

УДК 338.45  
П 781

П 781 **Проблемы развития инновационного предпринимательства на  
промышленных предприятиях** / под ред. В.В. Титова, В.Д. Мар-  
ковой. – Новосибирск : Изд-во ИЭОПП СО РАН, 2014. – 268 с.

ISBN 978-5-89665-283-0

Сборник научных трудов посвящён актуальной теме разработки методологического подхода поддержки создания и развития инновационного бизнеса. В настоящее время эта тема является одной из приоритетных в национальной политике в области науки и технологии в большинстве развитых и развивающихся государств. Инновационный бизнес считается основой национальной конкурентоспособности, главным источником высокой добавленной стоимости, создателем новых квалифицированных рабочих мест.

Рассматриваемые в сборнике проблемы представляют интерес не только для научных работников, занимающихся исследованиями в указанном направлении, но и для преподавателей и студентов, специализирующихся в области инновационного, стратегического и производственного менеджмента, для практического использования в управлении фирмами и корпорациями.

ISBN 978-5-89665-283-0

ББК 65.9(2Р)-80  
УДК 338.45

© ИЭОПП СО РАН, 2014 г.  
© Коллектив авторов, 2014 г.

*Д.А. Безмельницын*

**СОГЛАСОВАНИЕ ОПЕРАТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ  
СЛОЖНЫМ ПРОИЗВОДСТВОМ  
С ТАКТИЧЕСКИМИ ПЛАНАМИ ПРЕДПРИЯТИЯ  
НА ОСНОВЕ МОДЕЛИРОВАНИЯ**

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

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

*D.A. Bezmelnitzyn*

**NEGOTIATION OF OPERATIONAL CONTROL  
OF COMPLEX PRODUCTION WITH TACTICAL PLANS  
ENTERPRISE-BASED MODELING**

The paper presents a new methodological approach to the approval of the models of strategic and operational management for conditions of serial production of complex products with long cycle of the technological process based on the combination of optimization problems volume calendar, operative-calendar and network planning. The main difficulty in this problem is to build a model of operative-calendar planning of production process in leading groups equipment total list of products on the basis of information from the network planning process for each product separately. Besides, in the considered formulation presents a new approach to the consideration of the dura-

tion of work (operations) of any duration (not a multiple of the chosen time unit). In the end, the joint task of production planning with resource constraints reduced to the problem of linear integer programming, the solution of which is feasible with existing software.

**Key words:** operational production management, strategic management, network planning, calendar planning, coordination.

В современных системах управления промышленными предприятиями всё большее внимание уделяется операционным стратегиям [1–4]. Именно операционные стратегии обеспечивают реализацию стратегического управления на предприятиях. Поэтому и 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 научно обосновываться с учётом опыта существующих разработок.

Система ОУП строится относительно обязательного выполнения сроков и объёмов поставок продукции потребителям в соответствии со стратегическими планами развития предприятия и производства, обеспечивая при этом минимум уровня незавершённого производства, затрат, координацию хода производства по участкам и цехам предприятия.

В данной работе будет представлено построение системы ОУП для предприятий электротехнической промышленности, работающих на фактический спрос. 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, совмещённый с оперативным управлением производством.

При производстве сложных машин часто используется сетевое планирование, которое позволяет представить временной график производства машины, продолжительность выполнения работ, интенсивность использования мощностей рабочих мест и трудовых ресурсов, потребность в материальных ресурсах при начале выполнения тех или иных работ. Такой комплекс ОУП успешно используется в ОАО НПО «ЭЛСИБ», г. Новосибирск [5].

Однако при увеличении объёмов производства и продаж продукции, при выпуске нескольких видов электрических машин, разных по назначению, срокам продаж и мощностям, – сетевые графики накладываются друг на друга. Это приводит к перегрузке использования мощностей и трудовых ресурсов в отдельные периоды времени. Необходимо осуществлять сдвиги отдельных работ в сетевых графиках, что является трудной задачей (устраняется наложение работ на одном рабочем месте – возникает на другом) планирования, для решения которой нет эффективного алгоритма. Следовательно, сетевое планирование при ограничениях на ресурсы становится сложнейшей задачей математического программирования.

При оптимизационном планировании производства решение указанной проблемы предложено осуществлять на основе агрегированных технологий [1, 2, 4]. В них затраты производственных ресурсов на единицу продукции задаются во времени, т.е. по некоторым дискретным периодам, в сумме определяющих ДПЦ. Такой вектор затрат – агрегированную технологию – можно построить для производства каждой единицы продукции (каждого заказа) на основании сетевого графика. Интенсивность использования мощностей, трудовых ресурсов на обработку изделия на группе оборудования задаются с учётом ДПЦ на основе такой агрегированной технологии.

Однако данный подход жёстко фиксирует технологический процесс, что сужает область допустимых решений. Поэтому следует воспользоваться сетевым планированием, но с учётом возможности сдвигать отдельные работы относительно друг друга, выделения узких мест производства, как это сделано в оперативно-календарном планировании [2, 4, 5]. В таком случае по любой работе, представленной в сетевом графике производства детали, узла, сохраняется длительность обработки, но при этом выделяется ведущая операция, комплекс операций, который выполняется на лимитирующей производство группе оборудования (рабочем месте). Фиксируется также продолжительность обработки детали, узла до ведущей операции и после ведущей операции. Выделение только ведущих операций резко снижает размерность решаемой задачи, появляется возможность запланировать равномерную загрузку ведущих групп оборудования и рабочих.

Методически этот процесс можно представить так. Пусть необходимо выпустить несколько изделий за определённый плановый период времени. Для каждого изделия построен сетевой график выполнения работ. В вершинах сетевого графика часть работ завершается, а другие работы начинаются. Наиболее раннее начало работ – в первой вершине, завершение наиболее поздних работ – в последней. Продолжительность каждой работы от одной вершины к другой – задана. При этом эти параметры определяют длительность обработки по операциям технологического процесса (вместе с пролёживанием, транспортировкой, технологическими и страховыми опережениями) по работе до ведущей операции и после ведущей операции до завершения работы, продолжительность работы по ведущей операции на соответствующей группе оборудования.

С целочисленной переменной, принимающей значения 0 или 1, связано начало работы с определённого времени. Для каждой из работ в исходной информации задаётся некоторое дискретное множество вариантов выполнения работ. При этом каждая работа должна быть выполнена только одним из вариантов. Фиксируются ограничения по использованию возможностей производства всех работ и изделий во времени; по выполнению условий последовательности работ – из вершины работа может начаться только после того, как выполнены все работы, входящие в данную вершину. Для каждого изделия задан предельный срок его выпуска. Критерий оптимизации – минимум незавершённого производства при выполнении стратегических планов продаж продукции.

Для стратегического управления на базе указанной системы ОУП для заданного периода времени определяется возможный объём выпуска продукции с учётом спроса на продукцию, реализации различных нововведений (ввод мощностей, новых технологий и др.), максимизируется чистая прибыль за планируемый период, 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, 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 её постановке остановимся более подробно.

Система ОУП ориентируется на фактический спрос. Так работают предприятия тяжёлого 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 серийности производства.

При планировании по опережениям для каждой партии деталей, изготавливаемых в каком-либо цехе (участке) относительно следующего (согласно технологическим переходам) цеха (участка), устанавливается опережение по запуску и выпуску. Планово-учётной единицей является комплект одноименных деталей. Эта система наиболее широко распространена в производстве. Подходит она и для рассматриваемого нами производства. Выпуск готовой продукции осуществляется не партиями, а поштучно. Поэтому для каждого заказа можно построить по опережениям план выпуска деталей и узлов для сборки готового изделия.

Система ОУП, основанная на планировании по опережениям, является наиболее простой. Её принцип использован во всех существующих разработках. Однако задача построения эффективной системы ОУП заключается в преодолении внутренних проблем такой системы.

Для условий электротехнической промышленности при производстве сложных машин часто используется сетевое планирование [5]. Фактически это тот же цикловой график производства изделия, что используется и в системах ERP, но менее детализирован [6].

Учитывая сложность решения задачи сетевого планирования с ограничениями на ресурсы, следует воспользоваться постановкой оптимизационной задачи оперативно-календарного планирования. Такая постановка задачи ОУП существенно увеличивает возможности математического программирования по решению столь важной для практики проблемы.

Обычно решение задач сетевого планирования без ограничения на ресурсы сводится к нахождению критического пути, что не представляет труда. Однако, как отмечалось, задача становится сложной при выполнении одновременно нескольких проектов и

ограничениях на ресурсы. Решение такой задачи можно осуществить на основе имитационного моделирования, когда выполнение работ планируется от текущего момента времени к срокам выпуска готовых изделий, или с помощью оптимизационного планирования, используемого в календарном планировании единичного и серийного производства [2, 4].

Пусть необходимо выпустить  $K$ ,  $k = 1, 2, \dots, K$  изделий за определённый плановый период времени  $T$ ,  $t = 1, 2, \dots, T$ . Для каждого изделия  $k$  построен сетевой график выполнения работ. Для упрощения пояснений дадим 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  $j = 1, 2, \dots, n$ . 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 (вместе с пролёживанием, транспортировкой, технологическими страховыми опережениями) по работе  $ij$  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)  $m$ ,  $m = 1, 2, \dots, M$ .

Таким образом, параметры  $t_{ij1}$  и  $t_{ij2}$  отражают минимальное время выполнения части работы  $ij$  без использования дефицитных ресурсов. Указанные параметры учитываются только в технологическом времени обработки. Длительность  $h_{ijm}$  использования дефицитного ресурса определяет то время, в течение которого никакая другая работа не может выполняться, а следовательно, необходимо построение ограничения, учитывающего 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 соответствующих групп оборудования (рабочих мест). Так как эти ресурсы взаимосвязаны, то ограничение по возможностям выполнения работы по ведущей операции в течение времени  $h_{ijm}$  отразим на основе следующей информации. Для выполнения ведущей операции при

выполнении работы  $ij$  в каждую единицу времени необходимо наличие  $a_{ijm}$  работников (в одну смену или в две). 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 из работ в исходной информации задаётся некоторое дискретное множество вариантов выполнения работ (задаётся время возможного начала работ). При этом работа  $ij$  должна быть выполнена только одним из вариантов:

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

Ограничение по использованию возможностей производства всех изделий  $K$  во времени может быть записано следующим образом:

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

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

в противном случае  $a_{ijmkt} = 0$ .

Таким образом, с периода  $r$  до  $r+t_{kijl}-1$  значения  $a_{ijmkt} = 0$ , т.е. учитывается только часть длительности производства, но не затрагиваются мощности группы оборудования  $m$ . С периода  $r+t_{kijl}$  до времени  $r+t_{kijl}+h_{kijm}-1$  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 последовательности работ может быть задано следующей системой ограничений:

$$(r+t_{kij}-1)x_{kijr} \leq T_{kj}, \quad j = 1, 2, \dots, n;$$

$$r x_{kijr} \geq T_{ki}, \quad i = 1, 2, \dots, n; \quad k = 1, 2, \dots, K.$$

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 объёмы продаж во времени, другие технико-экономические и финансовые показатели. Задано и время желательного выпуска  $D_{kn}$  изделия  $k$  (на основе договоров по заказам и резервов времени выполнения). Время превышения сроков выполнения работ  $H_k$  определяется из следующего соотношения:

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

Тогда один из критериев оптимизации можно записать так: минимизируется сумма отклонений  $H_k$  с учётом себестоимости  $C_k$  готовых изделий:

$$\sum_k H_k C_k \longrightarrow \min.$$

Такому критерию соответствует приближенно минимум незавершённого производства, минимум времени выполнения всех работ. Могут быть использованы любые другие целевые установки.

Таким образом, задача сетевого планирования с ограничениями на ресурсы сведена к задаче линейного целочисленного программирования, решение которой вполне осуществимо, например, с помощью программного обеспечения [7].

В рассмотренной постановке задачи предполагается, что значения  $h_{kijm}$  – целые числа, кратные выбранной единице времени. Однако на практике это не так. Кроме того, для сокращения размерности задачи предполагается, что работа  $kij$  включает в себя целый комплекс работ, 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 фиксируется как  $y_{kij,r,r+1}$ . Если  $2 > h_{kijm} > 1$ , то используется три переменные, и т.д. Тогда ограничение по использованию мощностей в период  $r$  можно записать так:

$$\sum_k h_{kijm} y_{kij,r} \leq A_{mr}, \quad r = 1, \dots, T-1; \quad m = 1, 2, \dots, M;$$

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

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

**Представление части решения задачи оперативного управления производством при рассмотренном подходе к её решению**

Выполнение ограничений	Месяц планирования						
	1	1	2	2	3	3	4
	<b>Выполнение первого комплекса работ</b>						
$m=1, 1 \geq 0,92$	$0,76y_{1,1,1}$	$0,76y_{2,1,1}$					
$y_1=1, 1=1$	$1=y_{1,1,1}$						
$m=1, 1 \geq 1$			$0,76y_{2,1,1,2}$	$0,76y_{3,1,2}$			
$y_2=1, 1=1$		$0,21 = y_{2,1,1}$	$0,79 = y_{2,1,1,2}$				
$m=1, 1 \geq 1$					$0,76y_{3,1,2,3}$	$0,76y_{4,1,3}$	
$y_3=1, 1=1$				$0,53 = y_{3,1,2}$	$0,47 = y_{3,1,2,3}$		
						$0,84 = y_{4,1,3}$	и т.д.
	<b>Выполнение второго комплекса работ</b>						
$m=2, 0,24 \geq 0,16$	$0,58 y_{1,2,1}$						
$m=2, 1 \geq 1$			$0,58 y_{1,2,1,2}$	$0,58 y_{2,2,2}$			
$y_4=1, 1=1$	$0,28 = y_{1,2,1}$		$0,72 = y_{1,2,1,2}$				
$y_5=1, 1=1$				$1 = y_{2,2,2}$			
$m=2, 1 \geq 0,58$					$0,58 y_{3,2,3}$		и т.д.
$y_6=1, 1=1$					$1 = y_{3,2,3}$		

Покажем фрагмент решения такой задачи на небольшом примере, отражающей выполнение двух комплексов операций ( $i = 1, 2$ ) одинаковых изделий ( $k = 1, 2, \dots$ ), но разных заказов. Первый комплекс – это выполнение заготовительных работ и механической обработки деталей корпуса изделия бригадой рабочих в одну смену. Продолжительность работ – 0,76 месяца. Второй комплекс работ – сборка корпуса изделия продолжительностью 0,58 месяца, выполняемая другой бригадой на другом рабочем месте. Интенсивность выполнения первого комплекса работ для первого (второго, третьего и т.д.) изделия в соответствующем месяце обозначена в таблице переменными  $Y_{k,i,r}, Y_{k,i,rr+1}$ .

Как показано в таблице, выполнение комплексов работ не разрывается во времени в двух смежных периодах, что очень важно для практики планирования производства.

## Литература

1. **Данилин В.И.** Операционное и финансовое планирование в корпорации (методы и модели). – М. : Наука, 2006.
2. **Мауэргауз Ю.Е.** «Продвинутое» планирование и расписания (AP&S) в производстве и цепочках поставок. – М. : Экономика, 2012.
3. **Плещинский А.С.** Оптимизация межфирменных взаимодействий и внутрифирменных управленческих решений. – М. : Наука, 2004.
4. **Титов В.В.** Оптимизация принятия решений в управлении промышленной корпорацией. Вопросы методологии и моделирования. Saarbrücken: Palmarium Academic Publishing, 2013.
5. **Безмельницын Д.А.** Организация оперативного управления серийным производством сложных изделий с длительным циклом технологического процесса // Механизмы организационно-экономического стимулирования инновационного предпринимательства: сб. науч. тр. / под ред. В.В. Титова, В.Д. Марковой. – Новосибирск : ИЭОПП СО РАН, 2010.
6. **Гаврилов Д.А.** Управление производством на базе стандарта MRP II. – СПб. : Питер, 2003.
7. **Забиняко Г.И.** Пакет программ целочисленного программирования // Дискретный анализ и исследование операций. – 1999. – Серия 2. Т. 6. – № 2.