают 3 производственные линии (L=3).
2. Рабочее время линий 20 ч (R=20).
3. На профилактические и ремонтные работы в сутки отводится 4 ч.
4. Минимальный размер партии производства 800 кг (b=0,8).
5. На подготовку линии к производству изделий другой номенклатуры и замену сырья уходит 15 мин. или четверть часа (h=0,25).
6. Номенклатура включает 5 разновидностей изделий (N=5).
7. Объем производства изделий равен 1600 кг ( $x_{ijk} = 1600$ ).
8. Линии имеют производительность для каждого изделия. Производственные линии характеризуются следующей производительностью (табл. 1):

1. Найдем продолжительность изготовления партии деталей на каждой линии по формуле (1).

Первое изделие:

$$T_{11} = \frac{1600}{900} = 1,7 \text{ ч,}$$

$$T_{21} = \frac{1600}{800} = 2 \text{ ч,}$$

Таблица 1

Производительность линий, кг/ч

Изделия	Линии		
	1	2	3
1	900	800	700
2	700	1000	
3	1000	600	800
4	800	700	600
5	600	600	

$$T_{31} = \frac{1600}{700} = 2,28 \text{ ч.}$$

Второе изделие:

$$T_{12} = \frac{1600}{700} = 2,28 \text{ ч,}$$

$$T_{22} = \frac{1600}{1000} = 1,6 \text{ ч.}$$

Третье изделие:

$$T_{13} = \frac{1600}{1000} = 1,6 \text{ ч,}$$

$$T_{23} = \frac{1600}{600} = 2,66 \text{ ч,}$$

$$T_{33} = \frac{1600}{800} = 2 \text{ ч.}$$

Четвертое изделие:

$$T_{14} = \frac{1600}{800} = 2 \text{ ч,}$$

$$T_{24} = \frac{1600}{700} = 2,28 \text{ ч,}$$

$$T_{34} = \frac{1600}{600} = 2,66 \text{ ч.}$$

Пятое изделие:

$$T_{15} = T_{25} = \frac{1600}{600} = 2,66 \text{ ч.}$$

2. Выберем последовательность изделий, в которой они будут выполняться. Возьмем последовательность загрузки линий: 1 изделие – 2 изделие – 3 изделие – 4 изделие – 5 изделие (рис. 1).

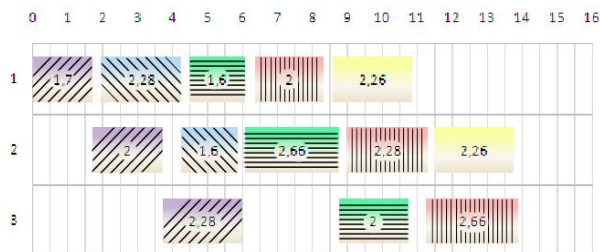


Рис. 1. Временная диаграмма выполнения заказа для последовательности 1-2-3-4-5:

- ▨ - деталь 1    ▨ - деталь 3    ▨ - деталь 5
- ▨ - деталь 2    ▨ - деталь 4



3. Найдем суммарное время изготовления всех деталей на каждой линии с учетом времени простоев и времени переналадки.

На изготовление 1-го изделия понадобится:

$$T_{(1)} = T_{11} + T_{21} + T_{31},$$

$$T_{(1)} = 1,7 + 2 + 2,28 = 5,98 \text{ ч.}$$

Изготовление 2-го изделия, учитывая время изготовления 1 изделия, переналадку линий и простой, завершится через  $T_{(1,2)} = 5,83$  ч от начала процесса обработки.

Изготовление 3-го изделия, учитывая время изготовления 1-го и 2-го изделий, переналадку линий и простой, будет завершено через  $T_{(1,2,3)} = 10,74$  ч.

Аналогично найдем время окончания обработки 3, 4 и 5 изделий соответственно:

$$T_{(1,2,3,4)} = 13,93 \text{ ч.} \quad T_{(1,2,3,4,5)} = 13,99 \text{ ч.}$$

4. Таким образом, время на изготовление пяти деталей в последовательности 1–2–3–4–5 будет 13,99 ч.

5. Для оптимизации полученного времени проведем несколько таких расчетов, в каждом из которых поменяем последовательность изделий на производственных линиях.

Например, найдем суммарное время изготовления всех деталей на каждой линии с учетом времени простоев и времени переналадки для последовательности изделий 1-3-4-5-2 (рис. 2).

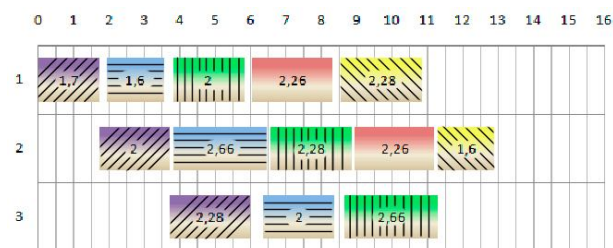


Рис. 2. Временная диаграмма выполнения заказа для последовательности 1-3-4-5-2

На изготовление 1 изделия понадобится  $T_{(1)} = 5,98$  ч.

Аналогично предыдущим расчетам время окончания обработки 3, 4, 5 и 2 изделий соответственно равно:

$$T_{(1,3)} = 8,36 \text{ ч.} \quad T_{(1,3,4)} = 10,9 \text{ ч.}$$

$$T_{(1,3,4,5)} = 11,37 \text{ ч.} \quad T_{(1,3,4,5,2)} = 12,93 \text{ ч.}$$

Таким образом, время на изготовление деталей в последовательности 1-3-4-5-2 составит 12,93 ч.

6. В результате серии расчетов определено, что наименьшее значение времени изготовления заказа обеспечивается при последовательности из-

готовления изделий (1-3-4-5-2).

Разработано инструментальное средство в среде Eclipse, позволяющее проводить расчеты, основываясь на предложенном эвристическом алгоритме, а также наглядно отображать загрузку производственных линий (рис. 1-2). При последовательности деталей 1-2-3-4-5 время выполнения заказа  $t = 13,99$  ч (рис. 3а), а при 1-3-4-5-2 соответственно  $t = 12,93$  ч (рис. 3б).

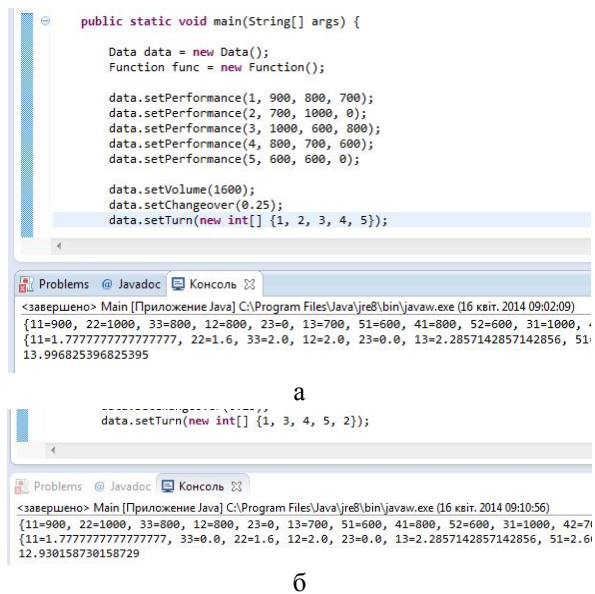


Рис. 3. Результаты расчетов:  
а – для последовательности 1-2-3-4-5;  
б – для последовательности 1-3-4-5-2

### Заключение

Известные строго формализованные методы решения задач о расписании являются достаточно сложными для изучения и использования, так как, как правило, для задач даже небольшой размерности требуется применение компьютерной поддержки. Разработанное инструментальное средство может быть применено на стадии проектирования и эксплуатации. Программный комплекс позволяет максимально повысить загрузку технологического оборудования, снизить длительность производственного цикла изготовления деталей, что в свою очередь, обеспечивает высокую эффективность функционирования автоматизированного технологического комплекса механообработки в целом.

### Литература

1. Михайлова, Л. В. *Формирование и оперативное управление производственными системами на базе поточно-группового производства в автоматизированном режиме [Текст] / Л. В. Михайлова, Ф. И. Пармонов, А. В. Чудин. – М. : ИТЦ МАТИ, 2002. – 60 с.*

2. Секирин, А. И. Программный комплекс для моделирования, анализа и оптимизации работы автоматизированных технологических комплексов механообработки [Текст] / А. И. Секирин // *Научные работы Донецкого нац. техн. ун-та.* – Донецк : ДонНТУ, 2003. – С. 198-203.

3. Pinedo, M. L. *Planning and Scheduling in Manufacturing and Services [Text]* / M. L. Pinedo. – 2<sup>nd</sup> ed. – N.Y. : Springer-Verlag New York, 2009. – 536 p.

4. Будиловский, Д. М. Оптимизация решения задач теории расписаний на основе эволюционно-генетической модели распределения заданий [Текст] : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.13.01 / Будиловский Дмитрий Михайлович ; ДГТУ – Ростов-на-Дону, 2007. – 16 с.

5. Bierwirth, C. *Production Scheduling and Rescheduling with Genetic Algorithms [El. resource]* / C. Bierwirth, Dirk C. Mattfeld. – Access mode: <http://user.engineering.uiowa.edu/~ie238/Lecture/Paper1.pdf>. – 05.11.2014.

6. Хоботов, Е. Н. Использование параллельных-вычислений при решении задач планирования и построения расписаний работ на предприятиях [Текст] / Е. Н. Хоботов // *Параллельные вычисления*

*и задачи управления: доклады V Междунар. конф., Москва, 26–28 окт. 2010 г.* – М., 2010. – С. 315–322.

7. Brucker, P. *Scheduling Algorithms [Text]* / P. Brucker. – 5<sup>th</sup> ed. – Berlin : Springer, 2006. – 371 p.

8. Зак, Ю. А. Решение обобщенной задачи Джонсона с ограничениями на сроки выполнения заданий и времена работы машин. Ч. 1. [Текст] / Ю. А. Зак // *Проблемы управления.* – 2010. – № 3. – С. 17-27.

9. Беляев, А. А. Модель управления ресурсами предприятия при дискретном производстве [Текст] / А. А. Беляев, С. С. Котов, В. Ю. Столбов // *Проблемы управления.* – 2007. – № 6. – С. 50-56.

10. Зак, Ю. А. Решение обобщенной задачи Джонсона с ограничениями на сроки выполнения заданий и времена работы машин. Ч. 2. [Текст] / Ю. А. Зак // *Проблемы управления.* – 2010. – № 4. – С. 12-19.

11. Гарколь, Н. С. Применение генетических алгоритмов в решении задач планирования производства и реализации продукции [Текст] / Н. С. Гарколь, М. В. Гунер // *Вестник томского государственного университета. Управление, вычислительная техника и информатика* – 2012. – № 2 (19). – С. 72-79.

Поступила в редакцию 9.11.2015, рассмотрена на редколлегии 18.11.2015

## АНАЛІЗ МЕТОДІВ ПОБУДОВИ РОЗКЛАДІВ ВИРОБНИЧИХ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ЛІНІЙ

**В. О. Попов, Ю. А. Білокін, Я. В. Крупейченко, С. О. Дурнев**

Проведено огляд та аналіз методів побудови розкладів. Обґрунтовано доцільність застосування наближених методів побудови розкладів. Розроблено евристичний алгоритм побудови розкладів технологічних ліній, на основі якого було проведено розрахунки. Доведено, що залежно від обраної послідовності подання деталей для обробки на технологічні лінії змінюється кінцевий час виконання всього замовлення. Для зменшення часу вирішення поставленої задачі евристичний алгоритм реалізовано програмно в середовищі Eclipse.

**Ключові слова:** теорія розкладів, методи побудови технологічних розкладів, евристичний алгоритм, виробничі технологічні лінії.

## ANALYSIS OF PRODUCTION TECHNOLOGICAL LINES SCHEDULING METHODS

**V. A. Popov, J. A. Bilokin, J. V. Krupejchenko, S. A. Durnev**

The review and the analysis of schedules construction methods are carried out. Expediency of approximate scheduling methods application is proved. The heuristic algorithm for production lines scheduling is proposed. Calculations are conducted on the basis of this algorithm. It is shown that the execution time of the entire order depends on the sequence of details processing. The software based on the heuristic algorithm using Eclipse IDE is implemented.

**Keywords:** scheduling theory, technological scheduling methods, heuristic algorithm, production technological lines.

**Попов Вячеслав Алексеевич** – канд. техн. наук, проф., проф. каф. информационных управляющих систем, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», Харьков.

**Белоконь Юлия Анатольевна** – канд. техн. наук, асс. каф. информационных управляющих систем, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», Харьков.

**Крупейченко Яна Владимировна** – магистрант каф. информационных управляющих систем, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», Харьков.

**Дурнев Сергей Александрович** – магистрант каф. информационных управляющих систем, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», Харьков.