

## УПРАВЛЕНИЕ В СОЦИАЛЬНЫХ И ЭКОНОМИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

УДК 519.876.5:658.5

*В. И. Аверченков<sup>1</sup>, А. И. Якимов<sup>2</sup>, Е. М. Борчик<sup>3</sup>*

### МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ ПРОЦЕССОМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРИНЦИПА ОПТИМАЛЬНОСТИ БЕЛЛМАНА\*

<sup>1</sup>ФГБОУ ВПО Брянский государственный технический университет

<sup>2</sup>ГУ ВПО Белорусско-Российский университет, Могилев, Беларусь

<sup>3</sup>ОАО «Моготекс», Могилев, Беларусь

kts@tu-bryansk.ru, ykm@tut.by, katrinb15@gmail.com

Решена задача многокритериального управления технологическим процессом (ТП) производства готовой ткани путем выбора оптимальных технологических режимов в соответствии с принципом оптимальности Беллмана. Обоснованность оптимального решения показана для одно- и двумерных характеристик потока на дугах ориентированного ациклического графа ТП. Проведено экспериментальное исследование на примере данных реального ТП.

*Ключевые слова:* технологический процесс, имитационная модель, многокритериальное управление, принцип оптимальности Беллмана.

*V. I. Averchenkov<sup>1</sup>, A. I. Yakimov<sup>2</sup>, E. M. Borchik<sup>3</sup>*

### MULTICRITERIA PROCESS CONTROL USING THE PRINCIPLE OF OPTIMALITY BELLMAN

<sup>1</sup>Bryansk State Technical University

<sup>2</sup>Belarusian-Russian University, Mogilev, Belarus

<sup>3</sup>«Mogotex», Mogilev, Belarus

The problem of multicriteria control of technological process by selecting the optimum technological conditions in accordance with the principle of optimality Bellman is solved. The validity of the optimal solution for single- and two-dimensional characteristics of the flow on the arcs of a directed acyclic graph of the technological process is proved. An experimental study on the real data of the technological process is showed.

*Keywords:* technological process, simulation model, multicriteria control, Bellman's optimality principle

#### Введение

В работе рассматривается предприятие легкой промышленности, производящее ткани и трикотажные полотна. Ткань, изготовленная на ткацком производстве (из пряжи) с помощью специального приготовительного и ткацкого оборудования и прошедшая стадию браковки, называется суровой тканью. До поступления к потребителю ткани подвергаются предварительной обработке, крашению или печатанию, различным видам заключительной отделки. Суровая ткань, прошедшая все стадии отделки в отделочном производстве (отварка, отбелка, покраска, нанесение рисунка, виды заключительных отделок) и браковки, называется готовой тканью.

Технологические режимы (ТР) – документы, регламентирующие отдельные операции процесса производства готовой продукции. Каждый ТР описывает процесс обработки определенного вида ткани на соответствующем технологическом оборудовании. Технологическая документация каждого ТР включает: допустимые (для определенного вида ткани) диапазоны скорости работы оборудования; параметры температурных и других настроек каждой из частей оборудования; применяемые химикаты и красители, их концентрации; длительности периодов работы оборудования до сливов и полной замены химического раствора в соответствующих частях оборудования и др. [1].

При этом имеет место неоднозначный выбор технологических режимов в процессе производства готовой продукции, в связи с чем ставится задача определения оптимальных ТР

\* Работа выполнена при финансовой поддержке ГПНИ по заданию «Информатика 1.3.02».



в соответствии с заданными критериями оптимизации (в разрезе стоимости ресурсов и/или временных затрат, необходимых для выпуска заданного количества продукции).

**Постановка задачи**

Пусть технологический процесс (ТП) производства готовой продукции (тканей)  $TexPr$  состоит из  $n$  фиксированных технологических операций, или этапов:

$$TexPr \equiv \{Op_i / i = 1, \dots, n\}. \quad (1)$$

Операции  $Op_i, i = 1, \dots, n$ , выполняются последовательно.

Пусть каждая из технологических операций  $Op_i$  допускает выбор одного из  $M_i \in N$  допустимых технологических режимов (ТР)  $TR_{R(i,k)}$

на одном из допустимых видов соответствующего технологического оборудования (рис. 1):

$$Op_i \equiv \{TR_{R(i,k)} / k = 1, \dots, M_i\}, i = 1, \dots, n, \quad (2)$$

$$R(i,k) \equiv (i, \xi_{ik}, k),$$

где  $R(i,k)$  в (2) – вектор-идентификатор номера технологического режима, включающий порядковый номер технологической операции  $Op_i: i, i \in \{1, \dots, n\}$ ; код соответствующего оборудования из справочника оборудования:  $\xi_{ik}, \xi_{ik} \in \{1, \dots, |\xi|\}$ ; порядковый номер технологического режима в пределах нумерации режимов операции  $Op_i: k, k \in \{1, \dots, M_i\}$ .

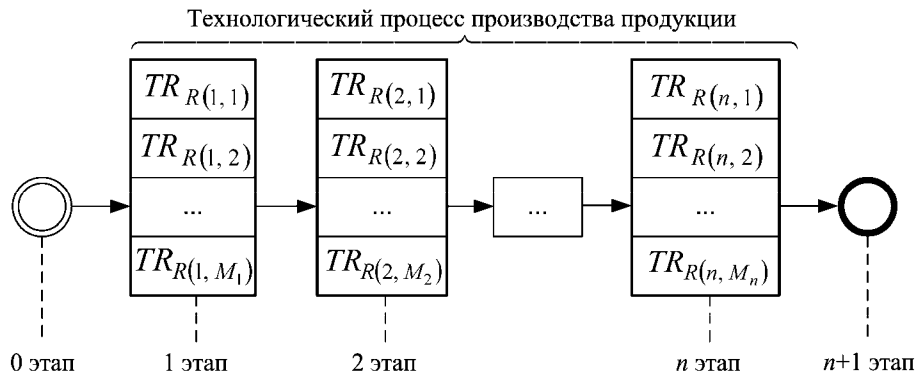


Рис. 1. Последовательность технологических операций

Себестоимости отдельных ТР складываются из стоимостей используемых ресурсов. Время, затрачиваемое на обработку продукции в рамках отдельных ТР зависит в частности от особенностей оборудования, тканей, параметров ТР и др.

Пусть  $Res, Cen$  – множества ресурсов и цен на соответствующие ресурсы:

$$Res \equiv \{Res_r / r = 1, \dots, |Res|\}, \quad (3)$$

$$Cen \equiv \{Cen_r / Cen_r \in R, r = 1, \dots, |Res|\}. \quad (4)$$

Технологический процесс производства готовой продукции (1) может быть представлен в виде нагруженного ориентированного ациклического графа [2], вершинами которого являются ТР (2). Для интерпретации в виде графа

ТП (1) разделяется на  $n$  однотипных этапов, или операций. Исток графа представляет собой нулевой этап ТП (1). Нумерация вершин производится последовательно от истока (0°этап) до стока ( $n + 1$ °этап). Вершины соединяются дугами в соответствии с последовательностью операций (см. рис. 1).

Обозначим через  $\tau_{uv}$  нагрузку на дугу графа (рис. 2), исходящую из вершины с номером  $u \in M_B(i - 1)$  и входящую в вершину с номером  $v \in M_B(i)$ , где  $M_B(i)$  – множество номеров вершин для  $i$ -го этапа графа ТП (1):

$$M_B(i) \equiv \left\{ \sum_{j=0}^{i-1} M_j + 1, \dots, \sum_{j=0}^i M_j \right\}, \quad i = 1, \dots, n. \quad (5)$$



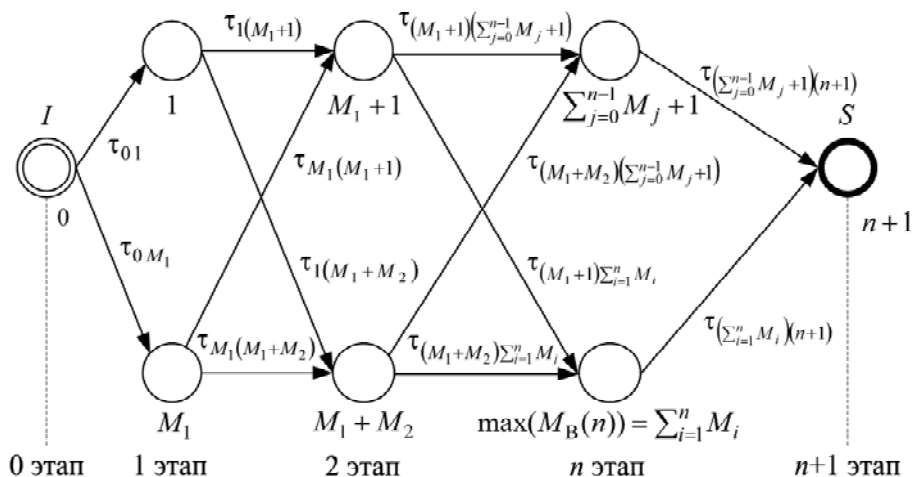


Рис. 2. Нагрузки на дуги ориентированного графа

Пусть нагрузки  $\tau_{uv}$  (в общем случае стохастического характера, уточняемые методом Монте-Карло с использованием специально разработанных моделей их имитации и статистического анализа данных ТП) интерпретируются как временные затраты и/или стоимости затрат ресурсов на выпуск заданного количества ткани – 1000 метров погонных (м.п.) на соответствующем оборудовании в соответствии с  $TR_{R(u,v)}$  (2) ТП (1).

**Решение задачи многокритериального управления технологическим процессом**

В общем случае одним из методов решения задачи определения оптимальных ТР (2) для ТП (1) является метод динамического программирования: метод нахождения последовательных оптимальных решений в задачах с многошаговой (многоэтапной) структурой [3].

Рассматриваемый технологический процесс (ТП) производства готовой продукции (ткани) является управляемой системой, находящейся в одном из нескольких состояний, изменяемых на каждом этапе ТП в результате управляющего воздействия (управления). При этом эффективность процесса управления характеризуется многомерной целевой функцией (ЦФ), зависящей от состояния системы и применяемого управления.

Принцип оптимальности Беллмана утверждает, что на последовательности оптимальных управлений  $y_1^*, y_2^*, \dots, y_i^*, i = 1, \dots, n$ , должна достигать  $\max(\min)$  и каждая из функций:

$$f_i(\tau_{i-1}, y_i, y_{i+1}, \dots, y_n) = h_i(\tau_{i-1}, y_i) + h_{i+1}(\tau_i, y_{i+1}) + \dots + h_n(\tau_{n-1}, y_n), i = 1, \dots, n. \quad (6)$$

Введем следующее обозначение:

$$\varphi_i(\tau_{i-1}) \stackrel{def}{=} \max_{y_i, y_{i+1}, \dots, y_n}(\min)(f_i(\tau_{i-1}, y_i, y_{i+1}, \dots, y_n)), i = 1, \dots, n \quad (7)$$

Тогда из (6) и (7) следуют функциональные уравнения, называемые функциональными уравнениями Беллмана:

$$\varphi_i(\tau_{i-1}) = \max_{y_i}(\min)(\varphi_{i+1}(g_i(\tau_{i-1}, y_i)) + h_i(\tau_{i-1}, y_i)), i = 1, \dots, n. \quad (8)$$

Решение уравнений Беллмана позволяет найти последовательность оптимальных управлений и оптимальных значений ЦФ.

С учетом обозначений нагрузок на дуги графа  $\tau_{uv}$ , функциональное уравнение (8) принимает вид:

$$\tau_v = \min_u(\max)\{\tau_u + \tau_{uv}\}, \tau_0 = 0, \quad (9)$$

где  $u \in M_B(i-1)$  – номера вершин из которых исходят дуги графа (i-1)-го этапа ТП;  $v \in M_B(i)$  – номера вершин в которые входят дуги графа i-го этапа ТП;  $M_B(i)$  – множество номеров вершин вида (5) для i-го этапа ТП.

Нагруженные дуги, исходящие из одних и тех же вершин, эквивалентны в силу интерпретации их характеристик: временных и/или стоимостных затрат на выпуск заданного количества продукции для одного и того же ТП (1), поэтому имеют место следующие соотношения.

**Соотношение 1.** Пусть  $\tau_{uv} \in R$ , тогда для ТП (1) верны равенства вида:

$$\forall u \in M_B(i-1) \forall v_1, v_2 \in M_B(i) [\tau_{uv_1} = \tau_{uv_2}], i = 1, \dots, n \quad (10)$$



**Соотношение 2.** Пусть  $\tau_{uv} = (\tau_{uv}^{(1)}, \tau_{uv}^{(2)}) \in R^2$ ,  $\tau_{uv_1} = (\tau_{uv_1}^{(1)}, \tau_{uv_1}^{(2)})$ ,  $\tau_{uv_2} = (\tau_{uv_2}^{(1)}, \tau_{uv_2}^{(2)})$ , тогда для ТП (1) верны равенства вида:

$$\forall u \in M_B(i-1) \forall v_1, v_2 \in M_B(i) [(\tau_{uv_1}^{(1)} = \tau_{uv_2}^{(1)}) \wedge (\tau_{uv_1}^{(2)} = \tau_{uv_2}^{(2)}) \Leftrightarrow (\tau_{uv_1} = \tau_{uv_2})], i=1, \dots, n \quad (11)$$

**Утверждение 1.** Пусть для  $\tau_{uv} \in R$ , имеют место соотношения вида (10), тогда для рассматриваемой задачи функциональное уравнение Беллмана (9) принимает вид:

$$\tau_v = L_i = L_{i-1} + \min_{u \in M_B(i-1)} (\max) \{\tau_{uv}\}, \quad (12)$$

где  $L_i$  – оптимальное состояние на  $i$ -м этапе,  $L_i \in R$ ,  $L_0 = \tau_0 = 0$ ,  $u \in M_B(i-1)$ ,  $v \in M_B(i)$ ,  $i=1, \dots, n$ .

Доказательство проводится методом математической индукции.

**Утверждение 2.** Пусть для  $\tau_{uv} = (\tau_{uv}^{(1)}, \tau_{uv}^{(2)}) \in R^2$  имеют место соотношения вида (11), тогда для рассматриваемой задачи из уравнения Беллмана (9) следует [4]:

$$L_i = \begin{cases} \left( \begin{array}{l} L_{(i-1)1} + Fm_1 \left( \{\tau_{uv}^{(1)}\} \right) \\ L_{(i-1)2} + Fm_2 \left\{ \tau_{u_i v}^{(2)} \mid \tau_{u_i v}^{(1)} = Fm_1 \left( \{\tau_{uv}^{(1)}\} \right) \right\} \end{array} \right) \Bigg|_{pOpt=1}, \\ \left( \begin{array}{l} L_{(i-1)1} + Fm_1 \left\{ \tau_{u_i v}^{(1)} \mid \tau_{u_i v}^{(2)} = Fm_2 \left( \{\tau_{uv}^{(2)}\} \right) \right\} \\ L_{(i-1)2} + Fm_2 \left( \{\tau_{uv}^{(2)}\} \right) \end{array} \right) \Bigg|_{pOpt=2}; \end{cases} \quad (13)$$

где  $L_i = (L_{i1} \quad L_{i2})^T$ ,  $L_0 = (0 \quad 0)^T$ ,  $u \in M_B(i-1)$ ,

$v \in M_B(i)$ ,  $i=1, \dots, n$ ;  $pOpt \in \{1, 2\}$  – параметр наивысшего приоритета критериев оптимизации ТП (1) по 1-му (времени), либо 2-му (стоимости ресурсов) измерениям векторов  $\tau_{uv} \in R^2$ ;  $Fm_1, Fm_2 \in \{\min, \max\}$  – лексикографически упорядоченные параметром  $pOpt$  критерии оптимизации ТП по 1-му, 2-му измерениям векторов состояний системы на этапах ТП, соответственно.

**Замечание.** Доказательство Утверждения 2 проводится с использованием метода математической индукции с учетом значений измерений векторов  $\tau_{uv}^{(pOpt)} \in R$ . При этом оптимизация ТП (1) методом динамического программирования (в указанной многокритериальной задаче выбора предпочитаемых ТР рассматриваемого ТП) в первую очередь проводится по наиболее важному критерию (измерению  $pOpt \in \{1, 2\}$  векторов  $\tau_{uv}^{(pOpt)} \in R$ ). В случае совпадения оптимальных по наиболее важному критерию значений для нескольких ТР рассматриваемого оптими-

зируемого этапа ТП, проводится оптимизация по другому – менее значимому из измерений векторов  $\tau_{uv}^{(pOpt)} \in R$ , по которому и выбираются предпочитаемые ТР (2) ТП (1).

Утверждения 1–2 с учетом значений управляющих параметров составляют основу процедуры пошаговой оптимизации ТП (1).

#### Процедура пошаговой оптимизации технологического процесса

Для выбора оптимальных ТР в системе имитации PowerSim [5] построена имитационная модель (ИМ) расчета норм расхода времени и ресурсов (химикаты, пар, газ, электроэнергия) на выпуск 1000 м.п. тканей в разрезе отдельных технологических режимов. Каждая стадия процесса производства готовых тканей представлена на отдельном листе построенной ИМ. Определение оптимального сочетания ТР для исследуемой проводки производится на специально созданном листе итогов модели [5].

Построенная в PowerSim модель удобна для применения тем, что в ней можно быстро переисчислять разные варианты для режимов оборудования с использованием разных ресурсов (химикаты, пар, газ, электроэнергия). При этом

можно выбирать критерий оптимизации (min, max) и отслеживать промежуточные значения временных и стоимостных затрат ресурсов на каждой стадии производства готовой продукции.

При использовании ИМ пошаговая оптимизация технологического процесса следующая.

**Шаг 1.** Инициализация значений входных параметров ИМ.

**Шаг 2.** Определение для каждой технологической операции  $Op_i$  ТП (1) норм расхода времени  $T_i$ ,  $i=1, \dots, n$ , затрачиваемого на обработку заданного количества продукции.

**Шаг 3.** Определение для каждой операции  $Op_i$ ,  $i=1, \dots, n$ , ТП (1) норм расхода отдельных ресурсов  $Res_r$ ,  $r=1, \dots, |Res|$ , израсходованных на обработку заданного количества продукции в (1).

**Шаг 4.** Определение для каждой операции  $Op_i$  ТП (1) общих стоимостей расхода ресурсов, необходимых для обработки заданного количества продукции.

**Шаг 5.** Подведение итогов моделирования; оптимизация ТП:

**Шаг 5.1.** Построение последовательности оптимальных состояний ТП на этапах производства готовой продукции:

$$L_i \stackrel{def}{=} \varphi_i(L_{i-1}, S_i, T_i, Params_i), L_i, L_{i-1} \in \{R, R^2\},$$

$$L_0 \in \{0, (0 \ 0)^T\}, i=1, \dots, n, \quad (14)$$

где  $L_i, L_{i-1} \in R$  – суммарный итог по отношению к оптимизируемому ресурсу (времени, стоимости ресурсов) для  $i$ ,  $i \in 1, \dots, N$ , этапов ТП (1); если  $L_i, L_{i-1} \in R^2$ ,  $L_i = (L_{i1} \ L_{i2})^T$ , то  $L_{i1}$  – оптимальное состояние по времени,  $L_{i2}$  – оптимальное состояние по стоимости ресурсов на  $i$ -м этапе ТП (1);  $\varphi_i$  – многомерные (одно-, двумерные) оптимизируемые многокритериальные целевые функции (относительно времени и/или стоимости ресурсов),  $Params_i$  – параметры управления ТП (1) производства готовой продукции, в частности параметр  $pOpt \stackrel{def}{\in} \{1, 2\}$  и  $Fm_1, Fm_2 \in \{\min, \max\}$ .

**Шаг 5.2.** Для построения последовательности оптимальных управлений (выбора оптимальных ТР для ТП, либо оптимального маршрута по графу) технологическим процессом производства готовой продукции предприятия

определяются последовательности предикатов вида:

$$Fl \stackrel{def}{=} \{fl_{ij} \mid fl_{ij} \in \{True, False\}, i=1, \dots, n, j=1, \dots, M_i\}, \quad (15)$$

практическое применение которых представлено в экспериментальной части.

**Шаг 5.3.** Определение с учетом шагов 3, 5.2 общего расхода отдельных ресурсов  $Res_r$ ,  $r=1, \dots, |Res|$  для оптимального сочетания ТР ТП (1).

**Шаг 6.** Выгрузка результатов работы ИМ в комплексную информационную систему (КИС) предприятия (рис. 3).

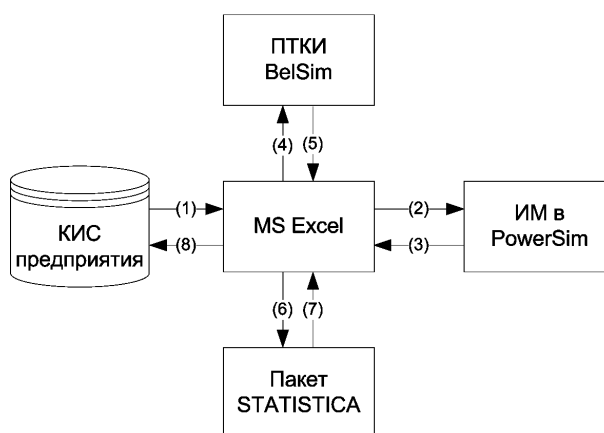


Рис. 3. Интеграция имитационной модели в КИС предприятия

Разработанная имитационная модель интегрируется в КИС предприятия посредством применения комплекса программных средств (см. рис. 3), включающих MS Excel, систему имитации PowerSim, программно-технологический комплекс имитации (ПТКИ) сложных систем BelSim [6], имеющий средства статистической обработки данных, пакет STATISTICA.

Предлагается следующий алгоритм работы построенного комплекса:

**Шаг 1.** Выгрузка необходимых данных из КИС предприятия в MS Excel.

**Шаг 2.** Инициализация переменных ИМ в PowerSim; запуск эксперимента.

**Шаг 3.** Выгрузка результатов моделирования из PowerSim в MS Excel.

**Шаги 4, 6.** Передача данных для анализа из MS Excel в BelSim, либо в пакет STATISTICA.

**Шаги 5, 7.** Выгрузка результатов анализа данных в MS Excel.

**Шаг 8.** Сохранение полученных результатов в КИС предприятия.





Некоторые шаги предложенного алгоритма могут пропускаться. Например, возможен упрощенный вариант работы комплекса без использования анализа данных в ПТКИ BelSim, включающий шаги (1)-(2)-(3)-(8).

### Экспериментальная часть

Рассматривается выбранный для исследования ТП производства набивной ткани для кожгалантерейной промышленности (рис. 4).

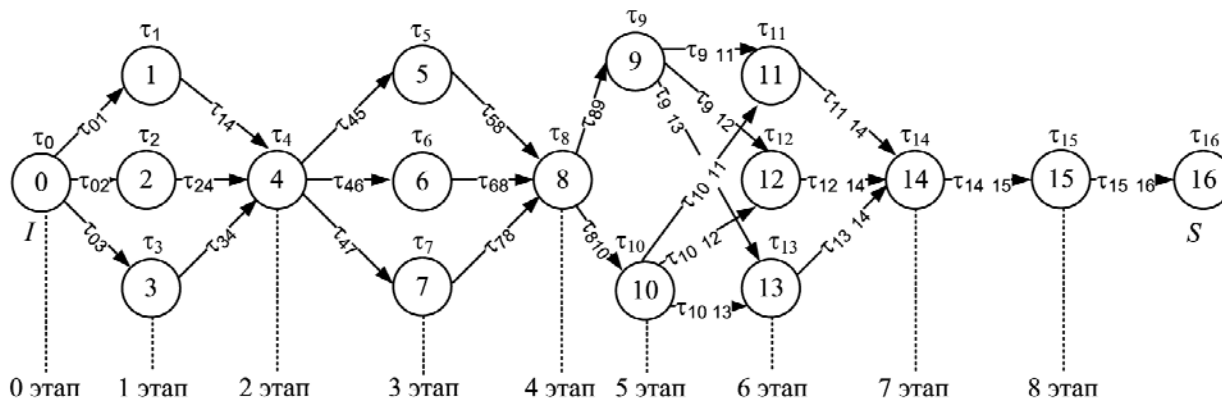


Рис. 4. Ориентированный граф с технологическими режимами

Процесс производства *TexPr* (1) выбранного артикула ткани состоит из  $N = 8$  технологических операций  $Op_i$ ,  $i = 1, \dots, 8$ :  $Op_1$  – отварка;  $Op_2$  – стабилизация;  $Op_3$  – печать на ткани;  $Op_4$  – зреление;  $Op_5$  – промывка;  $Op_6$  – вид отделки «стабилизация»;  $Op_7$  – вид отделки «придание наполненного гифа»;  $Op_8$  – браковка ткани.

При этом каждая из технологических операций допускает выбор одного из следующего количества допустимых технологических режимов – 1 этап:  $M_1 = 3$ ; 2 этап:  $M_2 = 1$ ; 3 этап:  $M_3 = 3$ ; 4 этап:  $M_4 = 1$ ; 5 этап:  $M_5 = 2$ ; 6 этап:  $M_6 = 3$ ; 7 этап:  $M_7 = 1$ ; 8 этап:  $M_8 = 1$ .

Пусть определен (известен и достоверен) расход времени для каждого из ТР ТП. Ниже представлено время  $T_i$  (час.),  $i = 1, \dots, 8$ , необходимое для обработки 1000 м.п. ткани на этапах ТП (1): 1 этап:  $T_1 = (0,52; 0,52; 0,52)$ ; 2 этап:  $T_2 = (0,6)$ ; 3 этап:  $T_3 = (1,01; 1,40; 1,26)$ ; 4 этап:  $T_4 = (0,87)$ ; 5 этап:  $T_5 = (1,07; 1,01)$ ; 6 этап:  $T_6 = (0,86; 0,86; 0,43)$ ; 7 этап:  $T_7 = (1,90)$ ; 8 этап:  $T_8 = (1,28)$ .

Пусть определены (известны и достоверны) стоимости ресурсов  $S_i$  (руб.),  $i = 1, \dots, 8$ , (в ценах 2012-го года) для обработки 1000 м.п. тка-

ни на соответствующих стадиях ТП: 1 этап:  $S_1 = (149913,95; 154348,75; 148572,68)$ ; 2 этап:  $S_2 = (593499,34)$ ; 3 этап:  $S_3 = (987782,50; 959879,82; 942975,85)$ ; 4 этап:  $S_4 = (243148,13)$ ; 5 этап:  $S_5 = (557763,48; 522017,79)$ ; 6 этап:  $S_6 = (858455,08; 854431,31; 228772,21)$ ; 7 этап:  $S_7 = (1653922,81)$ ; 8 этап:  $S_8 = (1348,71)$ .

Соответственно, с учетом  $T_i = (t_{i1}, \dots, t_{im_i})$ ,  $S_i = (s_{i1}, \dots, s_{im_i})$ ,  $i = 1, \dots, 8$ , нагрузки на дуги графа  $\tau_{ij} \in R^2$  принимают значения:

$$\begin{aligned} \tau_{01} = \tau_{02} = \tau_{03} &= (0,0); \tau_{14} = (t_{11}, s_{11}), \\ \tau_{24} &= (t_{12}, s_{12}), \tau_{34} = (t_{13}, s_{13}); \\ \tau_{45} = \tau_{46} = \tau_{47} &= (t_{21}, s_{21}); \tau_{58} = (t_{31}, s_{31}), \\ \tau_{68} &= (t_{32}, s_{32}), \tau_{78} = (t_{33}, s_{33}); \tau_{89} = \tau_{810} = (t_{41}, s_{41}); \\ \tau_{911} = \tau_{912} = \tau_{913} &= (t_{51}, s_{51}), \\ \tau_{1011} = \tau_{1012} = \tau_{1013} &= (t_{52}, s_{52}); \tau_{1114} = (t_{61}, s_{61}), \\ \tau_{1214} &= (t_{62}, s_{62}), \tau_{1314} = (t_{63}, s_{63}); \tau_{1415} = (t_{71}, s_{71}), \\ \tau_{1516} &= (t_{81}, s_{81}). \end{aligned}$$

Определение оптимальных ТР ТП (1) производится согласно принципу поэтапной оптимизации Беллмана. При этом строится последовательность двумерных векторов вида:

$$\begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix} \longrightarrow \begin{pmatrix} L\_1[1] \\ L\_1[2] \end{pmatrix} \longrightarrow \begin{pmatrix} L\_2[1] \\ L\_2[2] \end{pmatrix} \longrightarrow \dots \longrightarrow \begin{pmatrix} L\_8[1] \\ L\_8[2] \end{pmatrix},$$

где  $L\_8[1]$ ,  $L\_8[2]$  – итоговое оптимальное время выполнения этапов ТП и стоимость расхода ресурсов, соответственно.



С помощью переменных-предикатов определяются оптимальные, в соответствии с заданными критериями оптимизации, ТР для ТП (1) – оптимальный маршрут по графу от истока к стоку.

$$\begin{pmatrix} fl_{11} \\ fl_{12} \\ fl_{13} \end{pmatrix} \rightarrow (fl_{21}) \rightarrow \begin{pmatrix} fl_{31} \\ fl_{32} \\ fl_{33} \end{pmatrix} \rightarrow (fl_{41}) \rightarrow \begin{pmatrix} fl_{51} \\ fl_{52} \end{pmatrix} \rightarrow \begin{pmatrix} fl_{61} \\ fl_{62} \\ fl_{63} \end{pmatrix} \rightarrow (fl_{71}) \rightarrow (fl_{81})$$

При этом функция-предикат  $Fl\_1$  применяется для ТР этапов 1, 3, 5, 6. при расчете значений предикатов  $fl_{11}, \dots, fl_{13}$  и т. д. Исключения составляют ТР этапа 2 ( $fl_{21} = True$ ), этапа 4 ( $fl_{41} = True$ ), этапа 7 ( $fl_{71} = True$ ), этапа 8 ( $fl_{81} = True$ ).

#### Заключение

В результате проведенного исследования получены следующие оптимальные ТР выбранного ТП (в ценах 2012-го года):

1) с минимальной суммарной стоимостью затрат ресурсов и времени ( $pOpt = 2$  – оптимизация в первую очередь по стоимости ресурсов (2-я координата), во вторую – по времени;  $Fm_1, Fm_2 = \min$ ):  $L_{\min}^* = L\_8 = (6,87; 4334260)$ , где время составило 6,87 час., стоимость ресурсов 4334260 руб.; маршрут по графу  $\langle 0-3-4-7-8-10-13-14-15 \rangle$ ;

2) с минимальными временными затратами и минимальными затратами ресурсов ( $pOpt = 1$  – оптимизация в первую очередь по времени (1-я координата), во вторую – по стоимости ресурсов;  $Fm_1, Fm_2 = \min$ ):  $L_{\min}^* = L\_8 = (6,62; 4379060)$ , где время составило 6,62 час., стоимость ресурсов 4379060 руб.; маршрут по графу  $\langle 0-3-4-5-8-10-13-14-15 \rangle$ .

При этом известно, что для реально применяемых технологических режимов исследуемого ТП, маршрут по графу  $\langle 0-1-4-6-8-9-11-14-15 \rangle$  и имеют место следующие пока-

затели:  $L_{real} = (7,51; 5017930)$ , где время составляет 7,51 час., стоимость ресурсов – 5017930 руб.

Таким образом, для реального ТП исследование показало: при производстве заданного количества ткани (1000 м.п.) итоговая лучшая разница по стоимости расхода ресурсов составляет 684 тыс. руб.; разница по времени – порядка 50 мин (0,89 часа).

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Отделка хлопчатобумажных тканей : справочник / Н. В. Егоров [и др.] : В 2 ч. – М.: Легпромбытиздат, 1991. – Ч. 1. – 432 с.
2. Новиков, Ф. А. Дискретная математика для программистов : учебник. – 2-е изд. – СПб.: Питер, 2007. – 368 с.
3. Черноуцкой, И. Г. Методы принятия решений: учебник. – СПб.: БХВ-Петербург, 2005. – 416 с.
4. Борчик, Е. М. Метод управления процессом производства продукции на основании принципа оптимальности Беллмана / Е. М. Борчик, А. И. Якимов // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии: материалы междунар. науч.-техн. конф. : В 2 ч.; редкол. : И. С. Сазонов (гл. ред.) [и др.]; Могилев, 18–19 апреля 2013 г. – Могилев : Белорус.-Рос. ун-т, 2013. – Ч. 1. – С. 193–194.
5. Доронькин, А. В. Автоматизация расчета затрат энергоресурсов в производстве тканей ОАО «Моготекс» / А. В. Доронькин, Е. М. Борчик, А. И. Якимов // Студенческий вестник, октябрь, 2012. – № 8. [Электрон. ресурс] – Режим доступа: <http://www.bru.mogilev.by/science/vesnik/Papers2012/04.pdf> - Дата доступа 21.10.2012.
6. Якимов, А. И. Технология имитационного моделирования систем управления промышленных предприятий : монография / А. И. Якимов. – Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2010. – 304 с.: ил.

