

# УПРАВЛЕНИЕ ПРОИЗВОДСТВОМ НА ТАКТИЧЕСКОМ УРОВНЕ ПЛАНИРОВАНИЯ В УСЛОВИЯХ НЕЧЕТКОЙ ИСХОДНОЙ ИНФОРМАЦИИ

С.А. Федосеев, А.В. Вожаков, М.Б. Гитман

Рассмотрена модель календарного планирования производства с нечеткими критериями и ограничениями. Модель базируется на применении теории нечетких множеств. В качестве тестового примера рассмотрен реальный календарный план производства продукции на предприятии «ООО «Завод СДМ», г. Пермь.

**Ключевые слова:** управление производством, программное обеспечение, календарное планирование, нечеткая информация.

## ВВЕДЕНИЕ

В условиях рыночных отношений наблюдается тенденция к ужесточению внутриотраслевой конкуренции, когда каждый участник рынка стремится привлечь клиента наиболее выгодным предложением. Таким предложением может быть минимальная цена и (или) минимальные сроки поставки продукции. Для сокращения сроков поставки продукции планирование производства должно быть направлено на обеспечение основных принципов рациональной организации рабочих процессов [1], таких как параллельность, пропорциональность, непрерывность и прямооточность.

## 1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ

Вся система производственного планирования может быть разделена на три структурных уровня [2].

- Уровень стратегического планирования. На данном уровне осуществляются прогнозирование спроса, фильтрация и отбор поступивших от клиентов заказов, анализируются существующие мощности и бизнес-цели производства. Результат заключается в построении главного календарного плана производства (ГКПП), регламентирующего «что», «к какому сроку» и «в каких количествах» будет выпускаться в плановом периоде [3].
- Уровень тактического планирования. На данном уровне на основе составленного ГКПП с учетом более детальной информации о производственных мощностях строится план-график производства, устанавливающий перечень, очередность

и длительность операций на рабочих центрах в течение планового периода.

- Поскольку многие детали реального производственного процесса не рассматриваются или рассматриваются укрупненно на тактическом уровне планирования, необходимо его корректировать и уточнять с учетом постоянно изменяющихся условий. Результат планирования на данном уровне заключается в формировании сменно-суточных заданий.

Особенно остро проблема планирования стоит на тактическом уровне. С момента получения ГКПП до формирования сменно-суточных заданий требуется решить задачу оптимального распределения нагрузки на рабочие центры таким образом, чтобы выполнялось условие реализуемости ГКПП при соблюдении принципов параллельности, пропорциональности, непрерывности и прямооточности производства.

В общемировой практике для решения задач производственного планирования активно используется подход «Планирование ресурсов предприятия» (Enterprise Resource Planning — ERP). Термин ERP означает «финансово ориентированную информационную систему для определения и планирования ресурсов предприятия, необходимых для получения, изготовления, отгрузки и учета заказов потребителей» [4]. Основные недостатки существующих ERP-систем состоят в их повышенных требованиях к точности входных данных и упрощенные линейные представления в используемых математических моделях. Таким образом, существующие ERP-системы пока не обеспечивают решение задач производственного планирования



с учетом различных объективно существующих видов неопределенности (стохастичность, нечеткость).

В данной работе предложена модель планирования производства на тактическом уровне, учитывающая нечеткость критериев оптимизации и ограничений.

Пусть процесс производства осуществляется в нескольких цехах, каждый из которых содержит в себе определенное множество рабочих центров. Все рабочие центры разделены на типы. Типы рабочих центров пронумеруем индексом  $k \in \overline{1, E}$ , где  $E$  — общее число типов рабочих центров. Введем вектор  $\bar{q} = (q_1, q_2, \dots, q_E)$ , где  $q_k$  — число рабочих центров  $k$ -го типа, имеющихся на производстве. Будем считать, что все  $q_k$  рабочих центров  $k$ -го типа находятся в одном цехе.

Максимальная загрузка каждого рабочего центра ограничена некоторым числом часов в календарный день, обычно это одна или две смены по 8 ч. Будем измерять время загрузки рабочих центров в сменах и положим, что максимальная загрузка всех рабочих центров  $k$ -го типа одинакова и равна  $t_k^*$  смен. Если  $t_k^* > 1$ , то возможны сверхурочные работы. Если учесть, что на практике максимальная загрузка рабочих центров может варьироваться, т. е. является нечеткой, то ее можно определить с помощью нечетких чисел вида

$$Z_k = \{\mu(z_{k1})/z_{k1}; \mu(z_{k2})/z_{k2}; \dots; \mu(z_{kv})/z_{kv}\},$$

где  $z_{kh}$ ,  $h = \overline{1, v}$  — число рабочих смен, ограничивающих максимальную загрузку рабочих центров  $k$ -го типа,  $\mu(z_{kh})$ ,  $h = \overline{1, v}$  — функция принадлежности, которую содержательно можно интерпретировать как степень убежденности экспертов в допустимости такого ограничения.

Спецификации для всех видов готовой продукции заданы, поэтому может быть составлен единый перечень всех номенклатурных единиц от материалов до готовых изделий, включая полуфабрикаты. В этом перечне каждой номенклатурной единице присваивается уникальный номер  $i \in \overline{1, C}$ , где  $C$  — суммарное число уникальных номенклатурных единиц во всех спецификациях. Номенклатурный перечень может быть отсортирован таким образом, чтобы вначале располагались изготавливаемые полуфабрикаты и готовые изделия с номерами  $1 \leq i \leq N$ ,  $N < C$ , а затем закупаемые материалы с номерами  $N < i \leq C$ .

Для описания состава изготавливаемых номенклатурных единиц введем матрицу применяемости  $A$ . Ее элементы  $a_{ij}$  определяют число номенклатурных единиц (компонентов) с номерами  $i \in \overline{1, C}$ ,

необходимых для производства номенклатурных единиц с номерами  $j \in \overline{1, N}$ .

Считается, что задан ГКПП, описывающий план, исходя из номенклатурных позиций независимого спроса (что производить, когда производить, сколько производить). Для описания ГКПП введем матрицу  $g$ . Ее элементы  $g_{id}$  определяют количество номенклатурных единиц (компонентов) с номерами  $i \in \overline{1, C}$ , которые необходимо произвести в день с номером  $d \in \overline{1, T}$ , где  $T$  — число дней в плановом периоде.

Технологические маршруты, описывающие способ производства каждой изготавливаемой номенклатурной единицы, считаются заданными. Технологический маршрут содержит информацию об операциях и их последовательности. В данной работе на технологический маршрут накладывается дополнительное ограничение: все операции технологического маршрута должны выполняться на рабочих центрах одного цеха. При этом модель применима и для предприятий, использующих в работе многоцеховые технологические маршруты. Необходимо только разбить такие маршруты на несколько одноцеховых этапов. Для удобства далее будем называть технологические маршруты, выполняемые в рамках одного цеха, *технологическими этапами*.

Для каждой изготавливаемой номенклатурной единицы должен быть определен технологический этап ее изготовления. Чтобы произвести  $i$ -ю номенклатурную единицу в количестве  $n_i$ , необходимо  $n_i$  раз выполнить технологический этап  $i$ -го вида. Введем вектор  $\bar{n} = (n_1, n_2, \dots, n_N)$ , где  $n_i$  — число запланированных технологических этапов вида  $i \in \overline{1, N}$ . Фактически данный вектор является разузлованным аналогом ГКПП.

Для каждого технологического этапа определен набор технологических операций (далее *операции*), которые должны быть выполнены, чтобы технологический этап считался завершенным. Таким образом, определен вектор  $\bar{w} = (w_1, w_2, \dots, w_N)$ , где  $w_i$  — число операций в технологическом этапе вида  $i \in \overline{1, N}$ .

Вид операции идентифицируется следующим набором данных: номер операции, номер номенклатурной единицы, тип рабочего центра, трудоемкость. Поэтому общее число видов операций мож-

но определить по формуле  $W = \sum_{i=1}^N w_i$ .

Виды операций пронумеруем индексом  $l \in \overline{1, W}$ . Все операции можно отсортировать по номеру тех-

нологического этапа, а затем по номеру операции внутри технологического этапа. Введем вектор  $\bar{o} = (o_1, \dots, o_{w_1}, o_{w_1+1}, \dots, o_{w_1+w_2}, \dots, o_W)$ , где  $o_l$  — число операций, которые необходимо выполнить в плановом периоде,  $l \in \overline{1, W}$ . Также введем последовательность чисел  $s_1, \dots, s_N$ , где  $s_i$  определяет значение индекса  $l$  для первой операции  $i$ -го технологического этапа. Тогда числа  $s_i$  могут быть определены по формуле

$$s_i = \begin{cases} 1, & i = 1, \\ s_{i-1} + w_{i-1}, & i \in \overline{2, N}. \end{cases}$$

Отметим, что значение индекса  $l$  для последней операции  $i$ -го технологического этапа можно определить следующим образом:  $s_i + w_i - 1$ .

Примем, что для каждой операции, входящей в состав технологического этапа  $i$ -го вида,  $o_l = n_i$ , где  $l \in \overline{s_i, s_i + w_i - 1}$ .

Введем вектор трудоемкостей операций  $\bar{t} = (t_1, t_2, \dots, t_W)$ , где  $t_l$  — трудоемкость операции  $l$ -го вида, выраженная в рабочих сменах,  $t_l \in [0; 1]$ ,  $l \in \overline{1, W}$ .

Введем вектор  $\bar{e} = (e_1, e_2, \dots, e_W)$ , где  $e_l \in \overline{1, E}$ ,  $l \in \overline{1, W}$ , который определяет на рабочих центрах тип выполняемой операции  $l$ -го вида.

Считается заданным вектор  $\bar{r} = (r_1, r_2, \dots, r_C)$ , где  $r_i$  — остаток  $i$ -й номенклатурной единицы на цеховых складах на начало планового периода,  $i \in \overline{1, C}$ .

Известен общий объем операций, которые необходимо оптимальным образом распределить по рабочим сменам и рабочим центрам при соблюдении ограничений. В этом и заключается задача планирования производства на тактическом уровне.

Для описания плана производства введем матрицу  $P$ . Ее элементы  $p_{ld}$  определяют число операций  $l$ -го вида, запланированных на день с номером  $d$ ,  $l \in \overline{1, W}$ ,  $d \in \overline{1, T}$ , где  $T$  — число дней в плановом периоде, т. е. без нарушения общности предполагается, что предприятие работает в одну смену. Если предприятие работает в две или три смены, то  $T$  означает число смен в плановом периоде. Фактически матрица  $P$  является планом-графиком производства, поэтому определение ее элементов  $p_{ld}$  и будет решением задачи.

Введем также матрицу баланса номенклатурных единиц  $B$ . Ее элементы  $b_{id}$  определяют число номенклатурных единиц с номерами  $i \in \overline{1, C}$ , находящихся на цеховых складах на конец дня с но-

мером  $d \in \overline{1, T}$ . Значение индекса  $d = 0$  используется в матрице баланса для определения остатков номенклатурных единиц на начало планируемого периода. Матрица зависит и от ГКПП: в дни, когда запланирован выпуск продукции, происходит автоматическая отгрузка готовой продукции со склада. Элементы матрицы  $B$  можно определить следующим образом:

$$b_{id} = \begin{cases} r_i, & i \in \overline{1, C}, d = 0, \\ b_{id-1} + p_{s_i+w_i-1, d} - s_{id} - \sum_{j=1}^N p_{s_j, d} a_{ij}, & i = \overline{1, N}, d \in \overline{1, T}, \\ b_{id-1} - \sum_{j=1}^N p_{s_j, d} a_{ij}, & N < i \leq C, d \in \overline{1, T}. \end{cases} \quad (1)$$

Здесь учтено предположение о том, что произведенное количество  $i$ -й номенклатурной единицы совпадает с числом выполнений последней операции  $i$ -го технологического этапа.

Очевидно, что при составлении плана-графика производства должны учитываться следующие ограничения.

- Суммарное число операций одного вида в плане-графике должно быть равно общему числу операций данного вида, которые необходимо выполнить в плановом периоде согласно ГКПП:

$$\sum_{d=1}^T p_{ld} = o_l \text{ для всех } l \in \overline{1, W}. \quad (2)$$

- В каждый из планируемых дней максимальная загрузка рабочих центров не должна превышать максимально возможную загрузку:

$$\sum_{l=1}^W p_{ld} t_l \beta_{lk} \leq t_k^* q_k \text{ для всех } d \in \overline{1, T}, \quad (3)$$

где  $\beta_{lk} = \begin{cases} 1, & e_l = k, \\ 0, & e_l \neq k, \end{cases} \quad l \in \overline{1, W}, k \in \overline{1, E}$ .

Максимально возможная загрузка может быть определена нечетко.

В любой момент времени остаток номенклатурных единиц не может быть отрицательным:

$$b_{id} \geq 0, \text{ для всех } i \in \overline{1, C}, d \in \overline{0, T}. \quad (4)$$

Введем три основных критерия оптимальности плана-графика производства.

- Критерий комфортности производства, т. е. план-график производства должен быть скомпонован таким образом, чтобы операции одного вида запускались в производство как можно большими



партиями. В этом случае не потребуется переналадка оборудования при переходе от выполнения одной операции к другой. Данный критерий можно представить в виде

$$J_1 = \sum_{l=1}^W \sum_{d=1}^T \beta_{ld} \rightarrow \min, \quad (5)$$

$$\text{где } \beta_{ld} = \begin{cases} 1, & p_{ld} \neq 0, \\ 0, & p_{ld} = 0. \end{cases}$$

Здесь учтено вполне очевидное утверждение, что чем большими партиями операции одного вида будут запускаться в производство, тем меньше будет ненулевых элементов  $p_{ld}$  матрицы  $P$ . Образно говоря, план-график будет нарезан меньшими кусочками, и тем меньше, следовательно, будет сумма булевых переменных  $\beta_{ld}$ .

• Производство должно быть непрерывным, т. е. нагрузка на рабочие центры должна быть как можно ближе к максимальной:

$$J_2 = \sum_{l=1}^W \sum_{d=1}^T \sum_{k=1}^E |p_{ld} t_{lk} - t_k^* q_k| \rightarrow \min, \quad (6)$$

$$\text{где } \beta_{lk} = \begin{cases} 1, & e_l = k, \\ 0, & e_l \neq k. \end{cases}$$

Введение данного критерия обусловлено экономическими соображениями, так как за вынужденные простои рабочие также получают заработную плату

• Срок выполнения ГКПП должен быть минимальным:

$$J_3 = \max_{d \in \overline{1, T}} \tau(d) \rightarrow \min, \quad (7)$$

$$\text{где } \tau(d) = \begin{cases} d, & \sum_{l=1}^W \sum_{u=d}^T p_{lu} = 0, \\ 0, & \sum_{l=1}^W \sum_{u=d}^T p_{lu} \neq 0. \end{cases}$$

При этом ГКПП считается выполненным только в том случае, если все операции завершены, т. е. дата совершения последней операции и будет являться сроком исполнения всего ГКПП.

На основе предложенных частных критериев может быть введен обобщенный критерий оптимальности с использованием расширенного нечеткого множества над частными критериями оптимальности  $J^r = \{\mu_1/f_1 J_1; \mu_2/f_2 J_2; \mu_3/f_3 J_3\}$ , где  $\mu_i \in [0; 1]$ ,  $i \in \overline{1, 3}$ , — экспертная оценка значи-

мости  $i$ -го критерия,  $f_i \in [0; 1]$ ,  $i \in \overline{1, 3}$ , — нормирующие множители. Тогда, используя четкую функцию от нечеткого аргумента  $H_+(\cdot)$ , предложенную в работе [5], обобщенный критерий оптимальности можно записать в следующем виде

$$J = H_+(J^r) \rightarrow \min, \quad (8)$$

где  $H_+(A) = \int_0^1 M(A_\alpha) d\alpha$ ,  $A_\alpha$  —  $\alpha$ -уровневое подмножество нечеткого множества  $A$ , т. е.

$$A_\alpha = \{a: \mu_A(a) \geq \alpha\}; \quad M(A_\alpha) = (a^- + a^+)/2;$$

$$a^- = \inf_{a \in A_\alpha} a; \quad a^+ = \sup_{a \in A_\alpha} a.$$

Таким образом, математическая постановка задачи составления оптимального плана-графика производства может быть сформулирована в следующем виде: найти элементы  $p_{ld}$ ,  $l \in \overline{1, W}$ ,  $d \in \overline{1, T}$ , матрицы  $P$ , доставляющие минимум одному из частных критериев  $J_1$ ,  $J_2$  и  $J_3$ , определенных выражениями (5)—(7), или обобщенному критерию (8), с учетом ограничений (1)—(4).

## 2. МЕТОДИКА РЕШЕНИЯ

Ввиду сложности поставленной задачи, ее точное решение для реальных производственных данных не может быть найдено. Поэтому была предложена методика, позволяющая находить календарные планы производства, удовлетворяющие ограничениям задачи и близкие к оптимальным. Методика представляет собой набор алгоритмов, последовательное выполнение которых позволяет отыскать близкий к оптимальному календарный план. Кроме основных входных данных задачи, методика позволяет учитывать приоритетность выполнения конкретных изделий и заказов, позволяя экспертам вносить корректировки в процессе расчета. Данная методика учитывает также все три критерия оптимальности календарного плана, более того, учитывается нечеткое соотношение между критериями, что позволяет учитывать тот или иной критерий с определенным приоритетом.

Нахождение оптимального плана производства состоит из:

- вычисления технологических весов изделий;
- сортировки списка изделий;
- алгоритма «движение к началу периода»;
- алгоритма повышения «комфортности производства».

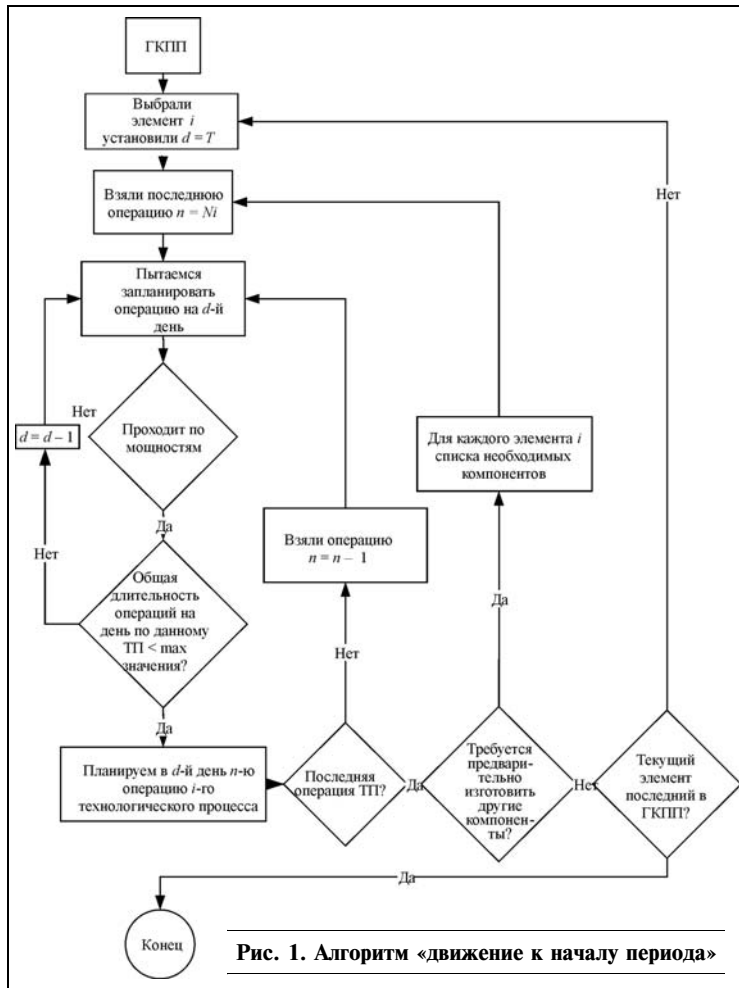


Рис. 1. Алгоритм «движение к началу периода»

Технологическим весом изделия называем суммарную трудоемкость, требуемую для изготовления изделия. После вычисления технологических весов можно составить таблицу значений элементов, входящих в ГКПП. Для каждого элемента строки данной таблицы известна следующая информация: номенклатурный номер изделия, технологический вес, плановая дата выпуска.

В дальнейшем технологический вес используется исключительно для ранжирования приоритетов изделий, поэтому при необходимости можно менять значения технологических весов изделий в таблице.

С технологическим весом изделия связаны следующие гипотезы:

- если два изделия должны быть выпущены на свободные мощности должно изделие с большим технологическим весом;
- если в существующем плане два изделия должны быть сдвинутыми относительно друг друга (оптимизация загрузки оборудова-

ния и т. п.), то сдвинуто будет изделие с меньшим технологическим весом.

После того, как получена таблица технологических весов изделий, ее необходимо отсортировать по дате выпуска и по убыванию технологического веса.

Для работы данного алгоритма требуется таблица выпуска изделий и входная информация о задаче. В качестве основы работы программного алгоритма был взят эмпирический алгоритм планирования производства «с конца», т. е. строится план из логики «для того, чтобы... нужно...». Последовательно выбираются строки из таблицы выпуска изделий. Затем планируется дата выпуска изделия. После этого планируются все операции, которые необходимо выполнить для выпуска данного изделия. Если изделие состоит из изготавливаемых ком-

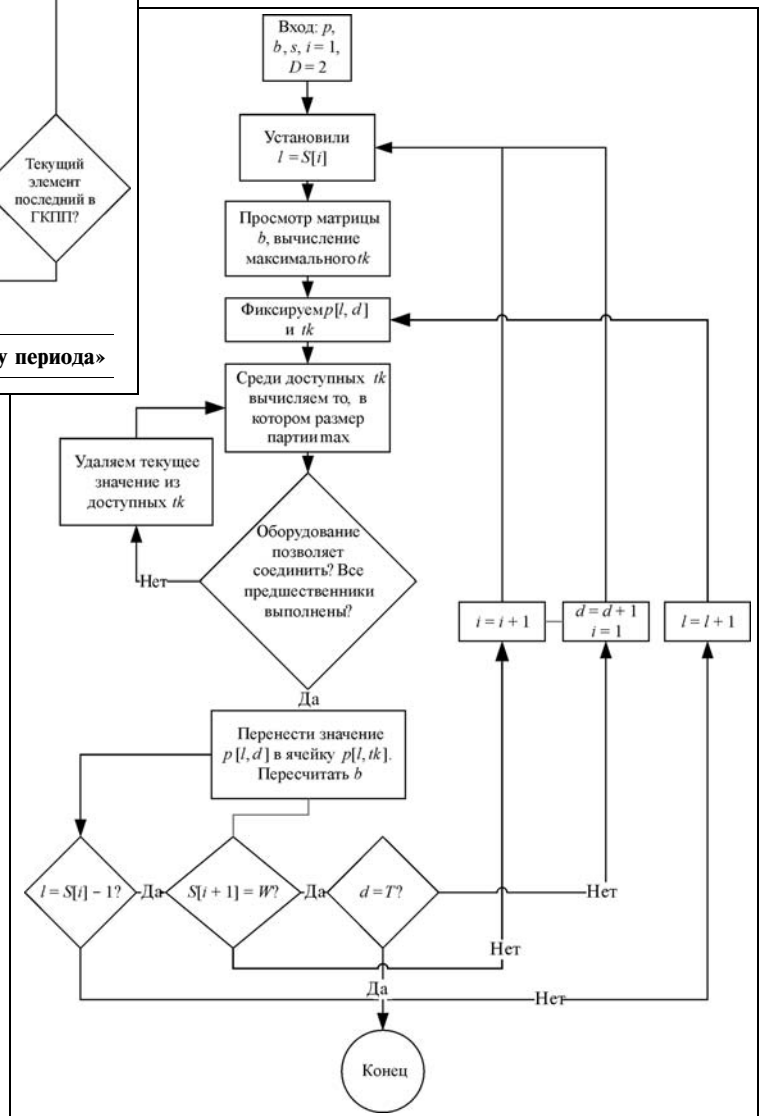


Рис. 2. Алгоритм повышения «комфортности производства»



Таблица 1

## Главный календарный план производства

Номер дня	Кол-во
5	10
7	То же
9	—"—
11	—"—
12	20

понентов, то далее необходимо запланировать выпуск этих компонентов. При этом крайним сроком изготовления будет дата выполнения первой операции предыдущего изделия. И так далее. На рис. 1 представлен алгоритм работы модуля планирования. В качестве основного критерия оптимизации в данном алгоритме используется критерий — «максимальная скорость выполнения плана». Таким образом, в результате работы данного алгоритма получаем допустимый план, оптимизированный по данному критерию.

Разработанный алгоритм повышения «комфортности производства» (рис. 2), позволяет не только повысить комфортность производства, но и снизить риски производства. Рассмотрим его подробнее.

Снижение рисков невыполнения плана в установленные сроки достигается путем переноса операций на более ранний период. При этом максимальный запас по времени для операций  $T_k$  устанавливается экспертами. Данный параметр определяет максимальное число дней, за которое можно создавать запас.

Комфортность повышается благодаря группировке одинаковых операций по дням, чтобы мак-

симально увеличить партионность и уменьшить число переналадок оборудования. Необходимо сгруппировать одинаковые операции таким образом, чтобы они выполнялись как можно большей партией. В результате получаем план, более устойчивый к рискам, и с улучшенными показателями комфортности производства. Заметим, что эффективность метода сильно зависит от максимального времени запаса, которое устанавливают эксперты и служит параметром данного алгоритма.

## 3. РЕЗУЛЬТАТЫ

Была разработана автоматизированная система тактического планирования производства (АСТПП), включающая в себя программные модули: импорта данных о структуре продукта и технологии его производства; расчета потребности и составления начальных данных; поиска оптимального календарного плана производства; формирования отчетов.

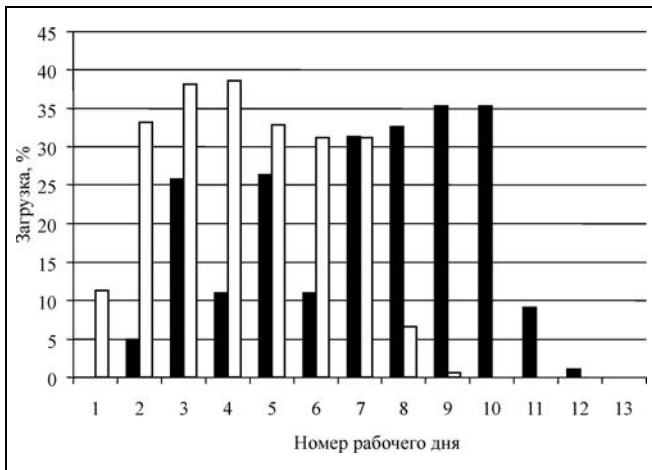
В качестве тестового примера был взят ГКПП одной номенклатурной единицы — трубы бурильной утяжеленной — с достаточно простой технологией производства (табл. 1).

С помощью АСТПП был найден план-график производства, позволяющий произвести необходимое количество продукции без нарушения сроков выполнения заказов. Так как отгрузка продукции была запланирована с перерывами в день, первоначально было найдено решение, которое позволяет произвести всю необходимую продукцию, не создавая при этом даже промежуточных складских остатков. Для многих предприятий такой план производства будет предпочтительным, особенно для предприятий, стремящихся работать по методике just in time [3]. Однако данный план имеет свои недостатки: неэффективное использо-

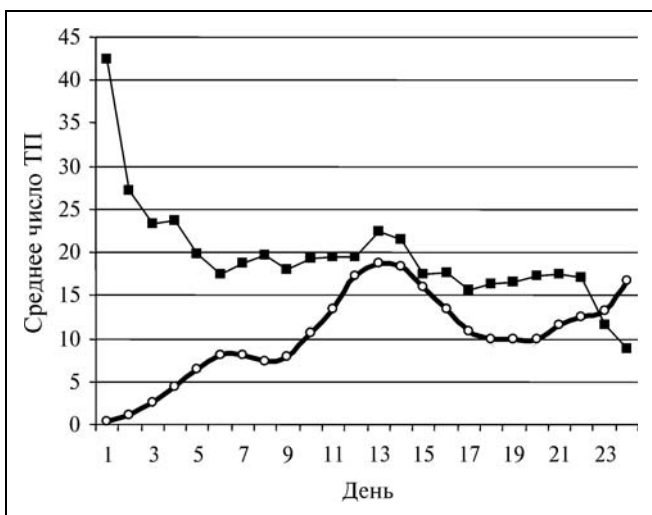
Таблица 2

## План выполнения технологических этапов по рабочим дням планового периода

Дни	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
До оптимизации													
Цех 1, пункт 4	0	0	0	0	10	0	10	0	10	0	10	20	0
Цех 26, пункт 3	0	0	0	10	0	10	0	10	4	17	20	0	0
Цех 2, пункт 2	0	0	10	0	10	0	10	10	16	13	0	0	0
Цех 1, пункт 1	0	10	0	10	0	10	10	10	10	0	0	0	0
После оптимизации													
Цех 1, пункт 4	0	0	0	10	10	10	10	10	10	0	0	0	0
Цех 26, пункт 3	0	0	10	10	10	10	10	10	0	0	0	0	0
Цех 2, пункт 2	0	15	20	25	30	20	10	0	0	0	0	0	0
Цех 1, пункт 1	50	45	30	15	0	0	0	0	0	0	0	0	0



**Рис. 3. Диаграмма выполнения технологических этапов по рабочим дням планового периода: до (■) и после (□) оптимизации**



**Рис. 4. Распределение технологических процессов по дням: до (—○—) и после (—■—) оптимизации**

вание рабочих мощностей, простои в производстве, низкая скорость выполнения плана, недостаточная комфортность производства.

Поэтому далее найденный допустимый план был оптимизирован с помощью алгоритма повышения комфортности производства. Напомним, что данный алгоритм последовательно переносит операции справа налево, что автоматически ведет к уплотнению производственного графика и к возможному увеличению скорости выполнения плана. В табл. 2 представлены графики выполнения технологических процессов (ТП) по дням. Цифры в ячейках указывают число ТП данного вида, запланированных на данный день. Если ТП выполняется больше одного дня, то он будет учтен несколько

раз. Видно, что после оптимизации значительно повысилась степень комфортности производства и скорость выполнения плана.

На рис. 3 изображена диаграмма, отображающая процент загрузки оборудования на каждый рабочий день планового периода. На диаграмме представлены данные плана производства до и после оптимизации. Очевидно, что найденный план производства обеспечивает более качественную загрузку оборудования по сравнению с первоначальным планом, оставляя резерв мощностей в конце периода и перенося основную нагрузку на начало периода.

В качестве примера, демонстрирующего возможности промышленного применения системы, был взят близкий к реальному производственный план предприятия ООО «Завод СДМ», г. Пермь (было взято базовое изделие СМ 15-01 без модификаций, но при этом сильно увеличен объем производства, чтобы убедиться в эффективности работы АСТПП). Расчет проводился на три месяца. Как правило, план производства не бывает выполнен полностью в плановом периоде. К началу периода обычно существует определенный задел деталей и агрегатов, а по завершению месяца также остается незавершенное производство. Поэтому показателен второй месяц.

Приведенный пример показывает, как работает АСТПП в условиях реального производства. Приоритетным был выбран критерий комфортности производства. Добавлено ограничение на досрочный выпуск деталей, агрегатов и изделий в размере десяти рабочих дней, предотвращающее замораживание оборотных средств предприятия. Заданный ГКПП приведен в табл. 3.

С помощью АСТПП был найден допустимый план производства, позволяющий произвести необходимое количество продукции без нарушения сроков выполнения. Найденный допустимый план был оптимизирован с помощью алгоритма повышения комфортности производства. На рис. 4 представлен график выполнения технологических процессов по дням второго месяца производства. На рис. 5 представлена диаграмма, отображающая процент загрузки оборудования в рабочие дни до

Таблица 3

**Главный календарный план производства изделия СМ 15-01**

Дата выпуска (день от начала планового периода)	Число изделий
22	50
44	
66	

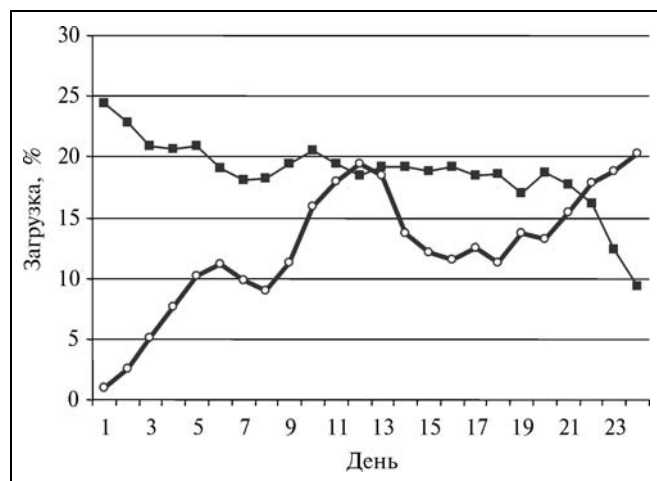


Рис. 5. Средняя загрузка оборудования: до (—○—) и после (—■—) оптимизации

и после оптимизации допустимого плана производства.

Из приведенных графиков видно, что после оптимизации допустимого плана производства произошли следующие характерные изменения:

— основная нагрузка переместилась к началу периода, что позволяет снизить риски невыполнения плана производства;

— благодаря учету дополнительного ограничения на досрочный выпуск деталей производственный график стал более равномерным;

— в последние дни планового периода нагрузка снижается, что дает возможность оперативно решать возможные производственные проблемы.

Значение критерия комфортности увеличено более чем на 20 % по сравнению с допустимым планом производства.

Для испытания АСТПП была сформирована экспертная группа, состоящая из специалистов в различных областях знаний (информационные технологии, производство, логистика, экономика). Цель работы группы заключалась в оценке уровня адекватности полученных результатов. В процессе ее работы были проанализированы все суточные задания и каждому заданию был присвоен определенный балл (от 1 до 10) в зависимости от качества его составления. По результатам был вычислен средний балл, оценивающий качество разработанного с помощью АСТПП плана производства.

Экспертами установлено, что:

- разработанная АСТПП способна находить планы-графики производства, удовлетворяющие всем производственным ограничениям;
- встроенные средства оптимизации позволяют оптимизировать допустимые планы-графики

производства с учетом всех заданных критериев оптимальности;

- дополнительные функции АСТПП позволяют изменять важность критериев оптимальности, реализуя обобщенный критерий в нечеткой постановке;
- наличие в АСТПП возможности снижения рисков невыполнения плана позволяет использовать найденные системой производственные планы без корректировок и поправок на неточность данных;
- качество составления плана производства на данный момент может быть оценено на девять баллов из десяти, что подтверждает эффективность работы АСТПП;
- разработанная АСТПП удовлетворяет всем требованиям заказчика и может быть введена в промышленную эксплуатацию.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанная автоматизированная система позволяет составлять производственные планы-графики, удовлетворяющие всем жестким и нечетким ограничениям задачи тактического планирования производства. Встроенные в данную систему средства оптимизации позволяют оптимизировать допустимые планы производства с учетом всех предложенных критериев оптимизации. Приведенные в статье демонстрационные примеры показывают эффективность применения разработанной методики.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Производственный менеджмент* / Под ред. В.А. Козловского. — М.: Инфра-М, 2003. — 574 с.
2. *Столбов В.Ю., Федосеев С.А.* Модель интеллектуальной системы управления предприятием // *Проблемы управления*. — 2006. — № 5. — С. 36—39.
3. *Гаврилов Д.А.* Управление производством на базе стандарта MRP II. — СПб.: Питер, 2002.
4. *APICS Dictionary*, 6th ed. — American Production and Inventory Control Society, 1987.
5. *Обработка нечеткой информации в системах принятия решений*. / А.Н. Борисов, А.В. Алексеев, Г.В. Меркурьева и др. — М.: Радио и связь, 1989. — 304 с.

Статья представлена к публикации членом редколлегии А.А. Амбарцумяном.

**Федосеев Сергей Анатольевич** — канд. физ.-мат. наук, доцент,  
✉ fsa@gelicon.biz,

**Вожаков Артем Викторович** — аспирант,  
✉ vozhakov@mz.perm.ru,

**Гитман Михаил Борисович** — д-р физ.-мат. наук, профессор,  
✉ mgitman@netzero.net,

Пермский государственный технический университет,  
☎ (3422) 239-12-97.