

# ОРГАНИЗАЦИЯ УПРАВЛЕНИЯ СЛОЖНЫМ ПРОИЗВОДСТВОМ НА ОСНОВЕ МОДЕЛЕЙ ОПЕРАТИВНО-КАЛЕНДАРНОГО И СЕТЕВОГО ПЛАНИРОВАНИЯ

В. В. Титов<sup>1</sup>, Д. А. Безмельницын<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Институт экономики и организации промышленного производства СО РАН (Новосибирск, Россия)

<sup>2</sup> Научно-производственное объединение «ЭЛСИБ» ПАО (Новосибирск, Россия)

В работе рассматривается методологический подход к системному согласованию оперативно-календарного, сетевого и тактического планирования в условиях единичного и серийного производства сложной наукоемкой продукции. Предлагается систему оперативного управления с таким характером производства организовать на основе использования задач оптимизации объемно-календарного, оперативно-календарного и сетевого планирования.

Планирование в подобных производствах обычно организуется на базе сетевого планирования, определения критического пути. Однако при этом не решается основная проблема — не учитываются ограничения по использованию ресурсов, не разработан эффективный алгоритм ее решения. Здесь предлагается создание для ведущих операций множества вариантов их выполнения во времени, что позволяет графики работ сдвигать в ту или другую сторону, учитывать использование ресурсов во времени. Важно и то, что приближенно решается проблема задания длительностей работ (операций) не в целых числах.

Критерий оптимизации — минимум времени выполнения работ, минимум незавершенного производства. В целом задача сетевого планирования производства с учетом ограничений по ресурсам сводится к задаче линейного целочисленного программирования.

Оперативное управление производством организуется как интерактивный, скользящий процесс (уменьшающий производственные риски), реализуемый единой задачей с тактическим управлением. В целом разработанная система моделей несомненно представляет интерес для теории и практики управления промышленными предприятиями.

**Ключевые слова:** тактическое управление, сетевое планирование, оперативное управление производством, оптимизация, согласование.

## ORGANIZATION OF COMPLEX MANAGEMENT MODEL-BASED PRODUCTION OPERATIONAL-CALENDAR AND NETWORK PLANNING

V. V. Titov<sup>1</sup>, D. A. Bezmelnitsyn<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Institute of Economics and industrial production organization SB RAS (Novosibirsk, Russia)

<sup>2</sup> Research and Production Association "ELSIB" PJSC (Novosibirsk, Russia)

The paper considers a methodological approach to the system coordination of operational-calendar, network and tactical planning in the conditions of individual and serial production of complex high-tech products. It is proposed to organize an operational management system with this type of production based on the use of optimization tasks for volume-calendar, operational-calendar and network planning.

Planning in such productions is usually organized on the basis of network planning, determining the critical path. However, this does not solve the main problem — resource usage restrictions are not taken into account, and an effective algorithm for solving it is not developed. Here you can create a set of options for leading operations to perform them over time, which allows you to shift work schedules in one direction or another, and take into

---

account the use of resources over time. It is also important that the problem of setting the duration of work (operations) is not approximately solved in integers.

The optimization criterion is a minimum of work completion time and a minimum of work in progress. In General, the problem of network production planning, taking into account resource constraints, is reduced to the problem of linear integer programming.

Operational production management is organized as an iterative, rolling process (reducing production risks), implemented by a single task with tactical management. In General, the developed system of models is undoubtedly of interest for the theory and practice of industrial enterprise management.

**Keywords:** tactical management, network planning, operational production management, optimization, coordination.

**Введение.** Трудности оперативного управления единичным, серийным производством на машиностроительных предприятиях связаны с реализацией технологий, повышением экономической эффективности, согласованием тактического планирования и оперативного управления производством (ОУП) на основе экономико-математического моделирования (ЭММ). Применение ЭММ с учетом системного подхода к решению рассматриваемой проблемы обеспечивает существенное повышение эффективности ОУП.

На предприятиях ход производства представляется планом-графиком с учетом выполнения договорных обязательств по поставкам продукции потребителям. Эффективность производства определяют минимум времени выполнения заказов, затрат, уровня оборотных активов. Таким образом, проблемные задачи достаточно сложны и их решение не может быть простым без наличия координирующей системы ОУП, оптимизации принятых решений.

В настоящее время на промышленных предприятиях операционным стратегиям уделяется значительное внимание [1–5]. Тактические задачи управления решаются реализацией операционных стратегий. Многие организаторы систем управления отмечают важность формирования стратегического управления. Однако управление предприятием не может быть эффективным без реализации операционных стратегий. Так, М. Портер отмечает, что «операционная эффективность и стратегия одинаково важны для получения важнейших результатов ..., но работают они по-разному» [6]. Категоричны и другие отзывы. «То, что разработка верной стратегии компании дает компании определенные конкурентные преимущества, скорее является заблуждением. На самом деле формирование стратегии — это еще не залог успеха. В 70% случаев проблемы возникают вследствие неправильной реализации» [7]. Речь идет о реализации системы ОУП.

В работе [8] отмечается, что комплексная система управления отличается четкой взаимосвязью всех стратегий предприятия.

В машиностроении значительные потери связаны с ритмичностью производства. Именно научное обоснование системы ОУП определяет наибольшую ее эффективность. Как уже отмечалось, использование ЭММ в наибольшей степени позволяет решить указанную проблему. Многоуровневая система ОУП представляется комплексом моделей, который и рассматривается в данной работе.

**Модель объемно-календарного планирования.** Модель объемно-календарного планирования (ОБКП) используется на верхних уровнях управления — стратегическом, тактическом. При этом обеспечивается равномерное распределение заказов и связанных с ними экономических и финансовых показателей во времени. Представим такую модель с учетом длительности производственного цикла не более месяца [4].

Пусть горизонт планирования определяется квартальной длительностью. На предприятии реализация стратегии связана с повышением эффективности производства на основе достижения равномерности технологического процесса, оптимизации использования ресурсов. Все это приводит к минимуму затрат. Спрос по продукции  $i$  обозначается через  $d_i$ ,  $i \in I$ . Квартальная производственная программа  $y_{iq}$ ,  $q = 1, 2, 3$ ,  $q$  — месяцы квартала, может формироваться по-разному. Простейшее решение:  $y_{iq} = d_i/3$ , или  $y_{iq} = \lambda_q d_i$ ,  $\lambda_q$  — определяют как отношения количества рабочих дней по месяцам к общему числу рабочих дней в квартале. В производстве рассматривается также проблема укрупнения партий деталей. Решение такой задачи приводит к уменьшению затрат на переналадку технологий, росту производительности труда.

Таким образом, модель оптимизации ОБКП может быть представлена так.

Минимизируется показатель  $H$  при заданных ограничениях:

$$\sum_{q=1}^3 y_{iq} = d_i, \quad i \in I,$$

$$\sum_i a_{ji} y_{iq} - H^* A_{jq} \leq 0, \quad j \in J, \quad q = 1, 2, 3,$$

$$\sum_i c_{ri} y_{iq} - H^* B_{rq} \leq 0, \quad r \in R, \quad q = 1, 2, 3,$$

$$H \geq 1, \quad y_{iq} \geq d_{iq},$$

где  $a_{ji}$  — затраты мощности по группе оборудования  $j$  на единицу продукции  $i$ ,

$$A_{jq} = \sum_i a_{ji} \lambda_q d_i, \quad j \in J, \quad q = 1, 2, 3,$$

$A_{jq}$  — расчетный уровень равномерной загрузки мощности группы оборудования  $j$  по месяцам квартала  $q$ , исходя из количества рабочих дней по месяцам квартала;

$$B_{rq} = \sum_i c_{ri} \lambda_q d_i, \quad r \in R, \quad q = 1, 2, 3,$$

$c_{ri}$  — основная заработная плата ( $r = 1$ ) и материальные ресурсы вида  $r \in R, r \neq 1$ , на единицу продукции  $i$ ;

$B_{rq}$  — расчетный уровень равномерных прямых затрат  $r$  по месяцам квартала  $q$ , исходя из количества рабочих дней в месяцах;

$d_{iq}$  — обязательные поставки продукции  $i$  по месяцам  $q$ ;

$H-1$  — максимальная величина относительно отклонения от значений  $A_{jq}, B_{rq}$ .

Так, отклонения значения  $H$  от единицы на 3–5% вполне устраивают предприятия. На практике показатель неритмичности производства достигает 30–40%, что служит основой роста затрат на 3–5%.

Задача ОБКП предназначена для распределения программы производства по плановым периодам. При этом учитывается спрос на продукцию, ставится задача достижения равномерности производства (равномерная загрузка оборудования, достижение равномерного использования ресурсов). Задача уточняется для различных предприятий. Так, важно учесть показатель длительности производственного цикла (ДПЦ).

Следует отметить, что чем точнее постановка задач ОБКП и их решения, тем проще становится процесс принятия решений на следующих этапах управления в системе ОУП.

**Модель внутрифирменного объемно-календарного планирования с учетом длительности производственного цикла.** Особенностью модели объемно-календарного планирования является то, что в ней предусмотрено использование векторов затрат, выпуска продукции. Вектора затрат основаны на агрегации технологий во времени по изделиям [1, 3].

Вводятся обозначения:

$p = 1, 2, \dots, P, p$  — учетные периоды времени;  
 $x_{iq}$  — количество продукции  $i$ , которое запускается в производственный процесс в периоде  $q, i \in I;$   
 $q = a_p a_i + 1, \dots, b_i - T_i + 1,$   
 $a_i$  — раннее время запуска продукции  $i$  в производство,  $a_i \geq 1,$   
 $b_i$  — позднее время выпуска продукции  $i, b_i \leq P,$   
 $T_i$  — ДПЦ изделия  $i$ , выраженное в целых числах времени;

$f_{ik}(p)$  — кусочно-постоянные функции от времени, отражающие использование ресурсов  $k \in K = (K_1 \cup K_2 \cup K_3), K_1$  — обозначения ресурсов труда,  $K_2$  — обозначения, отражающие ресурсы оборудования,  $K_3$  — обозначения материалов.

Потребность в трудовых ресурсах и оборудовании учитывается так:

$$\sum_i \sum_q f_{ik}(p - q + 1) x_{iq} + V_{kp} = D_p r_k,$$

$$k \in (K_1 \cup K_2), \quad p = 1, 2, \dots, P,$$

$V_{kp}$  — время простоя  $k$ -го типа ресурсов в периоде  $p$ ;

$D_p$  — рабочие часы в периоде  $p$ ;  
 $r^k \leq r_k \leq R^k$ , возможности использования трудовых ресурсов и мощностей.

Использование материалов учитывается так:

$$\sum_n \sum_q f_{ik}(n - q + 1) x_{iq} = \sum_n S_{kn};$$

$$k \in K_3, \quad p = 1, 2, \dots, P;$$

$\sum_n S_{kn} \leq S_{kp}^*$  — возможности материального

обеспечения.

$$\sum_n Y_{in} \leq \sum_n W_{in}, \quad i \in I, \quad p = 1, 2, \dots, P,$$

$W_{in}$  — спрос на продукцию  $i$  в период  $n$ ,

$$Y_{in} = x_{i, n - T_i + 1}.$$

Прибыль

$$F_p = \sum_i u_i Y_{ip} - \sum_{k(1)} p_k (D_p r_k - V_{kp}) + y_k v_{kp} -$$

$$- \sum_{k(2)} p_k D_p r_k - \sum_{k(3)} \delta_k S_{kp} - z_p,$$

где  $u_i$  — цена продукции  $i$ ;

$p_k, k \in K_1$ , — оплата труда за принятую единицу времени;

$y_k$  — оплата простоя за единицу времени;

$p_k, k \in K_2$ , — норматив амортизации и стоимости работы оборудования за единицу времени;

$\delta_k$  — стоимость единицы материалов типа  $k$ ;

$Z_p$  — накладные затраты за период  $p$ .

$$\sum_p F_p \rightarrow \max.$$

Основным недостатком данной модели является то, что технологические вектора (кусочно-постоянные функции) в ходе решения задачи остаются постоянными, что приводит к плановым простоям оборудования, росту затрат трудовых ресурсов. Поэтому представленная модель оптимизации не приведет к повышению эффективности производства в должной мере. Нужна более совершенная постановка задачи.

**Межцеховое оперативно-календарное планирование.** Представим систему межцехового оперативно-календарного планирования (ОКП), способную решать основную задачу исследований операций [4]. Как уже показано, с помощью модели ОБКП решается задача формирования производственной программы по временным периодам с учетом спроса по продукции. Далее по календарным временным периодам формируется план равномерного выпуска готовой продукции по сменам (суткам, неделям, месяцам) со сборочных участков. Такому плану ставится в соответствие поступление на сборку готовых партий деталей, сборочных узлов. Ориентируясь на план выпуска готовой продукции, строится оперативный календарный план (ОКП) выполнения операций в последовательности, обратной технологичной, с учетом загрузки ведущих, лимитирующих групп оборудования на участках и в цехах. Такая модель позволяет согласовать календарные планы с тактическими. Коротко представим описание модели задачи ОКП.

В межцеховом ОКП активно используются нормативы опережения запуска выпуска для партий деталей на участках, цехах. Подобный алгоритм достаточно прост для планирования в системах ОУП. При этом формируется график работ без перегрузки мощностей. Если в системе ОУП учитываются все деталиеоперации, то размерность модели существенно возрастает. Решает проблему учет только наиболее важных деталиеопераций, которые выполняются на ведущих, лимитирующих группах оборудования. Длительность всех других работ учитывается приближенно.

Ведущей группе оборудования  $j$  ставится в соответствие ее возможность (например количеством станков) в заданную единицу времени  $t - M_{jt}$ . Через  $a_{jk}$  ( $a_{jkp}$ ) обозначим длительность выполнения операций для всей партии деталей  $k$  на оборудовании ведущей группы  $j$  (в плановых единицах времени). Длительность выполнения всех работ для партии  $p$  деталей  $k$  на участке  $jk$  обозначим через  $\tau_{jk} = \tau_{jk1} + a_{jk} + \tau_{jk2}$ , где  $\tau_{jk1}$  — длительность работ от начала до ведущей операции,  $\tau_{jk2}$  — длительность работ после ведущей операции до перехода партии деталей на следующий участок.

Когда партия деталей «загружает» ведущую группу оборудования, то работа по другим парти-

ям деталей задерживается. Увеличение длительности работ дорогих деталей приводит к увеличению их себестоимости. Поэтому деталям ставятся в соответствие приоритеты, которые используются для принятия решений [4, 9].

Данное межцеховое ОКП (представленное как имитационное моделирование) фиксирует план-график производства  $G_{jkp} = \{n_{kp}, Z_{jkp}, V_{jkp}\}$  для всех участков  $j$  на длительность горизонта прогнозного плана:  $n_{kp}$  — заданный норматив размера партии  $p$  деталей  $k$ ,  $Z_{jkp}$  — рекомендательное время запуска партии  $p$  деталей  $k$  на группе оборудования  $j$ ,  $V_{jkp}$  — обязательные сроки выпуска. Через горизонт планирования (сутки, неделя, месяц, ...) план-график полностью пересматривается. Учитывается принцип скользящего формирования планов производства. План работ уменьшается на график уже выполненных операций, но составляется план на новый период. Вновь согласуется все производство со сборкой. Построение графика работ основано на использовании имитационной модели, отражающей выполнение технологического процесса и его стохастичность (планы-графики пересчитываются через короткие промежутки времени — через неделю, месяц). Обеспечивается построение допустимого плана производства: план составляется по ведущим группам оборудования, перегрузка мощностей не допускается, при построении графика работ используется принцип «точно вовремя». Построение производственного плана-графика обеспечивает расчет потребности в ресурсах во времени.

Таким образом, использование имитационной модели ОКП производства позволяет формировать план-график хода партий деталей по ведущим операциям. Алгоритм ОКП обеспечивает осуществление ОУП для предприятия в целом. Производственные участки получают наиболее важную информацию — сроки запуска и выпуска партий деталей на ведущих группах оборудования. Сокращается размерность задачи, адекватность ее решения не ухудшается. Однако характер оптимизации приближенный, так как сам алгоритм расчетов не отражает стохастичность системы в полной мере, не учитывается все множество деталиеопераций.

**Оптимизационная модель оперативно-календарного планирования.** Для имитационной модели ОКП готовится наиболее важная информация. Такая информация может быть использована и при формировании оптимизационной задачи, которая учитывает основные условия в исследовании операций [10]. Все модели календарного планирования содержат условия известной задачи С. Джонсона. Ее постановка дана Р. Беллманом [10]. Проблема задачи ставится следующим образом. Необходимо сформировать план-график работ

заданного количества, выполняемых на определенных группах оборудования. Технология производства задана. Функция цели — минимум общего времени выполнения работ, объема оборотных активов. Такая задача совпадает с поставленными условиями в межцеховом ОКП.

Алгоритм С. Джонсона решает проблему только для двух групп оборудования. Эффективный оптимизационный алгоритм для трех и более групп оборудования построить не удалось. Поставленная далее задача ОКП решает в какой-то степени такую важную для производства проблему.

Итак, система ОКП в первую очередь определяет количество партий  $p$  готовых деталей  $k$ , которое следует подать на сборку. Размеры партий деталей фиксированы —  $n_{kp}$ . Для партий деталей задан срок их подачи на сборку —  $V_{jk^*, p}$ . Индекс  $*$  соответствует тому, что речь идет о завершающей группе оборудования, с которой партии готовых деталей поступают на сборку. Отсюда можно определить нарастающим итогом необходимую величину поступлений на сборку готовых деталей —  $B_{kt}$ .

Обозначим через  $x_{jkptv}$  целочисленные переменные, принимающие значения 1, когда модель задает выпуск партии  $p$  деталей  $k$  на ведущей группе оборудования  $j$  в момент времени  $t$ . Индекс  $v$  соответствует технологической последовательности обработки деталей. Учитываются ведущие группы оборудования,  $v = 1, 2, 3, \dots, v^*$ . При этом индекс  $v^*$  отражает последний участок производства (ведущую группу оборудования). Значение  $x_{jkptv} = 0$ , когда нет выпуска партии деталей.

Представим ограничения в модели ОКП.

Обеспеченность сборки деталями нарастающим итогом:

$$\sum_{q=1}^t \sum_p n_{kp} x_{jkpqv^*} - y_{kt} = B_{kt}, k \in K, t = 1, 2, 3, \dots$$

Здесь  $y_{kt}$  — сверхплановые запасы готовых деталей.

Ограничения по мощностям:

$$\sum_{k,r,p} m_{jkpr} x_{jkptv} \leq M_{jt}, j \in J, t = 1, 2, 3, \dots,$$

$$m_{jkpr} = m_{jkp}, r = \{t, t-1, \dots, t-a_{jkp} + 1\},$$

$$m_{jkpr} = 0, r \neq \{t, t-1, \dots, t-a_{jkp} + 1\}.$$

Возможность группы оборудования  $j$  задана количеством станков  $M_{jt}$ . Можно учесть количество рабочих мест, рабочих центров. Тогда  $m_{jkpr}$  — количество одновременно используемых станков группы  $j$ ,  $a_{jkp}$  — длительность обработки  $p$  партии деталей  $k$ ,  $r$  — начало обработки.

В модели зафиксирована технологическая последовательность выполнения операций, задано

минимальное время пролеживания и обработки партий деталей между ведущими операциями:

$$\sum_t (t_{v+1}) x_{jkpt, v=1} - \sum_t (t_v) x_{jkptv} \geq a_{jkp} + \tau_{jk2v} + \tau_{jkl, v+1};$$

$$k \in K; p = 1, 2, \dots; v = 1, 2, 3, \dots, v^* - 1,$$

$\tau_{jk2v} + \tau_{jkl, v+1}$  — минимальная длительность выполнения работ между ведущими операциями;

$(t_{v+1}) - (t_v)$  — время, определяющее длительность комплекса работ по детали  $k$  от операции  $v$  до  $v+1$ ,

$t_v^* - t_1$  — время выполнения всего комплекса работ, от первой операции до последней (партии деталей  $k$ ).

На всех операциях детали  $k$  планируется одинаковое количество производства партий:

$$\sum_t x_{jkpt, y+1} - \sum_t x_{jkptv} = 0, k \in K;$$

$$p = 1, 2, \dots; v = 1, 2, 3, \dots, v^* - 1.$$

Критерий оптимизации — минимум уровня оборотных активов, времени выполнения всех операций. Это отражается следующим образом:

$$\sum_k c_k y_{kt} + \sum_k c_{kp} \left( (t_{v+1}) \sum_t x_{jkptv^*} - (t_v) \sum_t x_{jkptv} \right) \rightarrow \min.$$

$c_k$  — себестоимость детали  $k$ ;

$c_{kp}$  — средняя себестоимость  $p$ -ой партии деталей  $k$ .

В данной модели (отражающей частично целочисленное программирование) задано множество временных вариантов выполнения операций на ведущих группах оборудования. Выбирается один из вариантов выпуска партий деталей. Такую задачу успешно можно решить с помощью программного обеспечения [11]. Эффективность решения такой задачи показана в [4]: период времени планирования — квартал, единица времени — сутки, количество переменных — 3061, целочисленных переменных — 1136, ограничений — 2244.

Использование оптимизационной модели достаточно широко: оценка эффективности разработки других алгоритмов ОКП, решение сложных производственных задач на машиностроительных, приборостроительных предприятиях серийного, мелкосерийного, единичного производства.

**Согласование тактических планов работы предприятия с оперативным управлением производства сложных изделий с длительным технологическим процессом.** При разработке планов технической подготовки производства на предприятиях часто используют сетевое планирование. С помощью его составляется план-график, связанный с разработкой новой продукции, отражающий формирование высокотехнологич-

ных инновационных производственных процессов. При этом применение сетевого планирования позволяет определить длительность выполнения работ, интенсивность их проведения, уровень использования возможностей, связанных с мощностями, трудовыми и материальными ресурсами. Например, сетевое планирование успешно используется в НПО «ЭЛСИБ» ПАО.

Однако увеличение объемов, номенклатуры продукции затрудняет использование сетевого планирования. Возникает сложная задача, связанная с учетом использования ресурсов. Сдвиги работ уменьшают их наложение в одном рабочем месте, но возникают в других. Оказалось, что для решения таких задач нет эффективных алгоритмов их решения. Таким образом, наличие ограничений на ресурсы в сетевом планировании существенно усложняет задачу принятия решений.

Представим решение такой проблемы на основе оптимизационного согласования задач оперативно-календарного и сетевого планирования с учетом координации с тактическими планами.

Представим методологический алгоритм решения проблемы. Пусть выпускается несколько изделий в заданном периоде. Для продукции построены сетевые графики выполнения работ. Заданы длительность и величина затрат ресурсов по работам от одной вершины к другой. Каждой работе ставится в соответствие множество одинаковых вариантов (можно поставить задачу с не одинаковыми вариантами) реализации работ во времени. Однако выбирается один вариант. Задана последовательность выполнения работ. Из вершины работа может выходить только после выполнения всех работ, входящих в данную вершину. Критерий оптимизации — минимум отклонений сроков выполнения всех работ от плана производства и продаж.

Таким образом, основой методологического подхода к решению указанной задачи является системная связность тактического и оперативного управления. Моделирование оперативного управления производством становится основой такого условия. Представим такую интеграционную модель более подробно.

Пусть выпускается  $K$  изделий,  $k = 1, 2, \dots, K$ , в плановый период  $T$ ,  $t = 1, 2, \dots, T$ . Сетевой график для изделия  $k$  имеет  $n$  вершин. Длительность работ —  $t_{kij}$ . В модели описание идет относительно детали  $k$ . Это позволяет в некоторых случаях для упрощения записи этот индекс опускать. Начало работы — в вершине  $i$ , окончание — в вершине  $j$ ,  $i$  и  $j = 1, 2, \dots, n$ . Продолжительность работы  $t_{ij} = t_{ij1} + h_{ij} + t_{ij2}$  учитывается по всем операциям и пролеживаниям:  $t_{ij1}$  — время работы от вершины  $i$  до ведущей операции,  $t_{ij2}$  — после ведущей опера-

ции до вершины  $j$ ,  $h_{ijm}$  — продолжительность ведущей операции на оборудовании  $m$ ,  $m = 1, 2, \dots, M$ .

Возможности предприятия определяют мощности и рабочие. Ресурсы взаимосвязаны, поэтому  $h_{ijm}$  отразим с учетом этого обстоятельства. Работа  $ij$  выполняется  $a_{ijm}$  работниками за  $h_{ijm}$  единиц времени.  $A_m$  рабочих работают на группе оборудования  $m$ . Таким образом, возможности рабочего места  $m$  определяют указанные параметры.

Обозначим через  $x_{ijr}$  переменную, принимающую значение 1, когда работа  $ij$  начинается с периода  $r$ ,  $r = 1, 2, \dots$  Из заданного множества вариантов работ принимается только один из них:

$$\sum_r x_{ijr} = 1, \quad i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, n.$$

Возможности производства:

$$\sum_{i,k} a_{ijmkt} x_{ijr} \leq A_{mt}, \quad t = \{r, r+1, \dots, r+h_{ijm}-1\},$$

$$a_{ijmkt} = a_{ijmk}, \quad t = \{r, r+1, \dots, r+h_{ijm}-1\},$$

в противном случае  $a_{ijmkt} = 0$ .

Последовательность выполнения работ:

$$(t_{ij1} + r + h_{ij} - 1 + t_{ij2}) x_{ijr} \leq T_j, \quad j = 1, 2, \dots, n,$$

$$(t_{ij1} + r + h_{ij} - 1 + t_{ij2}) x_{ijr} \geq T_i, \quad i = 1, 2, \dots, n.$$

К периоду  $T_j$  все работы, которые проходят через узел  $j$ , завершаются. Параметр  $T_{nk}$  — время завершения всех работ  $k$ . Предельный срок выпуска изделия  $k$  —  $D_{nk}$ . Превышение сроков выпуска  $H_k$  изделия  $k$  над планом:

$$T_{nk} - D_{nk} - H_k + H^k = 0.$$

Критерий оптимизации —  $\sum_k H_k C_k \rightarrow \min$ ,

$C_k$  — средняя себестоимость изделий  $k$  (от заготовительных производств до выпуска готовой продукции).

Критерий отражает минимум оборотных активов, времени завершения всех работ. Такая функция цели отражает максимальную результативность функционирования системы ОУП.

Параметры  $x_{inrk}$  согласуют множество экономических показателей продукции: цены, себестоимость, уровень оборотных активов и др. Эти и другие показатели способствуют эффективной организации планирования деятельности предприятий.

Ограничения на ресурсы в сетевом планировании могут быть учтены в задаче линейного частично целочисленного программирования [11]. В задачах оптимизации, сетевом планировании параметры  $h_{ijm}$  — целые числа. Такое бывает редко. Подобная ситуация приводит к неточности расчетов.

Размерность задачи уменьшается за счет объединения работ  $ij$  в комплексы операций. В комплексы объединены и ведущие операции. Длительность их выполнения отражается значениями  $h_{ijm}$ . Выполнение по времени комплекса работ  $ij$  оценивается количеством в принятых единицах (не в целых числах) времени. Таким образом, проблема решения задачи с учетом не целых значений  $h_{ijm}$  представляется сложной задачей, решение которой может быть осуществлено оригинальным образом.

Пусть единицей времени является месяц, а  $h_{ijm} < 1$ . Вводятся две новые переменные  $y_{kij, r}$ ,  $y_{kij, r+1}$ . В сумме они соответствуют значению  $h_{ijm}$ . Работа может быть выполнена в периоде  $r$ , либо в периодах  $r$  и  $r + 1$ . Выполнение работы возможно также в периоде  $r + 1$ . Новую ситуацию можно представить следующей системой ограничений:

$$\sum_{i,k} a_{ijmkt} y_{kij,r} \leq A_{mt}, \quad \sum_{i,k} a_{ijmkt} y_{kij,r+1} \leq A_{m,t+1},$$

$$t = \{r, r + 1, \dots, r + h_{ijm} - 1\},$$

$$a_{ijmkt} = a_{ijmk}, \quad t = \{r, r + 1, \dots, r + h_{ijm} - 1\},$$

в противном случае  $a_{ijmkt} = 0$ .

$$y_{kij,r} + y_{kij,r+1} = h_{ijm}; \quad r = 1, \dots, T - 1; \quad m = 1, 2, \dots, M.$$

Если  $h_{ijm} \geq 1$ , то одна переменная  $y_{kij,r}$  приравнивается 1 (или  $A_{mt}$ ), а в систему добавляется новая переменная  $y_{kij,r+2}$  и т. д.. Данными ограничениями работа  $kij$  сохраняется как единое целое, либо рабо-

та расположена в двух соседних временных интервалах. С переменными  $y_{kij,r}$ ,  $y_{kij,r+1}$  связаны и другие ограничения. Проведение практических расчетов показало эффективность рассмотренного подхода [12].

**Заключение.** Представленный в работе методологический подход обеспечивает согласованность моделей тактического, оперативного управления производством. Это позволяет наладить изготовление сложных изделий с длительным циклом технологического процесса. В исследовании представлена разработка комплекса моделей оптимизации, который согласовывает задачи объемно-календарного, оперативно-календарного и сетевого планирования. Трудности решения рассматриваемой проблемы связаны с созданием модели оперативно-календарного планирования, которая отражает технологический процесс по ведущим группам оборудования, информация для них поступает из сетевого планирования. В сетевом планировании отражаются как технология производства, так и ограничения на ресурсы. В работе представлен также оригинальный подход, учитывающий любую длительность операций, и не кратной выбранной единице времени. Такой результат повышает адекватность приближения модели к реальности. Проблема сведена к задаче линейного частично целочисленного программирования. Решение задачи вполне осуществимо с помощью программного обеспечения [11].

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Плещинский А. С. Оптимизация межфирменных взаимодействий и внутрифирменных управленческих решений. М.: Наука, 2004. 254 с.
2. Мауэргауз Ю. Е. «Продвинутое» планирование и расписания (AP&S) в производстве и цепочках поставок. М.: Экономика, 2012. 574 с.
3. Данилин В. И. Финансовое и операционное планирование в корпорации. Методы и модели. М.: Дело; РАНХиГС, 2014. 616 с.
4. Титов В. В. Оптимизация управления промышленной корпорацией: вопросы методологии и моделирования. Новосибирск: ИЭОПП СО РАН, 2007. 256 с.
5. Безмельницын Д. А. Проблемы согласования стратегического и оперативного управления при производстве сложных изделий с длительным циклом технологического процесса // Инновационная фирма: теория и практика развития / под ред. В. В. Титова, В. Д. Марковой. Новосибирск: Изд-во ИЭОПП СО РАН, 2011. С. 254–260.
6. Porter M. What is strategy? // Harvard business review. november/december. Vol. 74, N 6. 1996. P. 61–78.
7. Charan Ram and Colvin Geoffry. Why CEO is fail // Fortune, 21. June 1999. 68–78.
8. Каплан Р., Нортон Д. Награда за блестящую реализацию стратегии. Связь стратегии и операционной деятельности — гарантия конкурентного преимущества. М.: Олимп-Бизнес, 2010. 368 с.
9. Чейз Р. Б., Джейкобс Р. Ф., Аквилано Н. Дж. Производственный и операционный менеджмент, 10-е изд. / пер. с англ. М.: Вильямс, 2007. 1184 с.
10. Bellman R. Mathematical aspects of scheduling theory // J. Soc. Industr. and Appl. Math. T. 4. N 3. 1956. P. 167–190.
11. Забияко Г. И. Пакет программ целочисленного программирования // Дискретный анализ и исследование операций. Серия 2. Т. 6. № 2. 1999. С. 32–41.

12. Титов В. В., Безмельницын Д. А. Оптимизация согласования оперативного управления сложным производством со стратегическими планами предприятия // Экономика и математические методы. 2015. Т. 51, вып. 3. С. 102–108.

## REFERENCE

1. Pleshchinsky A. S. Optimization of inter-firm interactions and intra-firm management decisions. Moscow: Nauka, 2004. 254 p.
2. Mauergauz Yu. E. “Advanced” planning and schedules (AR&S) in production and supply chains. M.: Economics. 2012. 574 p.
3. Danilin V. I. Financial and operational planning in the Corporation. Methods and models. M.: Del’ Ranepa, 2014. 616 p.
4. Titov V. V. Optimization of industrial Corporation management: issues of methodology and modeling. Novosibirsk: ieopp SB RAS, 2007, 256 p.
5. Bezmelnitsyn D. A. Problems of coordination of strategic and operational management in the production of complex products with a long cycle of technological process // Innovative firm: theory and practice of development / Under the editorship of V. V. Titov, V. D. Markova. Novosibirsk: IEPP SB RAS publishing house, 2011, Pp. 254–260.
6. Porter M. What is strategy? // Harvard business review, 1996, november/december. 1996. Vol. 74, N 6. P. 61–78.
7. Charan Ram and Colvin Geoffry. Why CEO is fail // Fortune, 21. June 1999. 68–78.
8. Kaplan R., Norton D. Award for brilliant implementation of the strategy. The link between strategy and operations is a guarantee of competitive advantage. Moscow: Olymp-Business CJSC, 2010. 368 p.
9. Chase R. B., Jacobs R. F., Aquilano N. J. Production and operational management, 10th ed. Per. s Engl. M.: Williams, 2007. 1184 p.
10. Bellman R. Mathematical aspects of scheduling theory // J. Soc. Industr. and Appl. Math. 1956. T. 4. N 3. P. 167–190.
11. Zabinyako G. I. Package of integer programming programs // Discrete analysis and research of operations. Series 2. Vol. 6. No. 2. 1999. Pp. 32–41.
12. Titov V. V., Bezmelnitsyn D. A. Optimization of coordination of operational management of complex production with strategic plans of the enterprise // Economics and mathematical methods. 2015. Vol. 5.

Поступила в редакцию: 20.04.2020.

Принята к печати: 22.05.2020.