

# МОДЕЛЬ УПРАВЛЕНИЯ РЕСУРСАМИ ПРЕДПРИЯТИЯ ПРИ ДИСКРЕТНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ

А.А. Беляев, С.С. Котов, В.Ю. Столбов

*Пермский государственный технический университет*

Предложен алгоритм приближенного решения задачи распределения ресурсов, основанный на методе распространения ограничений. Алгоритм продемонстрирован на конкретном примере. Дано сравнение с другими известными методами.

## ВВЕДЕНИЕ

Для большинства предприятий актуальна проблема составления оптимальных план-графиков производства [1–3]. Зачастую планы составляются вручную и не учитывают множества важных аспектов производственного процесса. Возникает необходимость в автоматизированном составлении оптимальных план-графиков. Задача заключается в поиске такого варианта распределения по времени ресурсов (рабочей силы и оборудования), чтобы выполнялся некоторый набор ограничений при наилучшем достижении поставленных целей. Полученное оптимальное распределение ресурсов называют оптимальным план-графиком производства (ОПГП).

Выделяются жесткие ограничения, выполнение которых обязательно, и нежесткие, выполнение которых желательно, но не обязательно. Требования, обеспечивающие непротиворечивость план-графика, относятся к жестким ограничениям. Руководство предприятия, производственники и заказчики ставят различные цели в задаче оптимального планирования ресурсов и высказывают пожелания (предпочтения), которые в данной работе считаются нежесткими ограничениями и задаются нечеткими множествами. Для связи этих нечетких множеств и каких-либо вариантов план-графика вводятся скалярные функции, которые отражают смысл ограничения и ставят в соответствие заданному варианту плана некоторое число. Носитель нечеткого множества формируется из всех возможных значений введенной скалярной функции, а функция принадлежности задается экспертом, исходя из своих знаний о задаче. Норма нежесткого ограничения среди других нечетких ограничений вводится как подмножество  $\alpha$ -уровня заданного нечеткого множества [4].

## 1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ОПТИМАЛЬНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ РЕСУРСОВ

Предполагается, что бизнес-план производства каким-то образом составлен и требуется его проверка на обеспеченность ресурсами. Считается, что руководство предприятия ставит основным критерием разработки ОПГП его прибыльность. В то же время, производственники ставят конфликтующие с данным критерием цели, такие как равномерность загрузки оборудования, минимальное число переналадок универсального оборудования и т. п. Для разрешения конфликта вводятся две группы частных критериев оптимальности, описывающие производственные интересы и интересы службы сбыта предприятия, которая отвечает за сроки выполнения заказов и их реализацию. Задача поиска оптимального решения сводится к постановке и решению задачи управления с двумя обобщенными критериями. Таким образом, исходная задача формулируется следующим образом: найти оптимальное распределение ресурсов, удовлетворяющее всем жестким ограничениям, некоторым предпочтениям и сообщающее экстремальное значение двум обобщенным критериям оптимальности, отвечающих за прибыльность предприятия и комфортность производства.

Сформулированная задача представляет собой часть общей проблемы автоматизации процесса управления производственным предприятием [5]. Управление производством — сложный, протекающий во времени в условиях недостаточной текущей информации, процесс. Поэтому необходимо еще на стадии постановки задачи управления разбить ее на отдельные подзадачи, связанные между собой, но решаемые в различные моменты времени и на разных структурных уровнях.

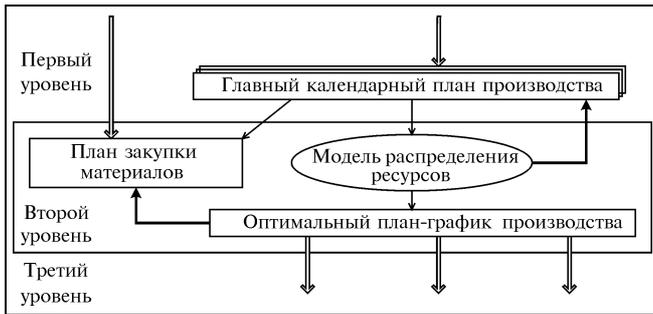


Рис. 1. Структурная схема системы управления ресурсами

На первом (стратегическом) структурном уровне решается задача формирования производственной программы на планируемый период времени с учетом спроса на выпускаемую продукцию, ценовой политики предприятия, а также выгодности имеющихся заказов (рис. 1). Результат решения этой задачи — главный календарный план производства (ГКПП), оптимальный в смысле прибыльности. Он служит основой для определения сроков выполнения поставок, достижения стратегических целей бизнеса и др. План не учитывает распределение имеющихся ресурсов во времени и пространстве, так как при его составлении используются лишь интегральные характеристики. Поэтому ГКПП уточняется на втором (тактическом) структурном уровне, где учитываются интересы производителей путем снижения прибыльности предприятия (см. рис. 1). Таким образом, ГКПП служит входной информацией для решения задачи поиска ОПГП. Для обеспечения устойчивости системы в целом и нахождения наилучшего ОПГП создается и запоминается несколько лучших ГКПП в смысле прибыльности предприятия. Для каждого плана формируется ОПГП с последующим выбором оптимального. При разработке ОПГП уточняются даты ГКПП.

Таким образом, построение ОПГП напоминает классическую схему «замкнутого цикла» при планировании ресурсов по стандарту MRP II [1], когда итеративным образом корректируется календарный план. Однако при данном подходе предлагается использовать обратную связь (жирные стрелки на рис. 1) только для выборки ГКПП из числа отобранных ранее при поиске ОПГП и один раз для корректировки ГКПП на основании построенного ОПГП, который учитывает и прибыльность календарного плана, и производственные ограничения. План закупки материалов формируется как на основании первичного или скорректированного ГКПП, так и на основании ОПГП для большей детализации и уточнения дат поставки необходимых материалов.

Отметим, что из оптимального в смысле прибыльности главного календарного плана может быть получено множество ОПГП, каждый из которых будет в той или иной степени нарушать ограничения на имеющиеся ресурсы. Для удовлетворения всех ресурсных ограничений необходимо каким-то образом изменить даты ГКПП, снизив при этом прибыльность.

На практике при составлении реального главного календарного плана обычно используются запасы времени для выполнения каждой планируемой операции, т. е. к нормативному времени выпуска партии готовых изделий добавляют некоторый страховой запас.

Зачастую запас оказывается слишком большим и приводит к простаиванию оборудования при выполнении плана. В настоящей работе предложен один из методов сокращения страхового запаса путем расчета ОПГП и, как следствие, минимизации времени простоя оборудования.

Эффективность метода решения задачи нахождения ОПГП существенно зависит от вида математической постановки, на стадии которой принимаются обоснованные допущения.

## 2. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ДИСКРЕТНОЙ ОПТИМИЗАЦИИ

Исходными данными для нахождения ОПГП служат ГКПП, полная информация о доступном оборудовании, спецификациях и технологических маршрутах готовых изделий.

Параметры оптимизации вводятся в виде матрицы  $x_{ij}^{kl}$ , где каждому элементу соответствует время запуска  $i$ -й партии  $j$ -й операции для  $k$ -й детали (готового изделия) на  $l$ -м станке. Множеству дат можно однозначно сопоставить множество положительных чисел, следовательно  $x_{ij}^{kl} \geq 0$ . Операции на станках выполняются только минимальными партиями, размеры которых можно представить в виде

$$B = \{b_k : k = \overline{1, N_D}\},$$

где  $b_k$  — число деталей в минимальной партии для детали  $k$ ,  $N_D$  — число деталей, принятых в обработку.

Оптимальный план-график состоит из множества операций, связанных между собой набором ограничений. Каждая операция обработки детали определяется группой минимальных партий. Время, необходимое для обработки минимальной партии при операции  $j$  для детали  $k$ , задается в виде

$$T = \{t_{jk} : j = \overline{1, N_o}; k = \overline{1, N_D}\},$$

где  $N_o$  — число операций.

Для каждой операции делается предположение о ее непрерывности, т. е. она продолжается до тех пор, пока не закончится. Если это ограничение для какой-либо операции не выполняется, то эту операцию можно разбить на составляющие (cumulative scheduling) [6]. Также считается, что операция начнется только после того, как закончатся все операции, ей предшествующие. Операция начинается незамедлительно, разрывов во времени быть не должно. Все операции, которые могут совершаться над любым полуфабрикатом, заранее пронумерованы. Исходя из этого положения, вводится матрица последовательности операций для каждой детали (технологический маршрут):

$$\Omega_{jk} = \{\omega_{jk} : j = \overline{1, N_o}; k = \overline{1, N_D}\},$$

где  $\omega_{jk}$  — порядковый номер выполнения операции  $j$  для детали  $k$ .

Операции могут выполняться на станках разных типов, на каждом станке могут выполняться несколько видов операций (универсальное оборудование). Обычно каждый станок закреплен за конкретной операцией, которая имеет приоритет перед остальными. Поэтому в данной работе применение универсального оборудования учитывается в виде предпочтений. Учитывается, что ресурсы могут быть недоступны в некоторые моменты времени, которые для каждого станка определяются рабочим календарем (календарем доступности ресурсов).

Некоторые из полуфабрикатов являются готовыми изделиями. Из условий задачи производство таких полуфабрикатов необходимо закончить к заданным срокам. Директивные сроки описываются множеством

$$D = \{d_k : k = \overline{1, N_D}\},$$

где  $d_k$  — дата, к которой необходимо произвести  $k$ -ю деталь.

Как уже отмечалось, критерием составления ГКПП служит его прибыльность. Следовательно, даты ГКПП обеспечивают максимальную прибыль предприятия. В результате составления план-графика и учета ресурсных ограничений будут получены новые даты выпуска деталей. Эти даты могут быть несколько больше, чем даты ГКПП, что приведет к снижению прибыльности плана. Для формализации потери прибыльности ОПГП относительно ГКПП вводится функция

$$F(y_k, d_k) = \begin{cases} 0, & y_k \leq d_k \\ (y_k - d_k), & y_k > d_k, \end{cases}$$

где определяет дату окончания производства  $k$ -й детали в план-графике.

Во введенных обозначениях дата окончания производства  $k$ -й детали записывается в виде

$y_k = \max_{ij} (x_{ij}^{kl} + t_{jk})$ . Разные даты главного календарного плана могут иметь различную значимость в зависимости от важности тех заказов, к которым эти даты относятся. Важность  $k$ -й даты задается коэффициентом  $A_k$ , который задает и размер штрафа за превышение договорного срока выпуска детали. Критерий, обеспечивающий минимум потери прибыли при переходе от ГКПП к ОПГП, можно записать в виде:

$$J_1(x) = \sum_k A_k F(y_k, d_k) \rightarrow \min. \quad (1)$$

Интегральный критерий комфортности производства обычно записывается как взвешенная свертка частных критериев:

$$J_2(x) = \sum_i K_i j_2^i(x) \rightarrow \max. \quad (2)$$

Здесь весовые коэффициенты  $K_i$  определяются на основании знаний диспетчера. Часто в качестве частного критерия комфортности производства выбирается минимальное число переналадок оборудования. Подобным критерием также служит максимизация текущего размера партии деталей. Под текущим размером партии обычно понимается число минимальных партий определенной операции у деталей, обработанных подряд. Для производства текущий размер партии играет ключевую роль, т. е. чем он больше, тем нужно меньше переналаживать оборудование, и, следовательно, комфортнее работать. Для формализации такого критерия записывается матрица  $Q(x)$ , элементы  $q_{jk}(x)$  которой соответствуют числу текущих партий для детали  $k$  на операции  $j$ . Число текущих партий деталей может быть определено только для сформированного план-графика.

Во введенных обозначениях критерий, максимизирующий текущий размер партии деталей (минимизирующий число текущих партий), может быть записан следующим образом:

$$j_2^1(x) = \sum_{jk} q_{jk}(x) \rightarrow \min. \quad (3)$$

Также часто в качестве частного критерия комфортности производства выбирается равномерная загрузка оборудования.

Жесткими ограничениями в задаче составления ОПГП выступают следующие.

- Любой станок в каждый момент времени выполняет только одну операцию:

$$[x_{ij}^{kl}, x_{ij}^{kl} + t_{jk}] \cap [x_{mn}^{pl}, x_{mn}^{pl} + t_{np}] = \emptyset, \quad k \neq p, i \neq m, j \neq n. \quad (4)$$

- Спецификации и технологические маршруты готовых изделий представляют собой набор ог-

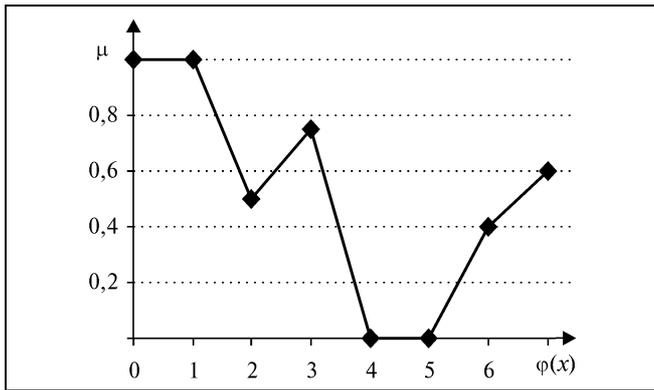


Рис. 2. Функция принадлежности нежесткого ограничения

раничений на последовательность выполнения операций:

$$\max_i x_{im}^{kl} < \min_i x_{in}^{kl}, \text{ если } \omega_{mk} < \omega_{nk}. \quad (5)$$

- Партия с большим номером выполняется в более поздний срок:

$$x_{ij}^{kl} < x_{i+1j}^{kl}. \quad (6)$$

К ограничениям (4)–(6) обычно добавляются ограничения на применение только имеющегося оборудования в каждый момент времени и определенных станков для разного рода операций и ограничения на производственный календарь.

Кроме жестких ограничений, в задаче составления ОПГП часто учитываются различного рода предпочтения со стороны производства, такие как учет профессионализма рабочих, их психологическая совместимость при совместной работе, приоритет при использовании универсальных станков на различных операциях, размеры партий выпускаемых деталей и т. п. Предпочтения предлагается описывать в виде нечеткого множества, функция принадлежности которого  $\mu(\varphi(x))$  задается экспертом, например, как показано на рис. 2.

Как уже отмечалось, оборудование бывает универсальным и на нем можно выполнять несколько различных операций. На рис. 2 представлена функция, по оси абсцисс которой указаны номера операций, а значение функции принадлежности показывает, с каким приоритетом на данных операциях стоит использовать универсальное оборудование. Видно, что на станке, для которого записывалась функция принадлежности, нельзя выполнять операции с номерами 4 и 5. Если задать уровень значимости данного нежесткого ограничения  $\alpha = 0,6$ , то при решении задачи оптимизации будут считаться возможными только операции 0, 1, 3 и 7 с приоритетом операций 0, 1 и 3 по сравнению с операцией 7. Любое нежесткое ограничение может быть сформулировано в виде не-

четкого критерия оптимальности, что будет далее продемонстрировано.

Поставленная задача (1)–(6) является двухкритериальной задачей дискретной оптимизации большой размерности с нечеткими ограничениями. В связи с NP-трудностью задачи применить для ее решения алгоритмы полного перебора не представляется возможным, поэтому предпочтение отдается методам направленного перебора, опирающимся на экспертные знания (эвристические методы).

### 3. АЛГОРИТМ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ СОСТАВЛЕНИЯ ОПТИМАЛЬНОГО ПЛАН-ГРАФИКА ПРОИЗВОДСТВА

Исходными данными для нахождения ОПГП служит главный календарный план. Считается, что он оптимален в смысле прибыльности предприятия по критерию  $J_1$  (точка  $\hat{J}^0$  на рис. 3). Следовательно,  $\hat{J}_1^0$  — минимальное среди допустимых значений  $J_1$ . Однако в смысле комфортности производства данный календарный план обычно далеко не оптимален, т. е. ему соответствует малое значение критерия  $\hat{J}_2^0$ , которое в процессе решения задачи может быть увеличено. Обычно, зная технологические маршруты и трудоемкости всех операций, данный ГКПП несложно «развернуть назад» (процедура «разузлования» [1]) и составить первичный план-график производства. Если полученный план-график удовлетворяет всем ресурсным ограничениям (такие план-графики принадлежат множеству  $X_D$  на рис. 3), то такой план удовлетворяет условиям задачи и оптимален по критерию прибыльности. Если же составленный план не удовлетворил ресурсным ограничениям, то его необходимо модифицировать таким образом, чтобы он доставлял наибольшее значение критерию  $J_2$ , а критерий  $J_1$  увеличился бы не больше, чем на некоторое заданное число  $\varepsilon$ .

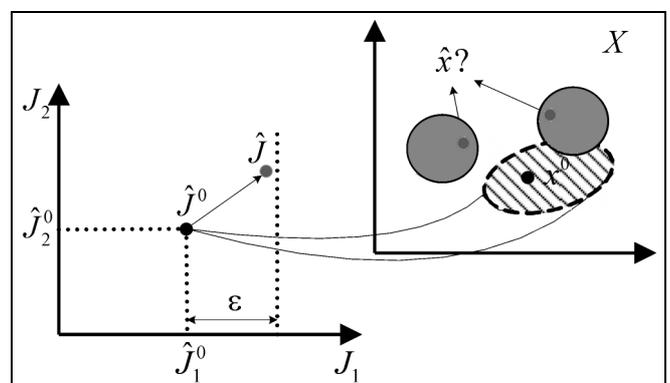


Рис. 3. К алгоритму решения оптимизационной задачи

На основании одного ГКПП можно построить множество план-графиков. Следовательно, в пространстве решений  $X$  каждая точка множества значений критериев может быть представлена в виде множества план-графиков (заштрихованное множество на рис. 3). Заметим, что ГКПП был составлен лишь с учетом интегральных ограничений на ресурсы. Поэтому часть ограничений на ресурсы в определенные моменты времени может не выполняться, т. е. при составлении ОПГП накладывается ряд дополнительных ограничений, которые могут повлиять на значение  $J_1$ . Если эта величина превосходит  $\varepsilon$ , то необходимо либо увеличить  $\varepsilon$ , либо выбрать другой ГКПП.

В настоящей работе вместо «развертки назад» с помощью специальной эвристики и алгоритма распространения ограничений [6] предлагается строить первичный ОПГП из данного множества, который нарушает ресурсные ограничения только на последних этапах плана, соответствующих заданным датам ГКПП, или не нарушает их совсем. Идея метода распространения ограничений заключается в последовательном удовлетворении ограничений задачи путем целенаправленного перебора значений переменных. Поиск решения рассматриваемой задачи осуществляется следующим образом: некоторым переборным алгоритмом (например, методом перебора с возвратом [7]) поочередно назначаются различные значения для всех переменных из допустимого множества. Следующая рассматриваемая переменная выбирается с помощью специальной эвристики (например, выбирается тот номер переменной, который обеспечивает выполнение ограничения (5) или выполнение самой критичной по времени и важности даты). Каждый новый вариант проверяется на выполнение всех ограничений. Для уменьшения объема вычислений применяются специальные алгоритмы проверки ограничений (фильтрующие алгоритмы) [8].

Найденный таким образом первичный ОПГП оптимален по критерию  $J_1$ , но не всегда является допустимым. Все перегрузки по оборудованию в таком плане «смещены» к заданным датам ГКПП. Как показала практика, из этого плана проще получить допустимый и более прибыльный план благодаря тому, что «перегрузки» оборудования сгруппированы в известные места, а не распределены по всему плану произвольным образом, как при «разузловании». План как бы разбит на оптимальные части, которые достаточно «сшить» некоторым образом. Например, части ОПГП можно соединить простым удовлетворением ресурсных ограничений и соответствующим смещением дат выпуска продукции в сторону возрастания, а можно применить специальный алгоритм, обеспечивающий умень-

шение простоя оборудования в образующихся промежутках времени.

В процессе решения задачи могут получаться несколько допустимых план-графиков, заданных величиной  $\varepsilon$ . Этот параметр представляет собой меру компромисса между критериями  $J_1$  и  $J_2$ , т. е. он показывает, насколько можно пожертвовать прибыльностью предприятия  $J_1$ , чтобы улучшить комфортность производства  $J_2$ . Чем больше  $\varepsilon$ , тем комфортнее допустимое производство, но меньше его прибыльность. Поэтому параметр  $\varepsilon$  лучше не задавать, а определять его из условий максимального удовлетворения всех заданных жестких ограничений [5]. Отметим, что выбор оптимального в смысле его комфортности плана требует решения соответствующей задачи оптимизации на допустимом множестве при фиксированном значении критерия прибыльности. Например, для сформированного план-графика при заданном значении  $\varepsilon$  можно так подобрать размер текущих партий, чтобы прибыльность плана не изменилась, а комфортность стала максимальной. Решение такой задачи может быть получено, например, методом стохастического поиска [8].

#### 4. ДЕМОНСТРАЦИОННЫЙ ПРИМЕР

В качестве демонстрационного примера применения описанного алгоритма рассматривается следующая задача распределения оборудования, для которой известно приближенное решение методом Петрова—Соколицина [2].

На участке производится пять операций: фрезерно-центровальная, черновая токарная, чистовая токарная, фрезерная и круглошлифовальная. Обрабатываются шесть типов деталей  $A, B, C, D, E$  и  $F$ . Нормы штучного времени обработки деталей, объемы партий и число станков приведены в таблице. Требуется составить оптимальный план-график запуска деталей в обработку.

Для решения задачи делаются следующие допущения, которые соответствуют реальному производству. Детали передаются от станка к станку только партиями. Операции по обработке определенной детали выполняются последовательно, согласно введенной нумерации (например операция 2 для детали  $A$  не может быть выполнена раньше операции 1).

Директивные сроки ГКПП описываются множеством дат производства готовых изделий. В данном примере используется только дата с максимальным временем исполнения. Такая дата будет применяться для оценки прибыльности ОПГП и критерий (1) переписывается следующим образом:

$J_1(x) = \sum_{ijkl} x_{ij}^{kl} \rightarrow \min$ , т. е. в данном случае необхо-



дим минимизировать общее время выполнения плана.

Требуется определить такой порядок запуска деталей в обработку, чтобы время выполнения всего плана работ было минимальным и выполнены все заданные жесткие ограничения. Для решения поставленной задачи воспользуемся известным эвристическим методом Петрова—Соколицина [2], в соответствии с которым предполагается наличие одного обработчика на каждой операции. Для учета нескольких станков необходимо общую трудоемкость операции разделить на имеющиеся ресурсы. Решение задачи таким методом сводится к поиску четырех вариантов последовательности запуска деталей в обработку, среди которых выбирается наилучший. Решение задачи методом Петрова—Соколицина дало 82,5 ч общего времени выполнения производственной программы при последовательности  $D, F, B, A, E$  и  $C$  запуска деталей (точка отмечена крестиком на рис. 4). Полученный результат может быть улучшен путем полного перебора вариантов. Весь план может выполняться за 71,5 ч при последовательности  $C, D, B, A, F$  и  $E$  обработки деталей (знак «▲» на рис. 4). Отметим, что в этом примере был использован только один критерий — прибыльность плана, а комфортность производства при этом была максимальна, так как не было деления на партии, и весь объем деталей обрабатывался неразрывно. Кроме этого, не учитывалось конкретное оборудование при производстве. Поэтому полученное решение имеет небольшой практический интерес, и необходимо расширить постановку до задачи (1)—(6), т. е. необходимо учесть конкретное оборудование, а не его суммарную мощность, ввести дополнительный критерий, учитывающий интересы производства и составить ОПГП на основании ГКПП.

Для учета полной информации об оборудовании предполагается, что у всех станков одного типа одинаковые характеристики, и они могут работать с равной производительностью (если это не так, то различные характеристики станков несложно учесть в алгоритме). Партия деталей, про-

шедшая обработку на одном из станков  $i$ -го типа не нуждается в использовании ресурсов других станков этого же типа. Критерий комфортности производства имеет вид (3).

На стратегическом уровне планирования был получен оптимальный в смысле прибыльности план (ГКПП) со временем выполнения 59 ч. Он учитывает только интегральные ограничения на ресурсы, поэтому построить из него оптимальный план-график с таким же общим временем выполнения можно, только нарушив часть ограничений. Требуется разработать такой ОПГП, который по времени был хуже ГКПП не более, чем на 15 %, комфортность производства была бы как можно выше и при этом выполнены бы все ресурсные ограничения. В том случае, если не найдется такой план, то нужно получить ОПГП с наименьшим временем.

Модифицированным методом распространения ограничений [6] был построен ОПГП с общим временем выполнения 59 ч (точка  $A$  на рис. 4), но данный план нарушает ресурсные ограничения на двух из 8-ми станках. На рис. 5 приведено распределение нагрузки в процентах на станок 4-го типа в зависимости от времени. Из этого рисунка видно, что в последние 9 ч плана ресурсов 4-го станка не хватает на 75 %. Поэтому необходимо построить другой ОПГП, который бы не нарушал ресурсные ограничения.

В результате решения задачи был получен другой ОПГП, который удовлетворял всем ограничениям на мощности оборудования. Время его выполнения составило 64 ч, а комфортность производства увеличилась до 50,5 единиц (точка  $B$  на рис. 4). Для данного решения деление на партии произошло следующим образом: все готовые изделия для всех операции были разбиты на партии для деталей  $C$  и  $F$  на три части, а для всех остальных деталей операции выполнялись целиком. Порядок запуска деталей для этого ОПГП такой:  $E, C, B, A, F$  и  $D$ . Было найдено еще несколько решений, попадающих в  $\epsilon$ -окрестность точки  $A$  (точка  $D$ : общее время выполнения 67,4 ч, порядок запуска  $B, F, A, D, C$  и  $E$ , деление на партии для деталей  $E$  и  $F$  на три части для каждой, а для всех остальных — на две; точка  $C$ : общее время выполнения 68,8 ч, порядок запуска  $C, A, F, E, B$  и  $D$ , деление на партии для всех деталей на две равные части). Из рис. 4 видно, что в качестве  $\epsilon$ -оптимального решения лучше выбрать точку  $D$ , так как этому решению соответствует наибольшая комфортность производства. Для сравнения решения задачи с решениями, полученными методами Петрова—Соколицина и полного перебора, при использовании «усредненного оборудования» было построено решение с максимальной комфортностью производства (точка  $E$  на рис. 4). Из данного решения видно, что

#### Норма штучного времени обработки деталей по операциям

Тип детали	Операция					Число деталей
	1	2	3	4	5	
$A$	1,2	0,3	0	0	1,3	12
$B$	0	0,5	0	0,2	0,7	20
$C$	0	0,1	1,1	0,6	0,9	24
$D$	1,6	0,4	1,4	0	0	6
$E$	0,8	0	0	0,4	0	30
$F$	0,6	0	0,5	0,8	0,9	30
Число станков	3	1	2	1	2	—

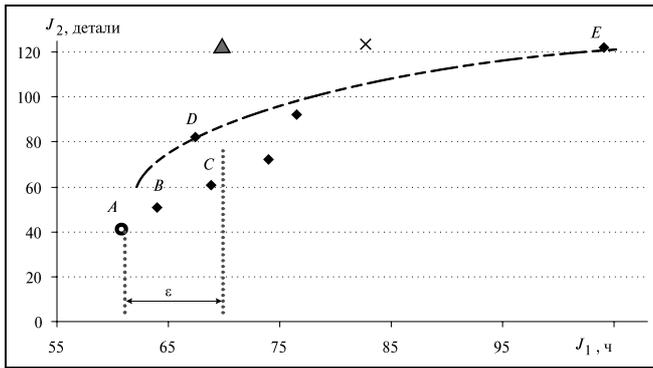


Рис. 4. Результаты решения тестового примера

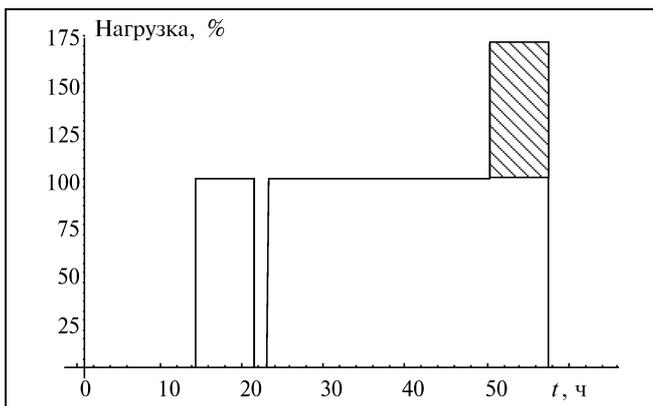


Рис. 5. Распределение нагрузки на станок 4-го типа

«осреднение» оборудования является очень грубым допущением и значительно ухудшает решение задачи.

Отметим, что предложенный алгоритм позволяет найти несколько субоптимальных план-графиков производства за очень короткое время. Для более точного нахождения оптимального план-графика необходимо строить Парето-фронт в пространстве критериев (штриховая линия на рис. 4), определяя оптимальное распределение партий по операциям для каждой детали при фиксированном значении критерия  $J_1$ . Решение задачи таким методом сильно увеличит время решения, но и повысит его точность. Однако даже существующий подход уже позволил находить планы, которые оказались более предпочтительны на реальном производстве, чем разрабатываемые ранее.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С помощью предложенных методов из множества допустимых календарных планов  $X_D$  находится Парето-оптимальное подмножество планов  $X_P \subset X_D$ ,

удовлетворяющих ресурсным ограничениям в полном объеме. Окончательный выбор искомого плана-графика можно поручить эксперту, а можно сделать автоматически с помощью дополнительного условия уступки по параметру  $\varepsilon$ . После решения задачи из множества план-графиков можно выбрать подходящий по соотношению прибыльность/комфортность производства. Такому оптимальному план-графику можно поставить в соответствие новый календарный план выпуска готовых изделий, который учитывает все аспекты производства: является прибыльным для отдела сбыта и выполнимым в смысле производства. Для этого календарного плана можно определить размер страхового запаса как интегральную величину, так и для каждого готового изделия в отдельности.

Приведенная постановка задачи оптимального распределения ресурсов и методика ее решения реализованы в виде универсального программного модуля, позволяющего решать широкий класс задач календарного планирования в рамках единой информационной системы управления предприятием.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Гаврилов Д.А. Управление производством на базе стандарта MRPII. — СПб.: Питер, 2002. — 352 с.
2. Производственный менеджмент: Учебник / Под ред. В.А. Козловского. — М.: ИНФА-М, 2003. — 574 с.
3. Столбов В.Ю., Клюев А.В., Федосеев С.А. Модель информационной системы поддержки управленческих решений на предприятии с дискретным производством // Материалы XXXII междунар. конф. «IT + S&E'05», — Украина, г. Гурзуф, 2005. — С. 65–68.
4. Галузин К.С., Столбов В.Ю. Методика составления оптимального учебного расписания с учетом предпочтений // Теоретические и прикладные аспекты информационных технологий: Сб. науч. тр. ГосНИИУМС. — Пермь, 2004. — Вып. 53. — С. 43–50.
5. Столбов В.Ю., Федосеев С.А. Модель интеллектуальной системы управления производством // Проблемы управления. — 2006. — № 5. — С. 36–39.
6. Philippe Baptiste and Claude Le Pape. Constraint Propagation and Decomposition Techniques for Highly Disjunctive and Highly Cumulative Project Scheduling Problems // Proc. of the Third Intern. Conf. on Principles and Practice of Constraint Programming. — Schloss Hagenberg, Austria, 1997. — P. 117–122.
7. Bartak R. Dynamic Global Constraints in Backtracking Based Environments // Annals of Operations Research. — 2003. — N 118. — P. 101–119.
8. Rossi-Doria, Sampels M., Birattari M. et al. A comparison of the performance of different metaheuristics on the timetabling problem // Proceedings of the Fourth International Conference on the Practice and Theory of Automated Timetabling. — 2002. — P. 115–119.

☎ (342) 239-12-97, e-mail: svu@matmod.pstu.ac.ru

Статья представлена к публикации членом редколлегии В.Н. Бурковым. □