

УДК 681.5

# УПРАВЛЕНИЕ ДИСКРЕТНЫМ ПРОИЗВОДСТВОМ В УСЛОВИЯХ INDUSTRY 4.0

**В.М. Чадеев**

*Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН*  
Россия, 117997, Москва, Профсоюзная ул., 65  
E-mail: [chavama@ipu.ru](mailto:chavama@ipu.ru)

**Н.И. Аристова**

*Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН*  
Россия, 117997, Москва, Профсоюзная ул., 65  
E-mail: [avtprom@ipu.ru](mailto:avtprom@ipu.ru)

**Ключевые слова:** дискретное производство, абстрактная модель производства, обратная связь по продукции, техобслуживание, степень автоматизации, роботы, Industry 4.0.

**Аннотация:** Предложена универсальная математическая модель дискретного производства, позволяющая строить производственные планы по выпуску годной готовой продукции в разных производственных условиях. Показаны возможности использования теории при производстве с обратной связью по продукции, с использованием техобслуживания технических средств, при полностью автоматическом производстве. Отмечается правомерность использования предложенного подхода в условиях перехода к Industry 4.0

## 1. Введение

Четвертая промышленная революция (Industry 4.0) – переход на полностью автоматизированное цифровое производство, управляемое интеллектуальными системами в режиме реального времени в постоянном взаимодействии с внешней средой, выходящее за границы одного предприятия, с перспективой объединения в глобальную промышленную сеть вещей и услуг. По данным The Economist Intelligence Unit, 63% зарубежных производственных компаний либо уже претерпели существенные цифровые преобразования своих бизнес-процессов, либо находятся в процессе трансформации части организации, а 19% разрабатывают стратегию цифровой трансформации. Такие стремительные действия со стороны предприятий обусловлены их желанием не только сохранять конкурентоспособность в современных условиях, но и достичь принципиально нового уровня производительности и совершенствования различных специфических аспектов производства. А для этого предприятиям необходимо использовать новые технологии и данные для модернизации цепочек поставок и повышения прозрачности производственных процессов.

Разработчики же средств и систем автоматизации, информационных технологий в ответ на запросы рынка создают инновационные решения, позволяющие использовать преимущества всех компонентов Industry 4.0, к которым относятся: элементы Internet вещей, алгоритмы искусственного интеллекта, технологии машинного обучения и самообучения, облачные вычисления, большие данные, компьютерное моделирование,

элементы дополненной реальности. Вполне ожидаемо, что этот список будет дополняться [1].

Использование компонентов Industry 4.0 позволяет предприятиям выстраивать производственные планы с меньшим числом ошибок, оперативно взаимодействовать с производимыми объектами и при необходимости адаптироваться под новые потребности потребителей [2].

Таким образом, общая тенденция развития промышленности заключается в вытеснении человека из сферы производства и замены его автоматами. По мере расширения сферы применения автоматов на производстве предметов потребления их собственное производство становится серийным, а по некоторым позициям и массовым. Становится выгодной автоматизация производства самих автоматов. Возникает производственная обратная связь, по которой изделия (автоматы), изготовленные на конвейере используются на этом же конвейере для автоматизации их собственного производства.

Рассмотрим теорию построения производственного плана для дискретного производства, позволяющую учесть особенности обратной связи по продукции. Данная теория будет справедливой, в том числе для полностью автоматизированных цифровых производств.

## 2. Построение производственного плана для дискретного производства

### 2.1. Абстрактная модель производства

Предлагается универсальная абстрактная математическая модель производства, использующая *измеримые* характеристики реального производства. Здесь в качестве основных характеристик технологических процессов и характеристик автоматов выбраны:

- $a$  – время выполнения технологической операции человеком,
- $b$  – время выполнения технологической операции роботом,
- $q$  – вероятность правильного выполнения технологической операции человеком,
- $p$  – вероятность правильного выполнения технологической операции роботом,
- $T$  – время жизни робота,
- $\lambda$  – стоимость единицы рабочего времени робота.

В процессе изготовления изделия часть операций выполняет человек, а часть операций автоматизирована. Для автоматизации операций используются роботы. Теоретически каждую технологическую операцию может выполнить или робот, или человек. Задача состоит в том, чтобы распределить выполнение технологических операций между роботами и людьми таким образом, чтобы время изготовления годного узла была минимальна.

Используется понятие «степень автоматизации», которое определяет: какую часть одинаковых технологических операций выполняет робот, а какую – человек. Степень автоматизации операции  $j$ -го вида  $\alpha_j$  может принимать значения только в диапазоне от 0 до 1. При полной автоматизации все операции выполняет робот и  $\alpha_j = 1$ . На полностью неавтоматизированном предприятии все операции выполняет человек и  $\alpha_j = 0$ .

В рамках модели стоимость (или время) изготовления изделия системой роботов выражается следующим образом [3]:

$$(1) \quad G_k(\alpha) = \sum_{i=1}^m \alpha_{0i} b_{0i} \lambda_0 n_{ki} + \sum_{i=1}^m \alpha_{1i} b_{1i} \lambda_1 n_{ki} + \dots + \sum_{i=1}^m \alpha_{fi} b_{fi} \lambda_f n_{ki},$$

где  $m$  – количество видов технологической операции, необходимых для изготовления изделия,  $b_{ij}$  – время выполнения технологической операции  $i$ -го вида автоматом  $j$ -го типа,  $\lambda_j$  – стоимость единицы рабочего времени автомата  $j$ -го типа,  $g_i$  – время выполнения технологической операции  $i$ -го вида человеком,  $f$  – общее количество типов роботов, доступных для автоматизации,  $n_{ij}$  – количество одинаковых технологической операции  $i$ -го вида, необходимых для изготовления изделия  $G_k(\alpha)$ .

В (1) первая сумма – это затраты человека, вторая – затраты робота первого типа, последняя – затраты робота  $f$ -го типа.

Коэффициенты автоматизации  $\alpha_{ij}$  образуют матрицу автоматизации  $\alpha$ :

$$(2) \quad \alpha = \begin{pmatrix} \alpha_{01} & \alpha_{02} & \cdots & \alpha_{0j} & \cdots & \alpha_{0m} \\ \alpha_{11} & \alpha_{12} & \cdots & \alpha_{1j} & \cdots & \alpha_{1m} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ \alpha_{f1} & \alpha_{f2} & \cdots & \alpha_{fj} & \cdots & \alpha_{fm} \end{pmatrix}.$$

Изделие, изготовленное за время (1), может оказаться бракованным. Вероятность, что при данном распределении работ  $\alpha$ , не будет сделано ни одной ошибки, принимает вид:

$$(3) \quad P(\alpha) = \prod_{i=1, j=1}^{n, m} p_{ij}^{\alpha_{ij} n_j} q_j^{(1-\alpha_{ij}) n_j},$$

где  $p_{ij}$  – вероятность правильного выполнения операции  $j$ -го вида роботом  $i$ -го типа,  $q_j$  – вероятность правильного выполнения операции  $j$ -го вида человеком,  $\alpha_{ij}$  – степень автоматизации операции  $j$ -го вида роботом  $i$ -го типа.

## 2.2. Модель дискретного производства с обратной связью

Будем рассматривать предприятие дискретного типа, часть продукции которого поступает на склад готовой продукции и отгружается заказчиком, часть уходит в брак, а отдельные роботы будут в дальнейшем использоваться на этом же заводе для производства себе подобных роботов. В этом заключается обратная связь: изделие выпустили, а затем вернули на то же предприятие [3].

Необходимость наличия обратной связи на такого рода производствах объясняется ограниченным сроком службы каждого робота  $T$ . При этом часть ресурса робота затрачивается на самовоспроизведение, а оставшееся время – на сборку готовой продукции.

На производстве задействованы люди и роботы. Как и в предыдущем разделе, обозначим через  $\alpha$  оптимальное распределение работ между роботом и человеком (степень автоматизации). Тогда  $A(\alpha)$  – затраты человека на изготовление робота,  $B(\alpha)$  – затраты робота на изготовление робота.

Свободное время робота, предназначенное для сборки готовой продукции, можно вычислить по формуле:

$$(4) \quad \tau = T - B(\alpha).$$

При этом срок службы робота должен быть больше времени, необходимого для самовоспроизведения, то есть должно выполняться неравенство  $TP(\alpha) > B(\alpha)$ . В противном случае предприятие не сможет функционировать.

Стоимость единицы рабочего времени робота равна:

$$(5) \quad \lambda(\alpha) = \frac{A(\alpha)}{TP(\alpha) - B(\alpha)}.$$

Каждая технологическая операция, реализуемая человеком и роботом, характеризуется вероятностью ее правильного выполнения. Вероятность изготовления годного робота  $P(\alpha)$  рассчитывается по (3).

### 2.3. Модель дискретного производства с обратной связью и элементами техобслуживания

Будем рассматривать предприятие дискретного типа, на котором в производственном процессе задействованы роботы, жизненный цикл которых  $T$  может быть увеличен в результате проведения техобслуживания [4].

На таком производстве стоимость единицы рабочего времени робота равна:

$$(6) \quad \lambda(\alpha, \beta) = \frac{A_0 + A(\alpha) + A_1(\beta)}{(1 + \gamma)TP(\alpha) - B(\alpha) - B_1(\beta)},$$

где  $\gamma$  – показатель увеличения ресурса робота в результате техобслуживания,  $\beta$  – степень автоматизации операций техобслуживания ( $0 \leq \beta \leq 1$ ),  $A_0$  – время затраченное человеком на ту часть работ по изготовлению робота, которая в принципе не может быть автоматизирована,  $A(\alpha)$  – время затраченное человеком на ту часть работ по изготовлению робота, которая может быть автоматизирована,  $B(\alpha)$  – время затраченное роботом на выполнение автоматизированных технологических операций,  $P(\alpha)$  – вероятность правильного выполнения всех технологических операций по изготовлению робота,  $A_1(\beta)$  – время по выполнению операций техобслуживания человеком,  $B_1(\beta)$  – время по выполнению операций техобслуживания роботом.

### 2.4. Проектирование полностью автоматизированного производства

Предложенный выше математический аппарат может быть применен для организации полностью автоматизированного производства. При этом затраты человека в этих расчетах учитываться не будут. Вектор автоматизации будет равен 1.

При проектировании полностью автоматизированного производства необходимо выполнить следующую последовательность действий.

1) Вычислить оптимальный вектор автоматизации, соответствующий имеющейся системе роботов и заданному списку технологических операций. Необходимо разоб-  
раться две схемы автоматизации: одна обеспечит минимальное время изготовление изделий, другая – минимальную их стоимость.

2) Вычислить стоимость изделий при изготовлении по оптимальной схеме.

3) Определить объем занятости каждого типа роботов.

5) Определить необходимое число роботов каждого типа.

6) Определить оптимальную схему автоматизации исходными роботами.

7) Определить оптимальную схему автоматизации изготавливаемыми роботами.

## 3. Заключение

Таким образом, разработан математический аппарат, позволяющий строить и анализировать производственные планы для предприятий дискретного типа как при автоматизированном типе производства, так и при полностью автоматическом безлюдном производстве. Использование предложенной теории может быть полезно при реализации концепции Industry 4.0 и сопутствующих ей технологий [5].

## Список литературы

1. Шваб К. Четвертая промышленная революция. М.: Эксмо, 2016.
2. Аристова Н.И., Чадеев В.М. Обзор инновационных платформ IoT // Автоматизация в промышленности. 2018. № 7. С. 8-13.
3. Чадеев В.М., Аристова Н.И. Самовоспроизведение механических роботов. М. СИНТЕГ. 2012. 312 с. ISBN 978-5-89638-123-5
4. Chadeev V.M., Aristova N.I. Simulation of Discrete Manufacturer with an End Product Feedback // IFAC Proceedings Volumes. 2013. Vol. 46, No. 9. P. 1230-1233.
5. Григорьев С.Н., Мартинов Г.М., Чадеев В.М., Аристова Н.И. Цифровое машиностроение: тенденции и перспективы развития // Автоматизация в промышленности. 2017. № 5. С. 3-4.