**МАТЕМАТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ
ЭКОНОМИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ**

**ОПТИМИЗАЦИЯ СОГЛАСОВАНИЯ ОПЕРАТИВНОГО
УПРАВЛЕНИЯ СЛОЖНЫМ ПРОИЗВОДСТВОМ
СО СТРАТЕГИЧЕСКИМИ ПЛАНАМИ ПРЕДПРИЯТИЯ**

© 2015 г. В.В. Титов, Д.А. Безмельницын

(Новосибирск)

В работе представлен методологический подход к согласованию стратегического и оперативного управления для серийного производства сложных изделий с длительным технологическим циклом производства на основе совмещения задач оптимизации объемно-календарного, оперативно-календарного и сетевого планирования.

Ключевые слова: оперативное управление производством, стратегическое управление, оптимизация, сетевое планирование, календарное планирование, согласование.

Классификация JEL: L23.

1. ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ И ПРЕДЛАГАЕМЫЙ ПОДХОД К ЕЕ РЕШЕНИЮ

В современных системах управления промышленными предприятиями все большее внимание уделяется операционным стратегиям (Данилин, 2006; Мауэргауз, 2012; Плещинский, 2004; Титов, 2013). Именно операционные стратегии обеспечивают реализацию стратегического управления на предприятиях. Поэтому эффективность работы промышленного предприятия во многом зависит от используемой на заводе системы оперативного управления производством (ОУП). Нарушение ритмичности производства приводит к значительным потерям, особенно в машиностроении. Выбор наиболее эффективной системы должен получить научное обоснование с учетом опыта существующих разработок.

Система ОУП строится вокруг обязательного соблюдения сроков и объемов поставок продукции потребителям в соответствии со стратегическими планами развития предприятия и производства, обеспечивая при этом минимум уровня незавершенного производства и затрат, а также координацию хода производства по участкам и цехам предприятия.

В данной работе представлена идеология построения системы ОУП для предприятий электротехнической промышленности, работающих для удовлетворения фактического спроса. Электрические машины большой мощности слишком дороги, а длительность производственного цикла (ДПЦ) велика, чтобы начать их производство без заключения договоров. Именно для таких условий производства в данной работе рассмотрен подход создания эффективной системы стратегического и тактического управления, совмещенный с оперативным управлением производством.

При производстве сложных машин часто применяется сетевое планирование, которое позволяет представить временной график производства машины, продолжительность выполнения работ, уровень загрузки оборудования и трудовых ресурсов, определить потребность в материальных ресурсах к началу выполнения тех или иных работ. Такой комплекс ОУП успешно используется на ОАО НПО “ЭЛСИБ” в Новосибирске (Безмельницын, 2010).

Однако при увеличении объемов производства и продаж продукции, выпуске нескольких видов электрических машин разного назначения производство ориентируется на сроки продаж и мощности, причем сетевые графики технологических процессов накладываются друг на друга. Это приводит в отдельные периоды времени к перегрузке мощностей и трудовых ресурсов. Отдельные операции внутри работ, состоящих из одной или нескольких операций, внутри сетевых

графиков приходится сдвигать, что является трудной задачей (устранение наложения операций на одном рабочем месте чревато возникновением подобных же накладок на другом) планирования, для решения которой пока нет эффективного алгоритма. Следовательно, сетевое планирование при ограниченных ресурсах становится сложнейшей задачей математического программирования.

Приближенное решение проблемы согласования во времени загрузки оборудования, использования трудовых и материальных ресурсов при планировании производства разных машин предложено в (Данилин, 2006; Плещинский, 2004; Титов, 2013); авторы предложили осуществлять оптимизационное планирование производства на *основе агрегированных технологий*. При таком подходе затраты производственных ресурсов на единицу продукции задаются во времени, т.е. по некоторым дискретным периодам, в сумме составляющим производственный цикл. Такой вектор затрат – агрегированную технологию – можно построить для производства каждой единицы продукции (каждого заказа) на основании сетевого графика. Интенсивность использования мощностей и трудовых ресурсов для обработки изделия на группе оборудования задается с учетом ДПЦ на основе такой агрегированной технологии.

Однако данный подход создает жесткие условия для реализации технологического процесса, что сужает область допустимых решений. Поэтому предлагается воспользоваться сетевым планированием, но с учетом возможности сдвигать время выполнения отдельных операций и в целом работ относительно друг друга, выделяя узкие места производства, как это принято делать при оперативно-календарном планировании (Плещинский, 2004; Титов, 2013; Безмельницын, 2010). В таком случае для любой операции, представленной в сетевом графике производства детали или узла, длительность обработки остается прежней, но при этом выделяется *ведущая операция*, которая выполняется на лимитирующей производство группе оборудования (рабочем месте). Фиксируется также продолжительность обработки детали или узла до и после основной лимитирующей операции. Выделение только ведущих операций резко снижает размерность решаемой задачи, и это дает возможность планировать равномерную загрузку лимитирующих групп оборудования и рабочих.

Методически этот процесс можно представить таким образом. Пусть за определенный плановый период необходимо выпустить несколько изделий. Для каждого изделия построен сетевой график выполнения работ (комплекса операций). В вершинах сетевого графика часть одних работ завершается, а других – начинается. Наиболее раннее начало работ – в первой вершине, завершение наиболее поздних работ – в последней. Продолжительность каждой работы условно принимается за расстояние от одной вершины до другой, – и она задана. Эти параметры определяют длительность обработки по работам технологического процесса с учетом пролеживания между отдельными процессами, транспортировки, технологических и страховых опережений до выполнения ведущей операции и после нее – до завершения работы, продолжительность ведущей операции на соответствующей группе оборудования.

С целочисленной переменной, принимающей значения 0 или 1, связано начало работы с определенного момента времени. Для каждого вида работ в исходной информации задается некоторое дискретное множество вариантов ее выполнения. При этом каждая работа должна быть выполнена только в одном варианте. Фиксируются ограничения на использование возможностей производства для всех видов работ и изделий во времени; жестко фиксируется последовательность работ: *выход* из любой вершины работы может начаться только после того, как выполнены все работы, *входящие* в данную вершину. Для каждого изделия задан предельный срок его выпуска. *Критерий оптимизации* – минимум незавершенного производства при выполнении стратегических планов продаж продукции.

Для стратегического управления на базе указанной системы ОУП для заданного периода времени определяется возможный объем выпуска продукции с учетом спроса на продукцию и внедрения различных нововведений (ввод мощностей, новых технологий и др.). За планируемый период максимизируется чистая прибыль, чистый дисконтированный доход, определяющий прирост стоимости компании на рынке, и др. При этом продажи продукции могут быть запланированы только в том случае, если система ОУП обеспечила выход готовой продукции.

Таким образом, наш методологический подход к решению указанной проблемы состоит в том, чтобы *одновременно решать задачи стратегического и оперативного управления деятельностью предприятия*. Ядром такой системы управления становится модель оперативного управления производством. Поэтому на ее постановке мы остановимся более подробно.

Система ОУП ориентируется на фактический спрос. Так работают предприятия тяжелого машиностроения, например электротехнической промышленности. Электрические машины большой мощности хотя и выпускаются единицами, но их изготовление повторяется, как только появляется новый заказ, что позволяет говорить о серийном производстве.

При планировании для каждой партии деталей, изготавливаемых в каком-либо цехе (участке) относительно следующего (согласно технологическим переходам) цеха (участка), устанавливается опережение по запуску и выпуску.

Планово-учетной единицей является комплект одноименных деталей. Эта система наиболее широко распространена в производстве. Подходит она и для рассматриваемого нами производства. Выпуск готовой продукции реально осуществляется не партиями, а поштучно. Поэтому для каждого заказа можно построить план выпуска деталей и узлов для сборки готового изделия с учетом опережений.

Система ОУП, основанная на планировании с учетом опережений, является наиболее простой. Ее принцип использован во всех существующих разработках. Однако задача построения эффективной системы ОУП заключается в преодолении внутренних проблем такой системы.

В электротехнической промышленности при производстве сложных машин часто применяется сетевое планирование (Безмельницын, 2010). Фактически это – тот же временной график производства изделия, который применяется и в системах ERP (enterprise resource planning) (Гаврилов, 2003), но он – менее детализированный.

Учитывая сложность решения задачи сетевого планирования с ограничениями на ресурсы, следует воспользоваться постановкой оптимизационной задачи оперативно-календарного планирования. Такое построение системы ОУП существенно расширяет возможности математического программирования для решения столь важной для практики задачи.

Обычно решение задач сетевого планирования без ограничения по ресурсам сводится к нахождению критического пути, что не представляет особого труда. Однако, как отмечалось выше, задача становится более сложной при выполнении одновременно нескольких проектов и с учетом ограничений ресурсов. Решение такой задачи можно получить на основе имитационного моделирования, когда выполнение работ планируется от текущего момента времени к срокам выпуска готовых изделий или с помощью оптимизационного планирования (Плещинский, 2004; Титов, 2013), применяемого при календарном планировании единичного и серийного производства.

2. СОГЛАСОВАНИЕ ОПЕРАТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ ПРОИЗВОДСТВОМ СО СТРАТЕГИЧЕСКИМИ ПЛАНАМИ ПРЕДПРИЯТИЯ

Пусть необходимо выпустить K , $k = 1, \dots, K$, изделий за определенный плановый период времени T , $t = 1, \dots, T$. Для каждого изделия k построен сетевой график выполнения работ. Для упрощения пояснений приведем описание сетевого графика без индекса k . В сетевом графике имеется n вершин. В таких вершинах часть работ завершается, а другие работы начинаются. Продолжительность каждой работы ij , начинающейся в вершине i и заканчивающейся в вершине j , задана – t_{ij} , i и $j = 1, \dots, n$. При этом параметры t_{ij} представляются следующим образом: $t_{ij} = t_{ij1} + h_{ijm} + t_{ij2}$, где t_{ij1} – длительность обработки по операциям технологического процесса (с учетом пролеживания, транспортировки, технологических страховых опережений по времени для работы ij до ведущей операции), а t_{ij2} – после ведущей операции до завершения работы ij ; h_{ijm} – продолжительность работы по ведущей операции на группе оборудования (рабочем месте) m , $m = 1, \dots, M$.

Таким образом, параметры t_{ij1} и t_{ij2} отражают минимальное время выполнения части работы ij без использования дефицитных ресурсов. Указанные параметры учитываются только в техно-

логическом времени обработки. Длительность h_{ijm} использования дефицитного ресурса определяет то время, в течение которого никакая другая работа выполняться не может, а следовательно, необходимо ввести ограничения, учитывающие подобные условия, которые приводят к сдвигу других работ на время h_{ijm} . Однако в группе оборудования m может планироваться и параллельное выполнение нескольких однотипных работ.

Пусть основными ресурсами, ограничивающими выполнение работ, являются мощности и рабочие на соответствующих группах оборудования (рабочих местах). Так как эти ресурсы взаимосвязаны, то ограничение возможностей выполнения работ по ведущей операции в течение времени h_{ijm} опишем на основе следующей информации. Для выполнения ведущей операции при выполнении работы ij в каждую единицу времени необходимо наличие a_{ijm} работников (в одну или в две смены). Количество оборудования на рабочем месте m позволяет одновременно работать A_m рабочим. Следовательно, именно эти два параметра определяют производственные возможности (мощность) рабочего места m .

Обозначим через x_{ijr} целочисленную переменную, принимающую значения 0 или 1. Если $x_{ijr} = 1$, то это значит, что работа ij должна начинаться в период времени r , $r = 1, 2, \dots$. Для каждой работы в исходной информации задается некоторое дискретное множество вариантов ее выполнения (задается время возможного начала работы). При этом работа ij должна быть выполнена только в одном из вариантов:

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

Ограничение на использование возможностей производства всех изделий K во времени может быть записано следующим образом:

$$\sum_{i,k} a_{ijmkt} x_{kijr} \leq A_{mt}, \quad t = \{r, r+1, \dots, r+t_{kij}-1\};$$

$$a_{ijmkt} = a_{ijmk}, \quad t = \{r+t_{kij1}, \dots, r+t_{kij1}+h_{kijm}-1\},$$

в противном случае $-a_{ijmkt} = 0$.

Таким образом, с периода r до $r+t_{kij1}-1$ значения $a_{ijmkt} = 0$, т.е. учитывается только часть длительности производства, но не затрагиваются мощности группы оборудования m . С периода $r+t_{kij1}$ до времени $r+t_{kij1}+h_{kijm}-1$ учитываются возможности группы оборудования m . Если в какой-то из периодов времени мощности уже используются, просматривается возможность выполнения работы с другого периода r .

Выполнение условий последовательного производства работ может быть задано следующей системой ограничений:

$$(r+t_{kij}-1)x_{kijr} \leq T_{kj}, \quad j = 1, \dots, n;$$

$$rx_{kijr} \geq T_{ki}, \quad i = 1, \dots, n; k = 1, \dots, K.$$

Здесь T_{kj} – срок завершения всех работ, которые проходят через узел j , в вершине j работа ji может начаться не раньше срока T_{ki} .

Для изделия k параметр T_{kn} определяет время завершения всех работ. С этим временем увязываются сроки продаж продукции, определяются объемы продаж во времени, другие технико-экономические и финансовые показатели. Задано и время желательного выпуска D_{kn} изделия k (на основе договоров и резервов времени выполнения). Время превышения сроков выполнения работ H_k определяется из соотношения $T_{kn} - D_{kn} - H_k + H^k = 0$. Тогда один из критериев оптимизации можно записать так: минимизируется сумма отклонений H_k с учетом себестоимости C_k готовых изделий $\sum_k H_k C_k \rightarrow \min$. Такому критерию соответствуют приближенно минимум незавершенного производства и минимум времени выполнения всех работ. Могут быть использованы любые другие целевые установки.

Таблица. Представление части решения задачи оперативного управления производством

Выполнение ограничений	Месяц планирования					
	1	1	2	2	3	3
Выполнение первых работ изделий на первой группе оборудования по месяцам						
Уровень загрузки оборудования – 0,92 $y_1 = 1$ – степень выполнения первой работы	0,76 $y_{1,1,1}$ $1 = y_{1,1,1}$	0,76 $y_{2,1,1}$				
Уровень загрузки оборудования – 1 $y_2 = 1$ – степень выполнения первой работы второго изделия		0,21 = $y_{2,1,1}$	0,76 $y_{2,1,1,2}$ 0,79 = $y_{2,1,1,2}$	0,76 $y_{3,1,2}$		
Уровень загрузки оборудования – 1 $y_3 = 1$ – степень выполнения первой работы третьего изделия				0,53 = $y_{3,1,2}$	0,76 $y_{3,1,2,3}$ 0,47 = $y_{3,1,2,3}$	0,76 $y_{4,1,3}$
Степень выполнения первой работы четвертого изделия в третьем месяце – 0,84						0,84 = $y_{4,1,3}$
Выполнение вторых работ изделий на второй группе оборудования по месяцам						
Уровень загрузки оборудования – 0,16 ≤ 0,24 – допустимый уровень	0,58 $y_{1,2,1}$					
Уровень загрузки оборудования – 1 $y_4 = 1$ – степень выполнения второй работы первого изделия	0,28 = $y_{1,2,1}$		0,58 $y_{1,2,1,2}$ 0,72 = $y_{1,2,1,2}$	0,58 $y_{2,2,2}$		
$y_5 = 1$ – степень выполнения второй работы второго изделия				1 = $y_{2,2,2}$		
Уровень загрузки оборудования – 0,58 $y_6 = 1$ – степень выполнения второй работы третьего изделия					0,58 $y_{3,2,3}$ 1 = $y_{3,2,3}$	

Таким образом, задача сетевого планирования с ограничениями на ресурсы сведена к задаче линейного целочисленного программирования, решение которой вполне осуществимо, например, с помощью программного обеспечения (Забиняко, 1999, с. 32–41).

3. УТОЧНЕНИЕ МОДЕЛИРОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА

В рассмотренной постановке задачи предполагается, что значения h_{kijm} – целые числа, кратные выбранной единице времени. Однако на практике это не так. Кроме этого, для сокращения размерности задачи предполагается, что работа kij включает комплекс операций, который может быть выполнен за время, выраженное долей от принятой единицы времени (включая параметры t_{kij1} и t_{kij2} или без них). Учитывая это, планирование хода производства может быть представлено следующим образом.

Пусть за единицу времени выбран месяц, а $h_{kijm} < 1$. Тогда обозначим через $y_{kij,r} \leq 1$ переменную, означающую долю работы kij , которая будет начата и закончена в периоде r . Данная работа может быть продолжена в периоде $r + 1$, а оставшаяся часть работы описывается как $y_{kij,r,r+1}$. Если $2 > h_{kijm} > 1$, то используются три переменных и т.д. Тогда ограничение на использование мощностей в период r можно записать так:

$$\sum_k h_{kijm} y_{kij,r} \leq A_{mr}, \quad r = 1, \dots, T - 1; m = 1, \dots, M;$$

$$\sum_k h_{kijm} y_{kij,r,r+1} \leq A_{m,r+1}, \quad r = 1, \dots, T - 1; m = 1, \dots, M.$$

Обозначим через y_q целочисленную переменную, $y_q \leq 1, q = 1, 2, \dots$. Вводятся дополнительные ограничения: $y_{kij,r} + y_{kij,r,r+1} = y_q$. Это позволяет сохранить работу kij как единое целое, выполняемую в одном или в двух (или более) смежных месяцах. С переменными $y_{kij,r}, y_{kij,r,r+1}$ согласуется последовательность выполнения работ и другие ограничения. Практические расчеты показали обоснованность такого подхода.

Покажем фрагмент решения такой задачи на небольшом примере, отражающем выполнение двух комплексов операций ($i = 1, 2$) для одинаковых изделий ($k = 1, 2, \dots$), но разных заказов. Первый комплекс работ – заготовительные работы и механическая обработка деталей корпуса изделия бригадой рабочих в одну смену. Продолжительность работ – 0,76 месяца. Второй комплекс работ – сборка корпуса изделия продолжительностью 0,58 месяца, которую выполняет другая бригада на другом рабочем месте. Интенсивность выполнения первого комплекса работ для первого (второго, третьего и т.д.) изделия в соответствующем месяце обозначена в таблице переменными $y_{k,i,r}, y_{k,i,r,r+1}$. Как показано в таблице, выполнение комплексов работ не разрывается во времени в двух смежных периодах, что очень важно для практики планирования производства.

Таким образом, в работе представлен новый методологический подход к согласованию моделей стратегического и оперативного управления для условий серийного производства сложных изделий с длительным технологическим циклом на основе совмещения задач оптимизации объемно-календарного, оперативно-календарного и сетевого планирования. Основная трудность заключается в построении модели оперативно-календарного планирования хода производства по ведущим группам оборудования для всего перечня продукции на основе информации, доступной для сетевого планирования технологического процесса производства каждого вида продукции в отдельности. Кроме этого, в рассмотренной постановке задачи представлен новый подход к учету любой продолжительности работ (операций), не кратной выбранной единице времени. В итоге объединенная задача планирования производства с ограничениями на ресурсы сведена к задаче линейного целочисленного программирования, решение которой вполне осуществимо с помощью имеющегося программного обеспечения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Безмельницын Д.А.** (2010). Организация оперативного управления серийным производством сложных изделий с длительным циклом технологического процесса. В сб. науч. трудов “*Механизмы организационно-экономического стимулирования инновационного предпринимательства*” / Под ред. В.В. Титова, В.Д. Марковой. Новосибирск: ИЭОПП СО РАН.
- Гаврилов Д.А.** (2003). Управление производством на базе стандарта MRP II. СПб.: Питер.
- Данилин В.И.** (2006). Операционное и финансовое планирование в корпорации (методы и модели). М.: Наука.
- Забиняко Г.И.** (1999). Пакет программ целочисленного программирования // *Дискретный анализ и исследование операций*. Серия 2. Т. 6. № 2.
- Мауэргауз Ю.Е.** (2012). Продвинутое планирование и расписания (AP&S) в производстве и цепочках поставок. М.: Экономика.

- Плещинский А.С.** (2004). Оптимизация межфирменных взаимодействий и внутрифирменных управленческих решений. М.: Наука.
- Титов В.В.** (2013). Оптимизация принятия решений в управлении промышленной корпорацией. Вопросы методологии и моделирования. Saarbrücken: Palmarium Academic Publishing.

Поступила в редакцию
12.02.2014 г.

Optimization of Coordination between Complex Production Operations Management and Enterprise's Strategic Plans

V.V. Titov, D.A. Bezmelnitzyn

The authors present the methodological approach to coordination of strategic and operative planning for serial production of complicated products with long technological cycle. Optimization, schedule and network planning are combined.

Keywords: operations management, strategic management, network planning, calendar planning, coordination.

JEL Classification: L23.