

УДК 658.513

**МОДЕЛЬ МЕЖЦЕХОВОГО ПЛАНИРОВАНИЯ С УЧЕТОМ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ОГРАНИЧЕНИЙ  
НА ПРИМЕРЕ АВИАСТРОИТЕЛЬНОГО ПРЕДПРИЯТИЯ**

© 2016 И.В. Лутошкин, М.Н. Ярдаева

Ульяновский государственный университет

Статья поступила в редакцию 21.10.2016

В статье представлена модель межцехового планирования, позволяющая на основе расчета себестоимости изготовления продукции с учетом имеющихся ограничений по материальным и трудовым ресурсам, фонду оборудования, установленному бюджету на производство продукции повысить эффективность составления номенклатурного плана выпуска продукции по каждому цеху, плана закупок материальных ресурсов, плана загрузки оборудования и трудовых ресурсов в цехе.

*Ключевые слова:* межцеховое планирование, производственные ограничения, системы предприятия, себестоимость продукции, цикл изготовления.

*Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России.*

**ВВЕДЕНИЕ**

В настоящее время отечественные авиастроительные предприятия, имеющие низкий цеховой уровень автоматизации, испытывают трудности, связанные с оперативным планированием номенклатуры; перестройкой плана производства при введении нового заказа; оптимальным составлением плана закупок материальных ресурсов; оптимальной загрузкой оборудования, трудовых ресурсов в рамках установленного производственного бюджета. Практика показывает, что некачественное составление плана производства приводит к ряду нежелательных последствий – излишним товарным и материальным запасам, низкому показателю уровня обслуживания заказчиков, простоем мощностей, большой длительности производственного цикла, появлению нервозности при диспетчеризации, перерасходу заработной платы [1].

Существующие современные системы автоматизации позволяют эффективно управлять процессами и оборудованием, автоматизируют сбор данных о производственных процессах в режиме реального времени, устанавливают и контролируют показатели по затратам на выпуск продукции для смен, бригад, цехов, сокращают производственные циклы, оперативно управляют качеством выпускаемой продукции. Внедряя систему оперативного управления производством, предприятие добивается возможности снижать себестоимость выпускаемой продукции и как следствие увеличивать прибыль. В мировом

авиастроении системы оперативного управления используются на таких предприятиях, как Boeing и Airbus, Cessna и Embraer, Rolls-Royce и Gulfstream [2].

Перед разработкой или внедрением готовой системы оперативного управления на отечественном авиастроительном предприятии необходимо провести ряд подготовительных работ (обеспечить интеграцию автоматизированных систем, создать единое информационное пространство, определить показатели планирования и пр.). В данной статье будет рассмотрена одна из первоочередных задач подготовительных работ – описание модели планирования на уровне цеха с учетом имеющихся производственных ограничений и выявление ключевых показателей цехового планирования.

Основной деятельностью любого крупного машиностроительного предприятия является план производства, разработанный в соответствии с планом продаж или аналогичным документом, описывающим стратегию развития предприятия. План производства связывает основные цели бизнес-плана с планированием работы производственной, финансовой, сбытовой, снабженческой и других служб предприятия [1].

Входными данными для составления многономенклатурной производственной программы на авиастроительном предприятии АО «Авиастар-СП» (г.Ульяновск) служат контрольные цифры по выпуску основных агрегированных видов продукции, получаемые из цикловых графиков. В процессе составления плана эти данные анализируются и сопоставляются с имеющимися ресурсами предприятия.

Качество составляемого плана производства, прежде всего, определяется балансом спроса на продукцию и используемых ресурсов. Если план продаж существенно превышает возмож-

*Лутошкин Игорь Викторович, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры экономико-математических методов и информационных технологий.  
E-mail: lutoshkiniv@ulsu.ru  
Ярдаева Маргарита Николаевна, аспирант.  
E-mail: yardaeva@mail.ru*

ности предприятия при его обычной работе, это приводит к увеличению стоимости за счет оплаты сверхурочных работ и снижению качества продукции. Наоборот, при выполнении плана производства, превышающего план продаж, появляются излишки продукции и падают финансово-экономические показатели.

Очень важен другой аспект плана производства – правильное соотношение между планированием агрегированной продукции и ее детализацией. При разработке плана производства необходимо сначала определить укрупненные объемы производства по агрегированным группам, а после этого специфицировать такие группы по конкретным типоразмерам продукции. План, составленный на уровне цеха, будет основой среднесрочного планирования материальных и трудовых ресурсов.

План по агрегированным группам продукции можно рассчитывать в различных единицах измерения. Наиболее общий показатель – объем производства в стоимостном выражении, но он мало что говорит сотрудникам производства и служб снабжения. Для этих работников более удобны показатели выпуска готовой продукции в натуральных единицах, тоннах, или даже в нормочасах. Использование нормочасов для оценки производительности цехов не позволяет выполнить план по номенклатуре деталей, поскольку цеха стремятся выполнить план в нормочасах, изготавливая продукцию большими размерами партий, детали которых идут не только на самолеты, находящиеся в стадии сборки; при этом основная часть произведенной продукции уходит в незавершенное производство. Такая необходимость загрузки цехов и оборудования оправдана ликвидированием простаивающих трудовых ресурсов и производственных мощностей, но приводит к излишнему увеличению запасов незавершенного производства, что непосредственно отражается на себестоимости продукции.

Фактически план производства, как правило, есть некоторый компромисс между реальными возможностями предприятия и желанием производить продукцию в соответствии с планом продаж. Прежде всего, при составлении плана производства имеет смысл установить рациональное соотношение между затратами на изменение числа занятых и затратами на хранение остатков товарных запасов. Для этого можно рассмотреть несколько вариантов плана и провести их ранжирование по значению суммарных затрат. Кроме того, необходимо учесть возможные юридические и профессиональные последствия увольнения сотрудников, а также влияние всех этих факторов на стратегические цели предприятия.

Вариант плана производства приемлемый, если он может быть обеспечен необходимыми

ресурсами. Проверка использования ресурсов преимущественно сводится к предварительному расчету загрузки мощностей, но в ряде случаев необходимо проверить возможность обеспечения плана оборотными средствами, сырьем, квалифицированным персоналом, энергией и т.п.

## МОДЕЛЬ МЕЖЦЕХОВОГО ПЛАНИРОВАНИЯ

Для рационального использования имеющихся на предприятии АО «Авиастар-СП» производственных ресурсов и составления оптимального плана производства необходима модель управления производственными ресурсами. Одним из важных показателей успешности деятельности предприятия являются показатели себестоимости и длительности цикла изготовления продукции.

Для межцехового управления производственными процессами необходим инструмент, который должен отражать достоверную картину текущего состояния производства, а также обладать возможностью многократной корректировки и расчета производственных расписаний в течении рабочих смен.

Введем следующие переменные:

$x_{il}(t)$  – количество изготавливаемых деталей  $i$ -го наименования в цехе  $l$  за период времени  $t$ , где  $i=1,2,\dots,I_l$ ,  $I_l$  – количество номенклатуры деталей в цехе  $l$ ,  $l=1,2,\dots,L$ ,  $L$  – количество цехов,  $t=1,2,\dots,T$ ,  $T$  – горизонт планирования.

$a_{silj}$  – количество продукции  $i$ -го наименования по номенклатуре цеха  $s$ , необходимое для производства (сборки) одной единицы  $j$ -ого наименования продукции в цехе  $l$  (норма).

$zx_{il}(t)$  – имеющееся количество продукции  $i$ -го наименования, выпускаемого в цехе  $l$  к началу периода времени  $t$ .

$v_{lim}(t)$  – количество покупаемых готовых комплектующих изделий или материалов (заготовок)  $m$ -го наименования для изготовления продукции  $i$ -го наименования в цехе  $l$  к началу периода времени  $t$ , где  $m = 1,2,\dots,M_l$ ,  $M_l$  – количество номенклатуры покупаемых комплектующих изделий в цех  $l$ .

$zv_{lim}(t)$  – имеющееся количество  $m$ -го материального ресурса (материала или покупного комплектующего изделия) на центральных складах для изготовления продукции  $i$ -го наименования в цехе  $l$  к началу периода времени.

$b_{lim}(t)$  – норма затрат  $m$ -го материального ресурса на единицу  $i$ -ой продукции в цехе  $l$ .

$u_{lisj}(t)$  – количество продукции  $i$ -го наименования из цеха  $l$ , которое необходимо взять для производства  $i$ -го наименования продукции в цехе  $s$  к началу периода времени  $t$ .

Количество продукции  $i$ -го наименования из цеха  $l$ , которое необходимо взять из всех цехов к началу периода времени  $t$  имеет вид:

$$u_{li}(t) = \begin{pmatrix} u_{li11}(t), u_{li12}(t), \dots, u_{li1I_1}(t) \\ u_{li21}(t), u_{li22}(t), \dots, u_{li2I_2}(t) \\ \dots \\ u_{liL1}(t), u_{liL2}(t), \dots, u_{liLI_L}(t) \end{pmatrix}. \quad (1)$$

Выпуск каждого  $i$ -го продукта в цехе  $l$  зависит от множества производственных факторов: продукты, поступающие из других цехов, поставляемые материальные ресурсы, основные производственные фонды, трудовые ресурсы. Зависимость выпуска от этих производственных факторов может быть представлена в виде некоторой производственной функции:

$$x_{li}(t) = f(u_{li}(t), v_{li1}(t), v_{li2}(t), \dots, v_{liM_l}(t)). \quad (2)$$

Вид производственной функции определяется экспертами и на практике зачастую ограничивается некоторым стандартным набором. Одним из вариантов представления функции может быть производственная функция «затраты-выпуск»:

$$f(u_{li}(t), v_{li1}(t), v_{li2}(t), \dots, v_{liM_l}(t)) = \\ = \min \left\{ \min_{\substack{1 \leq s \leq L \\ 1 \leq j \leq I_s}} \left\{ \frac{u_{sjli}(t)}{a_{sjli}} \right\}, \min_{1 \leq m \leq M_l} \left\{ \frac{v_{lim}(t)}{b_{lim}} \right\} \right\}. \quad (3)$$

Следующим вариантом представления производственной функции может быть мультипликативная функция:

$$x_{li}(t) = A \prod_{s=1}^L \prod_{j \in I_{si}(t)} u_{sjli}^{\beta_{sjli}}(t) \prod_{m=1}^{M_l} v_{lim}^{\beta_{lim}}(t), \quad (4)$$

где  $I_{si}(t)$  – множество продуктов, необходимых для производства  $i$ -го продукта в цехе  $s$ ,  $a_{sjli}$  – коэффициент эластичности продукции  $i$ -го наименования по  $j$ -му продукту цеха  $s$ .

Если для моделирования производственного процесса выбрать представление (3), то параметры функции могут быть определены, основываясь только на нормативных параметрах производства. В свою очередь, мультипликативное представление для определения параметров требует знание соответствующей производственной статистики за прошлые периоды времени, при этом оно в неявном виде может содержать влияние латентных факторов.

Очевидно, что на выпуск продукции влияет ряд ограничений, связанный как с конечностью использования ресурсов, так и с имеющимися запасами материалов и готовой продукции.

Запишем уравнение баланса операций прихода и расхода изготовленной продукции (изменения запасов) в периоде  $t$ , определяющее запасы продуктов в конце периода  $t$ :

$$zx_{li}(t) = zx_{li}(t-1) + x_{li}(t) - \\ - \sum_{s=1}^L \sum_{j=1}^{I_s} u_{lisj}(t) - \mu_{li} \cdot zx_{li}(t-1), \quad (5)$$

где  $\mu_{li}$  – коэффициент амортизации запасов продукта.

При этом суммарное используемое количество не может составить больше количества запасов, т.е.:

$$\sum_{l=1}^L \sum_{j=1}^{I_l} u_{silj}(t) \leq zx_{si}(t). \quad (6)$$

Аналогичное уравнение баланса операций прихода и расхода материальных ресурсов (изменения запасов), определяющее запасы в конце периода  $t$ , примет вид:

$$zv_{lim}(t) = zv_{lim}(t-1) + v_{lim}(t) - \\ - b_{lim} \cdot x_{li}(t) - \lambda_{lim} \cdot zv_{lim}(t-1), \quad (7)$$

где  $\lambda_{lim}$  – коэффициент амортизации запасов материала.

При этом запас материала не может быть меньше заранее заданного уровня запаса:

$$zv_{lim}(t) \geq zv_{lim}^{min}(t). \quad (8)$$

Детерминированная функция  $zv_{lim}^{min}(t)$  на практике зачастую устанавливается в виде постоянной величины.

Как было отмечено выше, производство продукции тесно связано с ресурсными ограничениями, среди которых наиболее существенными являются ограничения, связанные с факторами труда, основными фондами (оборудованием) и установленным бюджетом.

Опишем эти ресурсные ограничения. Пусть  $p_{ljk}$  – норма использования  $k$ -го трудового ресурса в  $l$ -ом цехе для производства единицы  $j$ -го продукта, тогда ограничение по трудовым ресурсам соответствует неравенству:

$$\sum_{j=1}^{I_l} p_{ljk} \cdot x_{lj}(t) + \xi_{lk} \leq S_{lk}(t), \quad (9)$$

где  $\xi_{lk}$  – неотрицательная случайная величина, имеющая смысл дополнительного использования  $k$ -го трудового ресурса в  $l$ -ом цехе;  $S_{lk}$  – фонд  $k$ -го трудового ресурса в  $l$ -ом цехе, значение данного показателя зависит как от внешних (демографическая, общеэкономическая ситуация в регионе и др.) так и внутренних факторов (управленческие решения).

Следующим существенным фактором является ограничение, связанное с основными фондами:

$$\sum_{j=1}^{I_l} h_{lfg} \cdot x_{lj}(t) + \eta_{lg}(t) \leq G_{lg}(t), \quad (10)$$

где  $h_{lfg}$  – норма использования  $g$ -го оборудования в  $l$ -ом цехе для производства единицы  $j$ -го продукта,  $\eta_{lg}$  – неотрицательная случайная величина, имеющая смысл дополнительного использования  $g$ -го оборудования (станка) в  $l$ -ом цехе (простоя),  $G_{lg}$  – предельная величина использования  $g$ -го оборудования (станка) в  $l$ -ом цехе, значение данного показателя зависит от внешних факто-

ров (развитие технологий, общеэкономическая ситуация в регионе и др.) и внутренних факторов (управленческие решения).

Обозначим через  $B(t)$  – бюджет предприятия, обеспечивающий производственную деятельность предприятия в период  $t$ . Тогда  $B(1), B(2), \dots, B(T)$  представляет собой стратегию распределения бюджета на всем горизонте планирования  $T$ .

Для каждого периода  $t$  выполняется следующее ограничение по использованию бюджета  $B(T)$ .

$$\sum_{l=1}^L \sum_{k=1}^{K_l} \sum_{j=1}^{I_l} p_{ljk} \cdot x_{ljk}(t) \cdot c_{lk} + \sum_{l=1}^L \sum_{m=1}^{M_l} \sum_{j=1}^{I_l} v_{ljm}(t) \cdot cv_{ljm}(t) + \sum_{l=1}^L \sum_{g=1}^{G_l} \left( \sum_{j=1}^{I_l} h_{ljg} \cdot x_{ljk}(t) \cdot am_{lg} + am_{2lg} \cdot \eta_{lg}(t) \right) + \varepsilon(t) \leq B(t), \quad (11)$$

где  $\varepsilon(t)$  – случайная величина, дающая смысл дополнительных издержек, непредусмотренных планом (руб),  $am_{lg}, am_{2lg}$  – коэффициенты амортизации оборудования при использовании и простое, соответственно.

Модель, порожденная соотношениями (2), (5)–(11) с учетом выбора представления производственной функции (3) или (4), позволяет оценить ряд важнейших характеристик деятельности предприятия. Имея спрос на конечную продукцию, модель позволяет построить номенклатурный план выпуска продукции по каждому цеху, план закупок материальных ресурсов, план загрузки оборудования и трудовых ресурсов в цехе.

При фиксированном плане продаж модель позволяет изменять стратегию финансирования  $B(1), B(2), \dots, B(T)$ , фонды трудовых ресурсов  $S_{jk}(t)$  и оборудования  $G_{lg}(t)$  по периодам времени  $t=1, 2, \dots, T$ . Данная модель может быть расширена за счет учета дополнительных ограничений, связанных с формированием бюджета на каждый период времени; с перераспределением или приобретением основных производственных фондов; с перераспределением, приемом на работу или увольнением основных производственных рабочих. В модель могут быть включены факторы, влияющие на бюджетную стратегию (кредиты, депозиты и т.д.), на трудовые ресурсы (выбытие, обучение, прием и т.д.), на основные производственные фонды (износ оборудования, новые технологии и т.д.).

Фактически поставленная задача совпадает с проблемой составления плана продаж и производства. Важнейшее значение для эффективного управления ресурсами имеет тщательная увязка планов производства с планами материально-технического снабжения и распределения трудовых ресурсов. Для решения этой задачи применяются различные методы определения потребности в материальных ресурсах, используется научно обоснованная нормативная база и, в первую очередь, расчеты по нормам расхода и запасов материальных ресурсов [3].

Предложенная модель оценки и распределения производственных ресурсов должна быть

реализована в автоматизированной системы управления предприятия межцехового уровня как для непосредственно управления потоками, так и при построении финансово-экономической модели предприятия в целом.

Для построения адекватной модели, включающей в себя целевые показатели предприятия, подвергающиеся мониторингу и управлению, предлагается использование аппарата имитационного моделирования, применение экономико-математических моделей, использование моделей и методов математического программирования.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Реализация предлагаемой модели межцехового планирования с учетом ограничений по материальным и трудовым ресурсам, фонду оборудования, установленному бюджету на производство продукции в автоматизированной системе оперативного уровня предприятия позволит:

- под фиксированный план выпуска конечной продукции определить плановые производственные показатели  $x_{ii}(t), u_{ljsj}(t)$  для каждого из цехов по всей номенклатуре продукции;
- распределить бюджет  $B(1), B(2), \dots, B(T)$  по всем периодам времени горизонта планирования;
- выявить узкие места по рациональному распределению трудовых, материальных ресурсов и основных фондов;
- определить плановые объемы материальных ресурсов, фонды оборудования и трудовых ресурсов в соответствии с выбранным критерием качества (планирование «точно-в-срок»  $t=1, 2, \dots, T$ , минимум производственных издержек).

Качество составляемого плана производства можно улучшить, если реализовать предлагаемую модель в автоматизированной системе предприятия с учетом дополнительных ограничений, связанных с формированием бюджета на каждый период времени; с перераспределением или приобретением основных производственных фондов; с перераспределением, приемом на работу или увольнением основных производственных рабочих. В модель могут быть включены факторы, влияющие на бюджетную стратегию (кредиты, депозиты и т.д.), на трудовые ресурсы (выбытие, обучение, прием и т.д.), на основные производственные фонды (износ оборудования, новые технологии и т.д.).

Предлагаемую модель, в том числе с учетом дополнительных ограничений, планируется реализовать и внедрить на авиастроительном предприятии АО «Авиастар-СП» в рамках выполнения проекта по развитию автоматизированной системы управления производством и производственными ресурсами на основе цифровых технологий с целью обеспечения выпуска продукции точно в срок и под заданную себестоимость.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. *Мауэргауз Ю.Е.* «Продвинутое» планирование и расписания (AP&S) в производстве и цепочках поставок. М.: Экономика, 2012. 574 с.
2. *Зайкин М.А., Лотоцкий А.М.* Формирование исходных данных для работы системы оперативного управления механообрабатывающим производством авиастроительного предприятия // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2014. Т. 16. № 1(5). С. 1394-1396.
3. *Денисова М.Н., Шабалкин Д.Ю.* Модель оптимизации цепочки поставок, обеспечивающая работу авиастроительного предприятия // Техника и технология: новые перспективы развития. Материалы XV Международной научно-практической конференции (20.11.2014). М.: Спутник+, 2014 С. 64-68.

**MODEL INTERPLANT PLANNING WITH REGARD TO MANUFACTURING CONSTRAINTS  
FOR EXAMPLE AIRCRAFT CONSTRUCTION ENTERPRISES**

© 2016 I.V. Lutoshkin, M.N. Yardaeva

Ulyanovsk State University

The article is devoted to interdepartmental planning, that allows to increase the efficiency of manufacturing program, procurement plan, equipment load and labour load, composing of plans. It is achieved by means of cost calculation of product manufacturing, taking into account the limitations of material and human resources, equipment and budget.

*Keywords:* interdepartmental planning, manufacturing constraints, enterprise, production costs, manufacturing cycle.

---

*Igor Lutoshkin, Candidate of Physics and Mathematics,  
Associate Professor at the Economic-Mathematical Methods  
and Information Technologies Department.*

*E-mail: lutoshkiniv@ulsu.ru*

*Margarita Yardaeva, Graduate Student.*

*E-mail: yardaeva@mail.ru*