

УДК 517.977

Г. А. Благодатский, кандидат технических наук, доцент  
 В. А. Тененев, доктор физико-математических наук, профессор  
 А. С. Шаура, кандидат технических наук, доцент  
 ИжГТУ имени М. Т. Калашникова»  
 Д. С. Шаура  
 ООО «ИРЗ»

## ЧИСЛЕННАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ АЛГОРИТМА УПРАВЛЕНИЯ ЗАПАСАМИ ПРИ ДЛИТЕЛЬНЫХ СРОКАХ ПОСТАВКИ КОМПЛЕКТУЮЩИХ В УСЛОВИЯХ «УЗКИХ» МЕСТ ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ЦИКЛА

*В работе представлена модель управления запасами и организации рационального плана работ по выпуску продукции при планировании производства. Предложен подход к решению поставленной задачи на основе гибридного генетического алгоритма с решением задачи линейного программирования при определении целевой функции.*

**Ключевые слова:** оптимальное планирование, оптимизация загрузки производственной линии, задача линейного программирования, симплекс-метод, генетический алгоритм.

Важным элементом планирования производства является управление запасами в зависимости от планов выпуска продукции в течение рассматриваемого периода. Особо остро вопрос планирования запасов стоит для тех предприятий, работа которых зависит от поставки специфичных или дорогих комплектующих, часто производимых на заказ и имеющих сроки поставки, сравнимые или значительно превышающие продолжительность производственного цикла на предприятии.

Рассмотрим серийное производство машиностроительным предприятием изделий, основными элементами которых являются цилиндры. Изготовление цилиндров требует значительных трудовых затрат и сложных технологических процессов. Изделия имеют различную модификацию и отличаются типоразмером. Типовой процесс производства включает большое количество операций, среди которых азотирование, хромирование, расточка, консервация, контроль ОТК, обрезка, токарная обработка на станках с ЧПУ, хонингование, окрашивание, отпуск, правка на прессе, комплектование, сборка. Наличие специальных техпроцессов (азотирование, хромирование, хонингование) приводит к образованию узких мест в производственном цикле из-за большой продолжительности этих операций и зависимости от количества одновременно обрабатываемых деталей от их типоразмера. Предприятие ставит своей целью спланировать производство и закупку комплектующих таким образом, чтобы минимизировать издержки производства, не допуская при этом срыва сроков поставки готовой продукции. Поскольку спрос не является постоянным, то задача относится к классу задач с динамическим спросом.

Характерной особенностью выпускаемых изделий является то, что для производства цилиндров требуется уникальная и дорогостоящая труба, которая может быть заказана только у нескольких поставщиков. Более того, размеры заказываемых труб по длине и диаметру соответствуют размерам производимых из них цилиндров. Из трубы, предназначенной для оп-

ределенного цилиндра, можно изготовить цилиндр того же диаметра и меньшей длины, но это не выгодно, т. к. ведет к образованию неиспользуемых отходов. С учетом этого возникает необходимость заказывать трубу строго в соответствии с типоразмером производимых изделий, что осложняется несоответствием сроков поставки трубы и сроков выполнения заказов.

Кроме того, процесс производства рассматриваемых изделий осложняют следующие особенности:

- высокие риски поставки некачественного сырья (трубы), а также срыв сроков поставки;
- высокая вероятность срыва сроков поставки готовой продукции потребителю;
- нежелательное образование неликвидов и незавершенного производства.

Необходимо для описанных условий построить модель управления производством, позволяющую принимать управленческие решения для обеспечения непрерывного и равномерного выпуска изделий в необходимых объемах. Сформулируем математическую модель решаемой задачи с учетом всех имеющихся особенностей. Ключевым элементом изделия является цилиндр. Каждому из  $H$  возможных типов цилиндра, однозначно определяющих вид готового изделия в соответствии с имеющейся номенклатурой, присвоим уникальный номер  $h = 1, 2, \dots, H$ . На рассматриваемом временном интервале планирования производства  $[0, T]$  введем сетку по времени  $t_k$ ,  $k = 1, 2, \dots, K$ . Тогда на момент времени  $t_k$  у предприятия имеется серия из  $Q$  заказов  $NG_q$  со сроками выполнения  $S_q$ , соответственно,  $q = 1, 2, \dots, Q$ , и некоторый запас труб каждого вида в количествах  $NT_k(h)$ .

Заказ может включать в себя  $L_q(h)$  позиций для каждого из  $h = 1, 2, \dots, H$  типов цилиндра, причем каждая такая позиция в заказе  $q$  определяет значе-

ние  $NG_q(h, l)$  – количество готовой продукции типа  $h$ , которое необходимо произвести.

Производительность производственной линии определяется максимальным допустимым объемом партии цилиндров  $Np(h)$ , при котором партию можно поместить на азотирование одновременно, и зависит от типа используемых цилиндров.

В момент времени  $t_k$  на азотирование поступает партия цилиндров типа  $h$ , в которой  $C_{k,q}(h)$  заготовок для каждого заказа  $q$ . Размер этой партии  $\sum_q C_{k,q}(h)$  с учетом пропускной способности данной операции должен удовлетворять неравенству

$$\sum_q C_{k,q}(h) \leq Np(h), \quad h = 1, 2, \dots, H. \quad (1)$$

На отдельных этапах производства выявляется брак в трубе, доля которого составляет  $\beta$ . Если  $Y_k(h)$  – это поступление трубы типа  $h$  в момент времени  $t_k$ , то с учетом доли выявляемого брака  $\beta$  до азотирования можно записать уравнение изменения запасов трубы:

$$NT_k(h) = NT_{k-1}(h) - \frac{1}{1-\beta} C_{k,q}(h) + Y_k(h). \quad (2)$$

Для компенсации забракованных изделий после операции азотирования необходимо наличие резерва  $\beta \sum_{k,q} C_{k,q}(h)$ . В течение времени  $t \in [t_k, T]$  должны выполняться заказы со сроком  $t_k + S_q \leq T$ , поэтому

$$NG_q(h, l) \geq (1-\beta) \sum_{\substack{k, \\ t_k + S_q \leq T}} C_{k,q}(h). \quad (3)$$

Предприятие ставит своей целью минимизировать затраты производства, связанные с хранением труб:

$$z_1 = P_1 \sum_{h,k} NT_k(h),$$

образованием неликвидов к моменту времени  $t_k = T$ :

$$z_2 = P_2 \sum_h NT_k(h)$$

и издержками, вызванными срывом сроков выполнения заказов:

$$z_3 = P_3 \left( \sum_{h,l,q} NG_q(h, l) - (1-\beta) \sum_{k,q} C_{k,q}(h) \right).$$

Коэффициенты  $P_1, P_2$  и  $P_3$  определяют степень значимости каждого из критериев  $z_1, z_2$  и  $z_3$  соответственно. Таким образом, получаем задачу условной многокритериальной оптимизации, которая с помощью линейной свертки может быть сведена к следующей задаче однокритериальной оптимизации:

необходимо обеспечить минимум функции  $z_1 + z_2 + z_3$  за счет подбора комплектаций  $C_{k,q}(h)$  и поставок трубы  $Y_k(h)$ , т. е.:

$$z_1 + z_2 + z_3 \rightarrow \min \quad (4)$$

при условиях (1)–(3).

Если при решении задачи принять во внимание тот факт, что продолжительность наиболее критичных операций азотирования и хромирования равна продолжительности одной рабочей смены (фактически сутки), и сетку по времени  $t_k$  тоже выбрать с шагом в одну смену, то получим, что в каждый момент времени на азотировании находится только один тип цилиндров. Более того, если будет известно, какой именно тип  $h$  находится на азотировании в каждый момент времени  $t_k$ , то задача (1)–(4) представляет собой задачу линейного программирования и может быть решена соответствующими методами. Результатом ее решения будут значения  $C_{k,q}(h)$  и  $Y_k(h)$ , а по значению величины (4) можно оценить качество каждого такого полученного решения.

В роли основного метода решения полученной задачи хорошо подходит генетический алгоритм, особи которого представляют собой распределения комплектаций по дням, а цель эволюции популяции – генерировать распределения партий цилиндров  $\sum_q C_{k,q}(h)$ , находящиеся на азотировании в моменты времени  $t_k$  рассматриваемого временного интервала планирования производства  $[0, T]$ . В качестве функции приспособленности особей выступает функция (4), для нахождения значения которой необходимо решить задачу линейного программирования (1)–(4) при известном распределении комплектаций. Для этого был использован симплекс-метод.

Каждая итерация генетического алгоритма подразумевает многократное решение задачи линейного программирования для определения приспособленности всех особей популяции. В конечном счете, генетический алгоритм подберет такое распределение комплектаций по дням, которое обеспечит минимум функции (4), при этом для него будут однозначно определены значения всех комплектаций  $C_{k,q}(h)$  и поставок трубы  $Y_k(h)$ .

Для решения задачи использован гибридный генетический алгоритм с вещественным кодированием (Тененев В. А., Паклин Н. Б. Гибридный генетический алгоритм с дополнительным обучением лидера // Интеллектуальные системы в производстве. 2003. № 2. С. 181–206), турнирным отбором и случайным выбором оператора скрещивания. Поскольку тип цилиндра представлен целым числом  $h = 1, 2, \dots, H$ , то переход от фенотипа к генотипу путем вещественного кодирования и наоборот реализован с помощью операций нормирования и округления.

Рассмотрим задачу со следующими исходными данными. Пусть количество возможных типов цилиндра равно  $H = 14$ , их характеристики представлены в табл. 1.

Период планирования производства составляет  $T = 30$  дней, за это время необходимо выполнить  $Q = 23$  заказа, табл. 2.

Таблица 1. Возможные типы цилиндров

Параметр	Тип цилиндра														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	
Диаметр, мм	36	36	40,75	40,75	48,42	48,42	53,8	53,8	57,64	57,64	70,34	70,34	83,04	83,04	
Длина, мм	3700	4300	3700	4300	3700	4300	3700	4300	3700	4300	3700	4300	3700	4300	
Максимальный размер партии на азотировании, шт.	47	47	47	47	47	47	47	47	47	36	36	24	24	12	12

Таблица 2. Информация о заказах в плановом периоде

Номер заказа	Количество изделий, шт	Вид изделия (по типу цилиндра)
1	2	1
2	18	2
3	14	2
4	12	3
5	47	4
6	84	4
7	17	5
8	9	5
9	37	6
10	20	6
11	10	7
12	15	7

Номер заказа	Количество изделий, шт	Вид изделия (по типу цилиндра)
13	83	8
14	18	8
15	20	9
16	14	9
17	68	10
18	20	10
19	19	11
20	132	12
21	33	12
22	9	13
23	15	14

В результате применения описанного выше подхода для решения представленной задачи было найдено оптимальное решение, которому соответствует показанное на рис. 1 распределение видов изделий по дням их изготовления с начала планового периода. Такое распределение есть не что иное, как найденное генетическим алгоритмом сочетание партий цилиндров  $\sum_q C_{k,q}(h)$ , находящихся на азотировании в соответствующие моменты времени.

Для реализации полученного плана производства необходимо обеспечить соответствующее количество цилиндров каждого типа (рис. 2).

В соответствии с полученным решением, можно составить план изготовления изделий различной длины (4300 и 3700 мм) с учетом того, что в случае крайней необходимости из более длинной заготовки может быть получена более короткая, хотя это и не желательно.

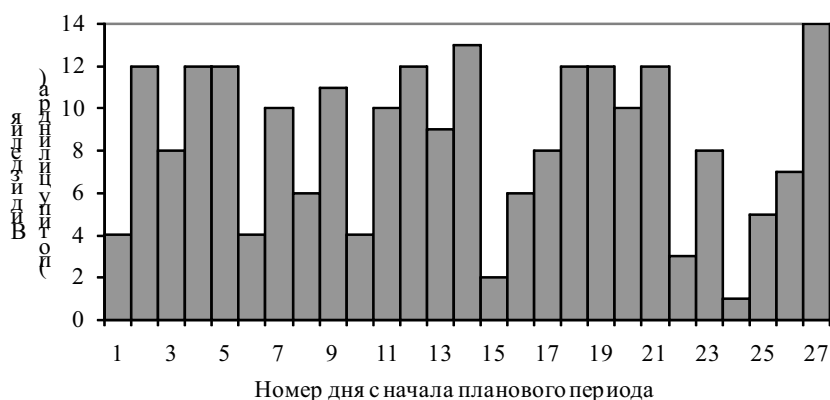


Рис. 1. Распределение комплектаций цилиндров по дням

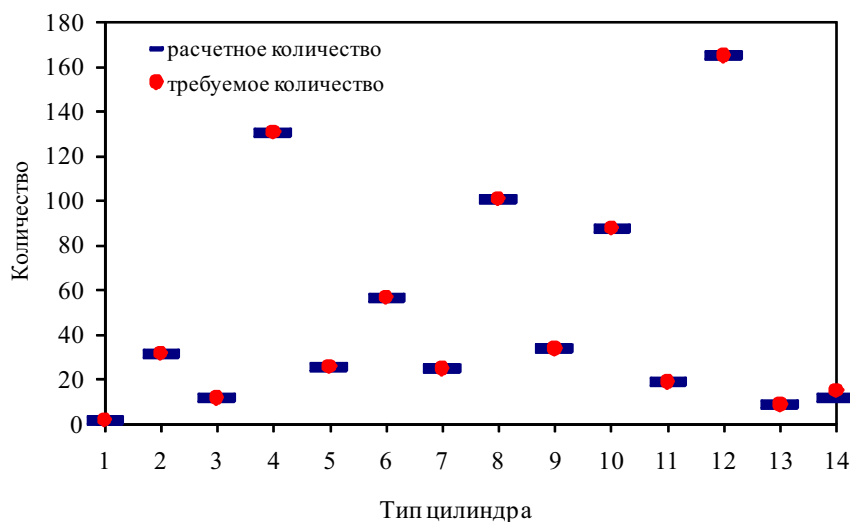


Рис. 2. Необходимое количество цилиндров каждого типа

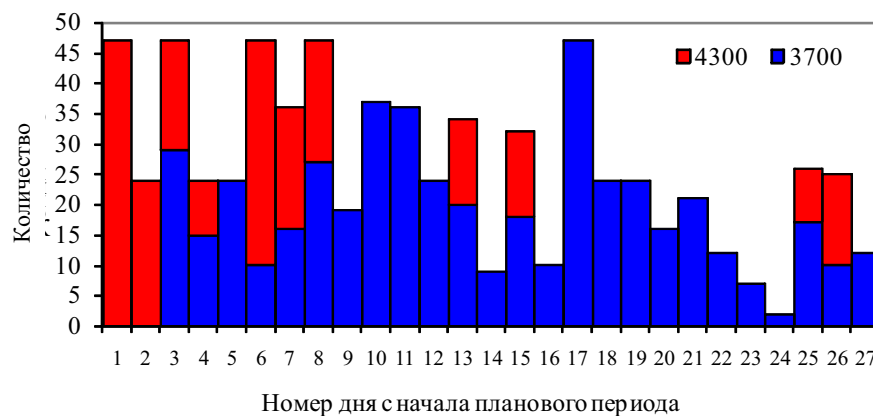


Рис. 3. План изготовления изделия длиной 4300 мм и 3700 мм по дням

По количеству производимых в день изделий из рис. 3 хорошо видно, в какие дни производство загружено максимально. Например, в 1-й и 6-й дни на азотировании находится максимальная партия из 47 цилиндров 4-го типа, в 3-й и 17-й дни – 8-го типа, а в 8-й день – 6-го типа. В то время как на 7-й день на азотирование поступает максимальная партия из 36 цилиндров 10-го типа и т. д. Есть и менее загру-

женные дни, когда на азотирование отправляется неполная партия цилиндров, например, 14-й, 23-й и 24-й дни с начала планового периода.

Требуемое количество основного ресурса, т. е. трубы каждого вида на изготовление цилиндров, которое необходимо иметь в запасе для успешного выполнения запланированных заказов, представлено в виде диаграммы на рис. 4.

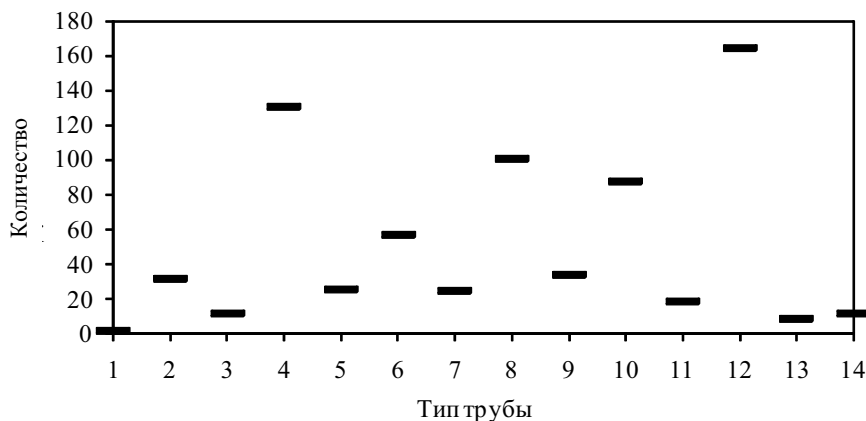


Рис. 4. Необходимые запасы трубы

Предлагаемый подход к решению задачи управления запасами позволяет спланировать и наладить поставки специфичного сырья и при необходимости максимально загрузить производственную линию для выполнения срочного заказа. Использование генетического алгоритма в качестве основного метода

решения делает подход более гибким и дает возможность учесть все наиболее важные требования, даже несмотря на то, что полученная модель является многокритериальной, а приспособленность особой генетического алгоритма определяется в результате решения задачи условной оптимизации.

\* \* \*

*G. A. Blagodatsky*, PhD in Engineering, Associate Professor, Kalashnikov ISTU

*V. A. Tenenev*, DSc (Physics and Mathematics), Kalashnikov ISTU

*A. S. Shaura*, PhD in Engineering, Associate Professor, Kalashnikov ISTU

*D. S. Shaura*, Programming engineer, Izhevsky Radiozavod Ltd.

**Numerical Implementation of the Algorithm of Inventory Management for Long Term Supply of Components at Presence of “Bottle-necks” of Production Cycle**

*The paper presents a model of inventory management and managing production schedule in the planning production task. The method of attack based on hybrid genetic algorithm with a linear programming task solution at determining a target function is proposed.*

**Keywords:** optimal planning, optimization of the production line, linear programming problem, simplex method, genetic algorithm.

Получено: 09.12.16