

# Управление уровнем автоматизации при производстве роботов. Вероятностная схема. Часть 1

Н.И. Аристова

**Аннотация.** . Рассмотрена вероятностная однопродуктовая модель производства роботов. Производится сравнение трех схем организации дискретного производства: ручное, с использованием роботов, изготовленных на другом заводе, и с использованием роботов, произведенных на данном предприятии (самовоспроизведение). Рассмотрен алгоритм оптимального распределения работ между роботами и людьми по критерию минимизации участия человека в производственном процессе. Показано, что для достижения указанной цели и эффективного управления предприятием дискретного типа с обратной связью по готовой продукции, необходимо использовать стратегию самовоспроизведения.

**Ключевые слова:** самовоспроизведение, роботы, обратная связь по продукции, уровень автоматизации, единица рабочего времени робота, вероятность правильного выполнения.

## Введение

Задача распределения работ между оборудованием и человеком является традиционной для машиностроения. На заводах этим занимаются диспетчерские и планово-распределительные бюро (ПРБ), которые ежедневно решают эту задачу. Однако в теоретическом плане эта задача переборная и *оптимальное* решение требует громадных вычислительных ресурсов. Множество работ посвящено получению оценок решений, т.к. точное решение невозможно. При постановке задачи используются значения времени выполнения технологических операций. Но реальная задача еще более сложна, поскольку стоимость конечного продукта определяется не только и не столько временами выполнения операций, сколько уровнем брака, который и определяет стоимость *годного* изделия.

Дело в том, что даже очень маленький уровень брака на отдельных операциях при большом числе операций в изделии приводит большому уровню брака в готовом изделии. В предлагаемой статье предпринимается попытка

решения задачи распределения работ между роботизированным комплексом и человеком при наличии брака в производственном процессе. Рассматривается дискретное производство с обратной связью по готовой продукции.

## 1. Постановка задачи

Рассматривается производственный процесс по изготовлению роботов, в котором задействованы люди и роботы. Роботы характеризуются ограниченным сроком службы  $T$ . Отсюда возникает необходимость в наличии обратной связи по готовой продукции: робот со склада готовой продукции заменяет робота, выработавшего свой ресурс, на конвейере. Будем рассматривать технологические операции, которые может выполнять как человек, так и робот. В этом случае себестоимость выпускаемого изделия складывается из затрат робота и трудозатрат человека.

Задачей настоящей работы является нахождение оптимального распределения работ между человеком и роботом. Проблема возникает

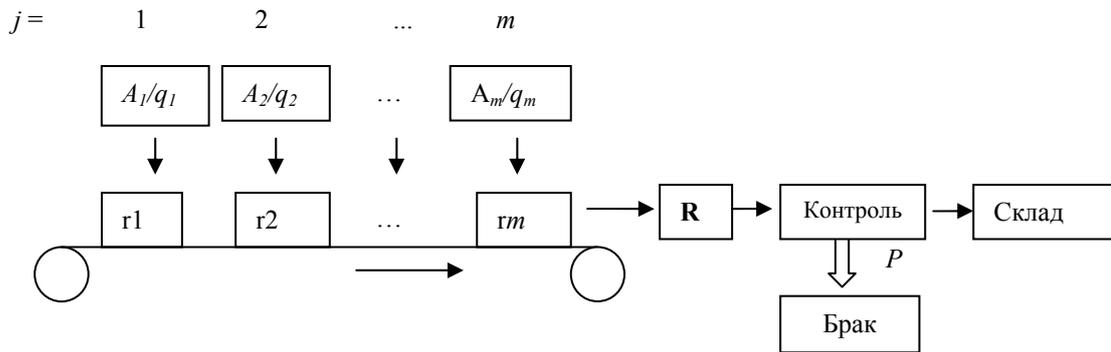


Рис. 1. Схема ручного изготовления робота

из-за того, что существуют операции, выполнение которых роботом может оказаться неэффективным из-за его ограниченного срока жизни и вероятностного выполнения технологических операций. Определение необходимой степени автоматизации  $\alpha$  должно проводиться по критерию минимизации участия человека в производственном процессе.

## 2. Ручное изготовление

Рассмотрим предприятие по производству роботов, на котором все технологические операции выполняют люди. Будем предполагать, что вероятность правильного выполнения технологической операции человеком  $q$  меньше 1. Это предприятие не автоматизировано. Схема такого производства показана на Рис. 1.

Для изготовления робота на конвейере используется  $m$  видов технологических операций. Все операции выполняются человеком. Рабочий  $A_1$  выполняет технологическую операцию первого вида с вероятностью правильного выполнения  $q_1$ , рабочий  $A_2$  – технологическую операцию второго вида с вероятностью правильного выполнения  $q_2$  и т. д. То есть технологические операции могут быть выполнены человеком неправильно, и бракованный технологический узел перейдет на следующую технологическую операцию. Готовый робот  $R$  выходит с конвейера и поступает на склад готовой продукции. Вероятность правильной сборки робота равна  $P$ .

Человек затратит на изготовление робота на данном предприятии время:

$$\Phi_1(\alpha = 0) = \sum_{j=1}^m n_j a_j, \quad (1)$$

где  $n_j$  - общее число операций  $j$ -го вида, необходимое для изготовления робота,  $m$  - общее число видов технологических операций, используемых при сборке робота,  $a_j$  - время, затрачиваемое человеком на выполнение операции  $j$ -го вида. Однако изготовленный за время (1) робот из-за ошибок изготовления будет годным только с некоторой вероятностью  $P$ . Вычислим эту вероятность.

Предположим статистическую независимость всех технологических операций по сборке робота, т.е. будем предполагать, что вероятность правильно выполнить операцию не зависит от вероятности правильного выполнения других операций.

Тогда вероятность изготовления годного робота человеком равна:

$$P(\alpha = 0) = \prod_{j=1}^m q_j^{n_j}, \quad (2)$$

где  $q_j$  - вероятность правильного выполнения технологической операций  $j$ -го вида человеком.

Запишем стоимость робота на предприятии с учетом вероятности правильного выполнения операций человеком:

$$\Phi_1(\alpha = 0) = \frac{\sum_j a_j n_j}{\prod_j q_j^{n_j}} \quad (3)$$

Стоимость единицы рабочего времени робота зависит от времени его жизни и вероятности правильного выполнения технологических операций и для ручного производства принимает вид:

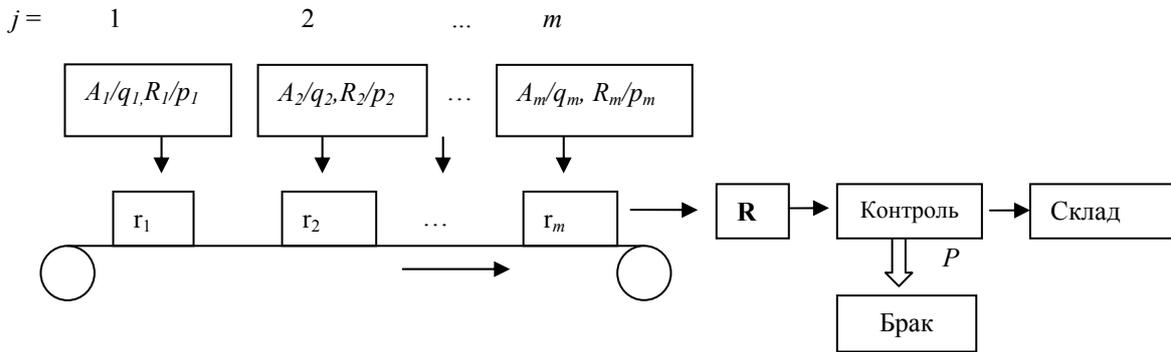


Рис. 2. Схема производства при использовании «чужих» роботов

$$\lambda_1(0) = \frac{1}{T} \frac{\sum_j^m a_j n_j}{\prod_j^m q_j^{n_j}}. \quad (4)$$

### 3. Использование роботов, изготовленных вне предприятия

Рассмотрим далее предприятие, на котором часть операций выполняет человек, а часть операций автоматизирована. Для автоматизации некоторых операций на данном заводе используются роботы, изготовленные на заводе, где автоматизация отсутствует.

В схеме, показанной на Рис. 2, 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 стоимость изготовленного робота была минимальна. При этом и роботы, и человек выполняют технологические операции с некоторой вероятностью правильного изготовления. Конструкция реальных роботов не позволяет выполнять все виды технологических операций. Среди «невыполняемых» могут быть и те, которые необходимы для их собственного изготовления. Более того, не все потенциально выполняемые технологические операции выгодно автоматизировать для минимизации стоимости изготавливаемого робота. Алгоритм выбора оптимального уровня автоматизации будет изложен ниже. Формализуем вначале процедуру вычисления стоимости робота в этом случае.

Вероятность правильного изготовления нового робота совместно человеком и роботом, изготовленном на другом предприятии, при условии их статистической независимости равна:

$$P(\alpha) = \prod_{j=1}^m q_j^{\alpha_j n_j} p_j^{(1-\alpha_j) n_j}, \quad (5)$$

где  $p_j$  и  $q_j$  - вероятность правильного выполнения операции  $j$ -го вида роботом и человеком соответственно,  $\alpha_j$  - степень автоматизации операции  $j$ -го вида.

Степень автоматизации операции  $j$ -го вида может принимать только значения в диапазоне:

$$0 \leq \alpha_j \leq 1 \quad (j = 1, 2, \dots, m).$$

Степень автоматизации определяет, какая часть одинаковых технологических операций данного вида выполняется роботом. При полной автоматизации, когда все  $n_j$  операций  $j$ -го вида выполняет робот,  $\alpha_j$  равно 1. На полностью неавтоматизированном предприятии все операции выполняет человек  $\alpha_j$  равно 0.

Стоимость робота, выпускаемого на данном заводе, имеет вид

$$\Phi_2(\alpha) = \frac{\sum_{j=1}^m (1-\alpha_j) a_j n_j + \sum_{j=1}^m \alpha_j n_j \lambda_1(0) b_j}{\prod_{j=1}^m p_j^{\alpha_j n_j} q_j^{(1-\alpha_j) n_j}}. \quad (6)$$

В (6) первая сумма в числителе описывает прямые затраты труда человека на производство данного робота с учетом вероятностного характера выполнения технологических операций, вторая сумма – косвенные затраты труда человека с учетом вероятностного характера выполнения технологических операций.

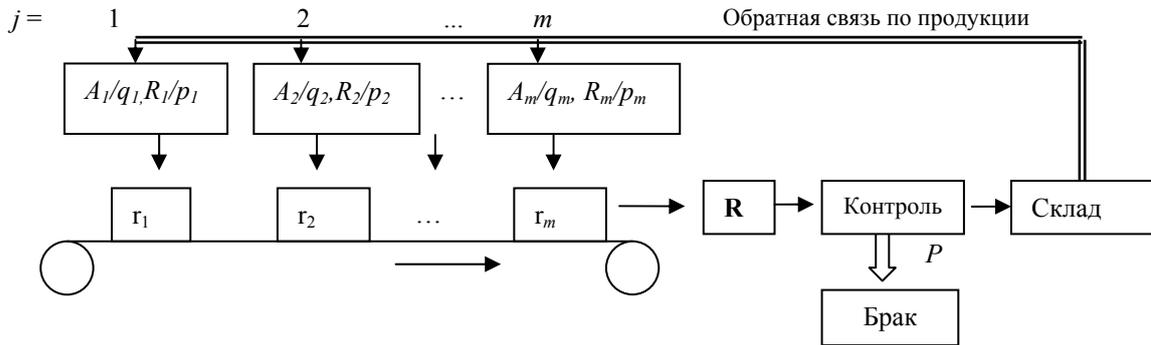


Рис. 3. Схема производства при использовании схемы самовоспроизведения

Стоимость единицы рабочего времени робота зависит от времени его жизни. Ресурс изготовленного робота буден равен исходному времени жизни  $T$ , поскольку робот никаких операций не выполнял. Тогда стоимость единицы рабочего времени робота при использовании на заводе труда человека и покупных роботов принимает вид:

$$\lambda_2(\alpha) = \frac{\sum_{j=1}^m (1 - \alpha_j) a_j n_j + \sum_{j=1}^m \alpha_j n_j \lambda_1(0) b_j}{T \prod_{j=1}^m p_j^{\alpha_j n_j} q_j^{(1 - \alpha_j) n_j}}. \quad (7)$$

#### 4. Изготовление с самовоспроизведением

Рассмотрим далее предприятие, на котором часть операций выполняет человек, а часть операций автоматизирована. Для автоматизации некоторых операций используются роботы, произведенные на данном заводе. Другими словами, в этом случае реализована обратная связь по готовой продукции или используется схема самовоспроизведения роботов. При этом и роботы, и человек выполняют технологические операции с некоторой вероятностью правильного выполнения. Схема такого производства приведена на Рис. 3.

Формула (6) определяет стоимость робота при его изготовлении с помощью покупных роботов, стоимость единицы рабочего времени которых равна  $\lambda_j$ . При использовании покупных роботов в (6) подставляется значение  $\lambda_1(0)$ , а при использовании сделанных на заводе -  $\lambda_2(\alpha)$ .

Стоимость роботов, изготовленных с использованием роботов собственного производства, будет равна:

$$\Phi_3(\alpha) = \frac{\sum_j (1 - \alpha_j) a_j n_j + \sum_{j=1}^m \alpha_j n_j \lambda_2(\alpha) b_j}{\prod_{j=1}^m p_j^{\alpha_j n_j} q_j^{(1 - \alpha_j) n_j}}. \quad (8)$$

Соответственно стоимость единицы рабочего времени робота будет равна:

$$\lambda_3(\alpha) = \frac{\sum_j (1 - \alpha_j) a_j n_j + \sum_{j=1}^m \alpha_j n_j \lambda_2(\alpha) b_j}{T \prod_{j=1}^m p_j^{\alpha_j n_j} q_j^{(1 - \alpha_j) n_j}}. \quad (9)$$

Задача состоит в том, чтобы найти такой вектор автоматизации  $\alpha$ , который бы минимизировал выражение (9). Из-за нелинейности функции  $\lambda_3(\alpha)$  отсутствует замкнутое решение по  $\alpha$ . Однако возможно получить численное решение. Как показано в [1], оптимальный вектор автоматизации  $\alpha_{\text{опт}}$  имеет своими компонентами только 0 и 1, что определяет перебор  $2^m$  вариантов.

#### 5. Пример

Пусть для изготовления промышленного робота используется четыре вида технологических операций. Первую операцию робот выполнять не может. Остальные три операции могут выполняться и роботом, и человеком.

Ресурс изготовленного робота обозначим через  $T=600$ .

Табл. 1

Вид технологической операции $j$	Время выполнения операции человеком $a_j$	Время выполнения операции роботом $b_j$	Вероятность правильного выполнения операции человеком $q_j$	Вероятность правильного выполнения операции роботом $p_j$	Число одинаковых операций $n_j$
1	1	11	0,99	0,99	10
2	2	3	0,99	0,98	10
3	5	3	0,98	0,98	15
4	4	$\infty$	0,99	-	10

Табл. 2

Вектор автоматизации	$\alpha(0000)$	$\alpha(0001)$	$\alpha(0010)$	$\alpha(0011)$	$\alpha(0100)$	$\alpha(0101)$	$\alpha(0110)$	$\alpha(0111)$
$\Phi_2$ (без самовоспроизведения)	179	336	280	358	<b>165</b>	235	<b>169</b>	247
$\Phi_3$ (с самовоспроизведением)	265	304	270	313	<b>151</b>	190	<b>144</b>	186

В Табл. 1 заданы временные значения выполнения четырех видов технологических операций роботом и человеком, вероятности их правильного выполнения, а также число одинаковых технологических операций.

Используя данные из Табл. 1, определим стоимость робота, изготовленного вручную:

$$\Phi_1(0) = \frac{\sum_{j=1}^m a_j n_j}{\prod_{j=1}^m q_j^{n_j}} = 265. \quad (11)$$

Стоимость единицы рабочего времени робота будет равна

$$\lambda_1(0) = \frac{\Phi_1(0)}{T} = 0,442. \quad (12)$$

Результаты расчетов по формулам (6) и (8) для различных вариантов автоматизации сведены в Табл. 2.

На Рис. 4 показана зависимость стоимости робота от разных схем автоматизации. В первой позиции – стоимость робота при ручном изготовлении, когда вектор автоматизации  $\alpha(0000)$  содержит только нули. В остальных позициях вектор автоматизации принимает последовательно все значения от 0001 до 0111 (четвертую операцию робот выполнять не может, и там всегда будет ноль).

Как видно из Рис. 4, минимальная стоимость без самовоспроизведения достигается при значении вектора автоматизации 0100. При этом стоимость робота уменьшается от 265 до 165, то есть более чем в 1,5 раза. Использование

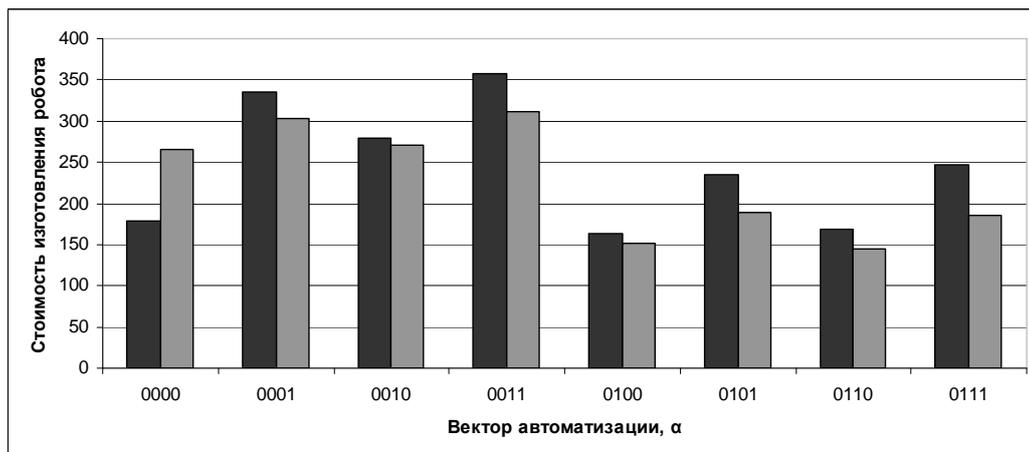


Рис. 4 Стоимость роботов при разных уровнях автоматизации с использованием самовоспроизведения (серый), без использования самовоспроизведения (черный)

эффекта самовоспроизведения позволяет еще более снизить стоимость робота до 144 при значении вектора автоматизации 0110.

Отметим также, что автоматизация какой-либо технологической операции сама по себе может и не снизить стоимость изготавливаемого робота. Например, на рисунке, когда вектор автоматизации равен  $a(0001)$ ,  $a(0010)$  и  $a(0011)$ , стоимость робота, изготовленного с/без использования эффекта самовоспроизведения, даже возрастает по сравнению с ручной сборкой.

## Заключение

В современных условиях производства при наличии в арсенале предприятий сложных технологических инструментов актуальной остается задача нахождения оптимального уровня автоматизации [2, 3].

Основные выводы.

1. Выполнение всех технологических операций только роботом в большинстве случаев не позволяет достичь максимального эффекта от автоматизации, так как любой робототехнический комплекс имеет ограниченный ресурс и выполняет технологические операции правильно с вероятностью, меньшей единицы.

2. Для достижения оптимального уровня автоматизации необходимо проводить расчеты и определять компоненты вектора автоматизации, позволяющие минимизировать затраты труда человека в производственном процессе. При этом необходимо учитывать вероятностный характер выполнения технологических операций человеком и роботом.

Наибольшего эффекта от автоматизации технологических операций, выполняемых правильно с вероятностью, меньшей единицы, можно достичь при использовании схемы производства роботов с применением самовоспроизведения, то есть на предприятиях с обратной связью по продукции.

## Литература

1. Чадеев В.М. Управление использованием роботов для производства роботов // Автоматика и телемеханика. 1998. №12.
2. Ceryan O., Duenyas I., Koren Y. Optimal Control of an Assembly System with Demand for the End-Product and Intermediate Components // IIE Transactions 44 (5), 2012. P. 386-403.
3. Lindström V., Winroth M. Aligning manufacturing strategy and levels of automation: A Case Study // Journal of engineering and technology management. 2010. (27). 3-4. P. 148-159.

**Аристова Наталья Игоревна.** Старший научный сотрудник ИПУ им. В.А. Трапезникова РАН. Кандидат технических наук. E-mail: avtпром@yandex.ru