

УДК 519.2:658.012

Е. В. БАБКОВА

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАГРУЗКИ РАСКРОЙНОГО ОБОРУДОВАНИЯ В ЗАДАЧЕ ОПЕРАТИВНО-КАЛЕНДАРНОГО ПЛАНИРОВАНИЯ ЗАГОТОВИТЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА

Рассматривается задача оперативной загрузки гильотинного раскройного оборудования для участков механической обработки с неявно заданной технологической последовательностью обработки заготовок. Приводится алгоритм решения этой задачи, а также рассматриваются модификации алгоритма, основанные на использовании процедур моделирования. *Гильотинный раскрой; прямоугольный раскрой; моделирование; метод Монте-Карло*

### ВВЕДЕНИЕ

Одним из важных требований к современным системам оперативно-календарного планирования (ОКП) в составе подготовки производства является как уменьшение отходов производства, так и минимизация числа заготовок, идущих на склад. Сложность подсистем ОКП в заготовительном производстве обусловлена наличием этапа объемно-календарного планирования, на котором производятся расчеты с целью формирования карт раскроя материалов различного вида. При этом используются пакеты прикладных программ, ориентированные на оптимизационные методы, обеспечивающие получение банка карт раскроя (БКР) с максимальным коэффициентом использования материала. Полученные банки карт раскроя используются, как правило, только для выполнения заказов на материал и практически не применяются в оперативном планировании. Это обусловлено отсутствием эффективных алгоритмов выделения подмножеств карт раскроя из БКР на текущую обработку. В статье рассматривается задача и алгоритмы формирования оперативных списков карт раскроя для выполнения резки для случая гильотинного прямоугольного раскроя. Приводятся алгоритмы решения этой задачи, исключающие полный перебор БКР, в эвристическом варианте и с процедурами моделирования, использующими метод Монте-Карло для генерации оперативного списка карт раскроя [3, 4].

### 1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ЗАГРУЗКИ РАСКРОЙНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Имеется  $m$  видов заготовок  $Z_1, Z_2, \dots, Z_m$ , которые необходимо выпустить из цеха не позднее календарных сроков  $t_1^B, t_2^B, \dots, t_m^B$ . Для каждой заготовки известно подмножество  $\{r_j^i\}$  карт раскроя из БКР, в которых получают соответствующие заготовки. Для каждой заготовки задается следующая информация: размеры заготовки; время запуска заготовки  $Z_i$  в обработку, определяемое из соответствующей подсистемы АСУ; моменты времени  $B_{ij}$  окончания выполнения резов по карте раскроя  $r_j$ , содержащей заготовку  $Z_i$ ; технологические параметры заготовок (сортамент материала и другие); информация для оформления выходных форм (толщина, удельный вес, марка материала).

Для каждой карты раскроя в БКР задается следующая информация: 1) список и комплектность заготовок, получаемых по карте раскроя; 2) время  $t_j^P$  проведения резов по карте раскроя  $r_j$ , содержащей множество заготовок  $\{Z_i\}$ .

Раскрой выполняется на оборудовании  $S_1, S_2, \dots, S_q, \dots, S_Q$ . Каждая единица оборудования описывается следующими параметрами:  $N_q$  — технологический номер оборудования  $S_q$ ;  $\lambda_q$  и  $f_q$  — коэффициенты сменности и выполнения норм на оборудовании  $S_q$  соответственно;  $O_{qj}$  — момент времени освобождения оборудования  $S_q$  от выполнения резов по текущей карте раскроя.

Необходимо решить следующую задачу.

**Задача.** Составить оперативный календарный график выполнения работ по картам раскроя, который был бы оптимальным по заданному критерию на отрезке  $[t_1, t_2]$  (на календарную дату  $T$ ). Под графиком понимается список карт раскроя с указанием календарной даты (день, смена, час) начала и окончания выполнения резов по этой карте раскроя. В качестве критериев оптимальности используются следующие:

#### 1) минимальные отходы материала

$$F_1 = \min_{\{r^{I_1}\}} \sum_{i=1}^{I_1} s_i^r,$$

где  $I_1 \cup I_2 = I$  — множество номеров заготовок из списка  $\{Z^T\}$ , причем  $I_1$  — подмножество номеров заготовок, которые будут получены после резки;  $\{r^{I_1}\}$  — подмножество карт раскроя, в котором получают заготовки с номерами  $i \in I_1$ ;  $s_i^r$  — площадь материала, идущего в отходы для  $i$ -й заготовки, получаемой в  $r$ -й карте раскроя;

#### 2) минимальная площадь заготовок, идущих на склад,

$$F_2 = \min_{i \in I_2} \sum_{i=1}^{I_2} w_i,$$

где  $w_i$  — площадь  $i$ -й заготовки;  $I_2$  — подмножество номеров заготовок, которые идут на склад;

#### 3) максимальная площадь используемых заготовок

$$F_3 = \max_{i \in I_1} \sum_{i=1}^{I_1} w_i;$$

#### 4) минимизация времени выпуска заготовок из цеха

$$F_4 = \min_{k \in K} \max_{i \in I_1} \sum_{i=1}^{I_1} O_i^k,$$

где  $O_i^k$  — время окончания резки  $i$ -й заготовки в  $k$ -й последовательности списков карт раскроя,  $k = 1, 2, \dots, K$ .

### 2. АЛГОРИТМ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОПЕРАТИВНОГО СПИСКА КАРТ РАСКРОЯ

Особенность алгоритма состоит в использовании функций предпочтения, зависящих от времени проведения резов и плановых сроков выпуска заготовок из цеха [1, 5]. Опуская классические операции ввода и вывода информации, отметим основные этапы эвристического алгоритма:

1) определение подмножества заготовок  $\{Z^T\}$ , которые необходимо выпустить не позднее текущей календарной даты  $T$ : множество заготовок  $\{Z^T\}$  упорядочивается так, что срок запуска  $Z_p$  не больше срока запуска заготовки  $Z_i$  при  $p \geq i$ ;

2) определение упорядоченного подмножества карт раскроя  $\{r^T\}$  из БКР на обработку. В список  $\{r^T\}$  включаются все карты раскроя указанной сложности, содержащие  $\{Z^T\}$  («сложность раскроя» — это количество заготовок в карте раскроя);

3) выбор карты раскроя для выполнения резки: из списка  $\{r^T\}$  для заготовки  $Z_l$  формируется подмножество  $\{r_l^T\}$ , содержащее эту заготовку. Выбирается та карта раскроя, которая обеспечивает лучшее значение по соответствующему критерию. После оформления графика резки в виде сменного задания он передается для выполнения.

Моделирование используется для выполнения этапа выбора карты раскроя, причем доминирующим признаком выбора является минимизация отклонений по площади получаемых в карте раскроя заготовок.

### 3. ПРОЦЕДУРА МОДЕЛИРОВАНИЯ ВЫБОРА КАРТ РАСКРОЯ

После выделения подмножества карт раскроя  $\{r^Z\}$ , содержащих заготовку  $Z$ , представим этот список в виде  $\{r_k\}$ , для которого каждая карта раскроя характеризуется площадью карты раскроя  $W_1, W_2, \dots, W_k, \dots, W_K$  и площадью, занимаемой заготовкой  $Z$  в каждой карте раскроя  $w_1, w_2, \dots, w_K$ . Далее реализуем процедуру выбора карты раскроя, используя идею случайного выбора карты раскроя. Определим  $\Delta W_{k^*} = \min_{k \in K} (W_k - w_k) = \min_{k \in K} (\Delta W_k)$ ,

где  $K$  — количество карт раскроя, содержащих заготовку  $Z$ ;  $k$  — текущий номер карты раскроя. Определим для каждого  $k \in K$  следующие величины:

$$\bar{\Delta}_k = \Delta W_k - \Delta W_{k^*}, \quad \bar{\Omega} = \sum_{k \in K} \bar{\Delta}_k.$$

Метод Монте-Карло применяется для выбора номера  $k \in K$  карты раскроя  $r_k \in \{r^Z\}$ . Процедура выбора карты раскроя организуется следующим образом: по формуле определяем  $r_{k^*}, \bar{\Omega}, \bar{K}$ . Генерируем псевдослучайное число  $\xi^*$ , равномерно распределенное на  $[0, 1]$ . Вычисляем  $[0, (\bar{K} - 1)\bar{\Omega}]$ . При вторичном просмотре множества  $\{r^Z\}$  определим интервал попадания точки  $\xi^{**}$ :  $y_{\mu-1} \leq \xi^{**} \leq y_{\mu}, \mu = 1, \dots, \bar{K}$ .

Выберем соответствующую этому интервалу карту раскроя  $r_{\mu}$  для выполнения процесса резки.

Для исследования свойств алгоритма моделирования введем некоторые определения.

**Определение 1.** Карта раскроя называется устойчивой, если при любом случайном опыте она всегда попадает в список карт на обработку.

Под случайным опытом подразумевается вычислительный эксперимент по генерации номеров карт раскроя для всего множества заготовок на календарном отрезке времени  $[t_1, t_2]$ . В результате реализации случайного опыта получаем одну последовательность карт раскроя на резку с указанием интенсивности резки («интенсивности резки по карте  $l$ » — количество листов данного типоразмера, раскраиваемых по  $l$ -й карте раскроя) для заготовок  $Z^{[t_1, t_2]}$ . Например, для полученных трех последовательностей карт раскроя  $P_1 = \{r_1, r_2, r_3, r_8\}$ ,  $P_2 = \{r_1, r_2, r_8, r_9\}$ ,  $P_3 = \{r_1, r_2, r_9, r_12\}$  устойчивыми являются карты раскроя  $r_1, r_2$ . Если анализировать практический смысл понятия устойчивости карты раскроя, то это означает, что в нее, как правило, входят первые заготовки из приоритетного списка заготовок  $Z^{[t_1, t_2]}$ .

**Определение 2.** Список карт раскроя называется устойчивым, если при любом случайном опыте его состав не меняется (т. е. в список входят одни и те же карты раскроя).

**Определение 3.** Список карт раскроя называется близким к устойчивому на  $K$  позиций, если при любом случайном опыте в списке карт раскроя не меняется  $K$  одних и тех же карт раскроя.

### 4. ТЕСТИРОВАНИЕ АЛГОРИТМОВ

Тестирование алгоритмов проводилось в следующих направлениях:

1) Формировались тестовые наборы заготовок, для которых использовались имеющиеся в подсистеме АСУ банки карт раскроя (участок механической обработки мелкосерийного производства). Отметим, что для проведения вычислительного эксперимента площадь заготовок имеет второстепенное значение, поскольку для каждой заготовки выполняется только перебор карт раскроя из БКР, а информация о площади заготовок используется один раз после построения всего списка карт раскроя. Выбраны тестовые наборы (см. табл. 1), которые отражают общие тенденции формирования списков раскроя.

Таблица 1

Номер тестового набора	Число заготовок в списке на резку, штук	Объем банка карт раскроя, штук
1	8	32
2	12	46
3	12	58
4	12	60
5	12	64

2) Сравнение проводилось для эвристического, модельного и алгоритма с полным перебором, в частности, результаты для критерия  $F_2$  показаны в табл. 2, где значения доверительных интервалов опущены и приведены максимальные значения площадей. Как видно из табл. 2, уровень неиспользованных заготовок при моделировании ниже фактического уровня, что реально снижает объем незавершенного производства, а значит и уменьшает потребность в складских помещениях.

В табл. 2 показаны результаты для оптимального алгоритма, выполняющего полный перебор карт раскроя из БКР. Моделирование дает совпадающие с оптимальным результаты, причем за компьютерное время несравнимо меньшее, чем полный перебор. Отметим, что в [2] указана общая формула для оценки трудоемкости имитационного алгоритма. Для рассматриваемого модельного алгоритма трудоемкость будет оцениваться следующим образом:

$$S = A \cdot t \cdot D_{\xi} \cdot n,$$

где  $S$  — трудоемкость имитационного алгоритма;  $A$  — коэффициент, учитывающий дополнительные операции (умножение, сложение) в имитационном алгоритме ( $A > 2$ );  $t$  — время на вычисление (розыгрыш) одного случайного значения  $\xi$ ;  $D_{\xi}$  — дисперсия для  $\xi$ ;  $n$  — число розыгрышей в одном опыте.

Для оценки компьютерного времени реализации выбора карты раскроя учтем, что  $t$  составляет в нашем случае миллисекунды, а время на выполнение оптимального алгоритма определяется суммой времени на несколько просмотров БКР и списка заготовок. Таким образом, даже теоретически время реализации оптимального алгоритма на

2 порядка выше, чем время имитационного алгоритма, что подтверждается компьютерным тестированием.

3) При тестировании модельного алгоритма установлены следующие закономерности:

- чем выше сложность раскроя, тем труднее получить устойчивый список карт раскроя для рассматриваемых наборов. Наибольший процент устойчивых списков карт раскроя был получен при сложности, равной трем. Модельные эксперименты для наборов, содержащих  $15 \div 30$  заготовок с объемом БКР  $40 \div 80$  карт раскроя, показали, что в каждой задаче всегда удается определить сложность раскроя, при которой получаются устойчивые списки карт раскроя;

- для каждого тестового набора можно выделить устойчивые карты раскроя (т.е. всегда попадающие в список), это явление практически вполне объяснимо, так как в любом производстве есть стабильно выпускаемые изделия, заготовки для которых и входят в устойчивые карты раскроя;

- списки карт раскроя, близкие к устойчивым на 2–3 позиции (т.е. содержащие 2–3 повторяющиеся заготовки), полезны для производств, связанных с постоянным дефицитом заготовок, например, при освоении новых изделий.

### ВЫВОДЫ

Изложенные алгоритмы моделирования списков карт раскроя могут быть модифицированы и для определения списка заготовок на обработку штампочным оборудованием или для фигурного раскроя листового материала.

Регулярность применения изложенных в статье алгоритмов составляет один раз для каждой смены.

Опыт тестирования различных алгоритмов построения оперативных списков на обработку показал, что полезно делать соответствующие модельные исследования на этапе объемно-календарного планирования.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Бабкова, Е. В.** Применение методов Монте-Карло в прямоугольном раскрое / Е. В. Бабкова // Принятие решений в условиях неопределенности : межвуз. науч. сб. Уфа : УГАТУ, 2001. С. 140–148.

Таблица 2

Номер тестового набора	Площадь неиспользованных заготовок, %			
	Оптимальный алгоритм	Эвристический алгоритм	Алгоритм моделирования	Фактически
1	7	8	7	36
2	8	10	8	23
3	7	12	7	18
4	8	14	8	18
5	7	7	7	16

2. **Ермаков, С. М.** Статистическое моделирование / С. М. Ермаков, Г. А. Михайлов. М. : Наука, 1982. 296 с.
3. **Михайлов, Г. А.** Некоторые вопросы теории методов Монте-Карло / Г. А. Михайлов. Новосибирск : Наука, 1974. 142 с.
4. **Соболь, И. М.** Численные методы Монте-Карло / И. М. Соболь. М. : Наука, 1973. 307 с.
5. **Babkova, E. V.** Modeling as decision making method in billet manufacture planning problem / E. V. Babkova // Proc. of the Workshop on Computer Science and Information Technologies (CSIT'2000). Ufa : USATU, 2000. Vol. 2. P. 284–286.

## ОБ АВТОРЕ



**Бабкова Елена Васильевна**, доц., докторант каф. выч. математики и кибернетики. Дипл. инж.-экон. по АСУ (УАИ, 1972). Канд. техн. наук по АСУ (УГАТУ, 1990). Иссл. в обл. упр-я и моделир. в сложных орг.-техн. системах.

УДК 629.062

В. А. ЦЕЛИЩЕВ, Д. В. ЦЕЛИЩЕВ

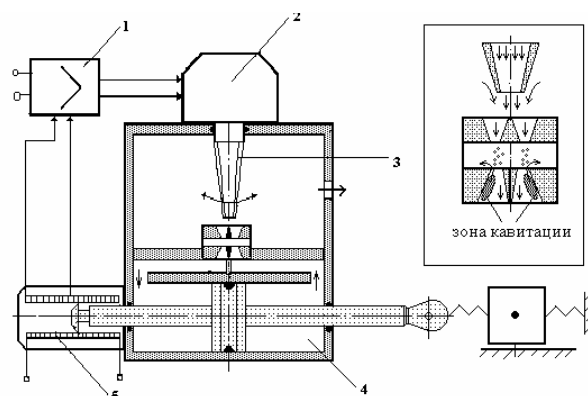
### ГИДРАВЛИЧЕСКАЯ МАШИНА СО СТРУЙНО-КАВИТАЦИОННЫМ РЕГУЛИРОВАНИЕМ

Обсуждаются научные проблемы разработки и проектирования струйных гидравлических рулевых машин для систем управления летательными аппаратами. Основное внимание уделяется обеспечению оптимальных статических и динамических характеристик рулевых машин. Исследуется струйно-кавитационный способ регулирования гидроприводов. *Системы автоматического управления; экспериментальные исследования; математическая модель; кавитационное регулирование*

В системах автоматического управления летательных аппаратов специального назначения широкое применение получили электрогидравлические рулевые машины (ЭГРМ) с высоконапорными струйными гидроусилителями (СГУ) [6], содержащие последовательно соединенные усилитель сигнала рассогласования 1, электромеханический преобразователь 2, электрогидроусилитель с подвижной струйной трубкой 3 и расположенной напротив приемной плиты с двумя окнами (приемными соплами), подключенными к полостям гидродвигателя 4, потенциометрический датчик обратной связи (ДОС) 5.

В результате работ, проводимых на ФГУП «Государственный ракетный центр «КБ имени акад. В. П. Макеева» была создана гамма устойчиво работающих однокаскадных струйных гидравлических рулевых машин (СГРМ) классической схемы с выходной мощностью до 4,225 кВт при давлении до 13 МПа.

Отличие СГРМ со струйно-кавитационным регулированием от классической схемы — в конструкции приемной плиты (см. рис. 1) [4]. Верхняя часть приемной плиты выполнена в виде коротких коноидальных сопел, где происходит дополнительное увеличение скорости основной струи. Нижняя часть — в виде диффузорных сопел, соединенных с полостями гидродвигателя. В приемной плите выполняется камера в виде плоскопараллельной щели, пересекающей каналы и сообщающаяся со сливом.



**Рис. 1.** Схема СГРМ со струйно-кавитационным регулированием

Отвод рабочей жидкости из полостей гидроцилиндра осуществляется через плоскую щель, что исключает воздействие обратных струй на струйную трубку. Волновые процессы и забросы давления в подводящих магистралях отсутствуют, так как струя обладает односторонней проводимостью.

Анализ полученных результатов экспериментальных исследований [6] позволил предположить, что в основе высоких показателей новой схемы СГРМ перед классической лежат процессы, происходящие в струйной камере. Наблюдаемое явление жесткости внешней характеристики гидропривода и независимость характеристик гидропривода от конструктивных параметров распределителя происходит за счет кавитационных