

---

## ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕХОБСЛУЖИВАНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ РОБОТОВ НА ПРЕДПРИЯТИЯ ДИСКРЕТНОГО ТИПА С ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ ПО ГОТОВОЙ ПРОДУКЦИИ

Н.И. Аристова, В.М. Чадеев (Москва)

### 1. Введение

Роботы занимают все большую нишу в системе автоматизации в промышленности. Общее число работающих на предприятиях роботов по статистике международной федерации робототехники (IFR) уже давно превысило миллион. В настоящее время актуальной становится задача автоматизации производства самих роботов как одного из наиболее перспективных видов автоматизации. По сути, возникает задача автоматизации производства автоматов – задача самовоспроизведения роботов.

Как всегда, актуальная проблема решается с двух сторон. С одной стороны, на практике в промышленности уже имеются примеры использования роботов на технологических линиях по производству роботов. Насколько это эффективно, покажет время. Дело в том, что установка робота на линии – сложная и дорогая задача, так как необходима соответствующая производственная инфраструктура, программное обеспечение и т.п. В настоящее время оборудование рабочего места робота по стоимости эквивалентно стоимости самого робота.

С другой стороны, появились работы с теоретическим анализом проблемы самовоспроизведения роботов в промышленности [1]. Проблема сложная и многогранная. Теоретические исследования ведутся по многим направлениям – от анализа глобальной ситуации с автоматизацией в промышленности [2] до простой задачи – автоматизировать или нет конкретную технологическую операцию на конкретном заводе в конкретном цехе. Значительное внимание уделяется расчетам оптимального уровня автоматизации [3, 4].

Уже первый теоретический анализ показал, что два основных фактора влияют на эффективность самовоспроизводящихся промышленных систем при производстве коммерческой продукции: *время изготовления изделия*, складывающееся из значений времени выполнения технологических операций, и *неизбежный брак* при выполнении всех технологических операций. Брак определяется вероятностью правильного выполнения операции. Проблема здесь состоит в том, что временные значения складываются, а вероятности перемножаются. Именно это делает самовоспроизводящиеся системы весьма чувствительными как к организации производства, так и к расположению элементов контроля.

*В работе рассматривается дискретное производство, выпускающее роботов или роботизированные комплексы. Часть продукции таких предприятий поступает на склад готовой продукции и отгружается заказчикам, часть уходит в брак, а отдельные роботы будут в дальнейшем использоваться на этом же заводе для производства себе подобных изделий. Такого типа предприятия будем оценивать наличием обратной связи по продукции. Каждый робот характеризуется ограниченным временным ресурсом  $T$ , который можно продлить в результате проведения технического обслуживания роботов.*

*В работе анализируется влияние технического обслуживания на качество работы самовоспроизводящейся системы. Работа имеет кроме технического еще и методический эффект, так как в ней объясняется, как можно вычислить параметры самовоспроизводящейся системы после введения техобслуживания в реальной системе.*

### 2. Основные уравнения

Уравнения, описывающие процесс самовоспроизведения роботов, подробно описаны в [1]. Основной критерий оптимизации, который там используется, – это стоимость

единицы рабочего времени робота. Этот критерий, а не стоимость робота, важен для потребителя. В самовоспроизводящейся системе роботов этот критерий выглядит так.

С учетом вероятности правильного изготовления выражение для стоимости единицы рабочего времени робота имеет вид:

$$\lambda(\alpha) = \frac{A(\alpha)}{TP(\alpha) - B(\alpha)}, \quad (1)$$

где  $A(\alpha)$  – затраты времени человека на изготовление робота,

$B(\alpha)$  – затраты времени робота на самовоспроизведение,

$T$  – ресурс робота,

$P(\alpha)$  вероятность правильного изготовления робота,

$\alpha$  – вектор распределения работ между роботами и людьми (вектор автоматизации  $\alpha = (\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n)$ ). Все компоненты вектора автоматизации лежат между 0 и 1.

Запишем уравнение для расчета затрат времени человека на изготовление робота:

$$A_N(\alpha) = \sum_{j=1}^m (1 - \alpha_j) a_j n_j, \quad (2)$$

где  $a_j$  – время, затрачиваемое человеком на выполнение операции  $j$ -го вида,

$n_j$  – число одинаковых операций  $j$ -го вида, которое необходимо выполнить для изготовления одного робота,

$m$  – общее число видов технологических операций, которые необходимы для изготовления робота.

Уравнение для расчета затрат времени робота на самовоспроизведение имеет вид:

$$B(\alpha) = \sum_{j=1}^m \alpha_j b_j n_j, \quad (3)$$

где  $b_j$  – время, затрачиваемое роботом на выполнение операции  $j$ -го вида. Заметим, что некоторые значения  $b_j$  могут быть равны бесконечности, и это будет иметь место для тех технологических операций, которые робот не может выполнить.

И робот, и человек выполняют технологические операции правильно с некоторой вероятностью, меньшей 1. Предположим статистическую независимость всех технологических операций по сборке робота. То есть будем предполагать, что вероятность правильно выполнить операцию не зависит от вероятности правильного выполнения других операций.

Тогда вероятность изготовления годного робота равна:

$$P(\alpha) = \prod_{i=1}^m p_i^{n_i \alpha_i} q_i^{(1 - \alpha_i) n_i}, \quad (4)$$

где  $p_j$  – вероятность правильного выполнения технологической операции  $j$ -го вида роботом,  $q_j$  – человеком.

Свойства критерия (1) были проанализированы и определены в [1]. Например, установлено, что оптимальный вектор автоматизации  $\alpha$ , минимизирующий (1), имеет своими компонентами суть только 0 и 1. То есть в оптимальной системе все технологические операции одного вида должны выполняться или все роботами, или все – человеком. Установлено также, что для существования самовоспроизводящейся системы должно соблюдаться условие физической возможности

$$TP > B. \quad (5)$$

Эти свойства самовоспроизводящихся систем будут использованы ниже.

### 3. Постановка задачи техобслуживания

Большинство современных технических изделий в процессе своей эксплуатации, как правило, требуют технического обслуживания – чистки, смазки, замены быстро изнашивающихся деталей. Это относится к автомобилям, самолетам и другим сложным изделиям. Такое обслуживание существенно увеличивает срок службы машин.

Кажется естественным, что использование техобслуживания, увеличивающего ресурс робота, будет эффективным и для самовоспроизводящихся роботов. Однако, учитывая особые свойства систем с самовоспроизведением (типа (5)), это, по крайней мере, не очевидно.

Второй возникающий вопрос: изменит ли введение техобслуживания оптимальный вектор автоматизации, который был определен без учета техобслуживания?

Ответам на эти вопросы и посвящена данная работа.

### 4. Уравнения, самовоспроизведения роботов с элементами техобслуживания

Рассмотрим случай, когда к обычной автономной эксплуатации робота добавляется еще техобслуживание, увеличивающее его ресурс на некоторую величину.

#### 4.1. Обслуживание человеком

Будем предполагать вначале, что это техобслуживание выполняет человек.

Для этого несколько видоизменим формулу (1), выделив ту часть работ, которая не может быть выполнена роботом. Тогда при отсутствии техобслуживания стоимость единицы рабочего времени робота вычисляется следующим образом:

$$\lambda(\alpha) = \frac{A_0 + A(\alpha)}{TP(\alpha) - B(\alpha)}, \quad (6)$$

где  $A_0$  – 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,

$T$  – ресурс робота при отсутствии его техобслуживания,

$P(\alpha)$  – вероятность правильного выполнения всех технологических операций,

$B(\alpha)$  – время, затраченное роботом на выполнение автоматизированных технологических операций.

Если в результате техобслуживания, на которое человеком затрачено время  $A_1$ , ресурс робота увеличился от  $T$  до  $T(1+\gamma)$ , то стоимость единицы рабочего времени робота станет равной

$$\lambda_1(\alpha) = \frac{A_0 + A(\alpha) + A_1}{(1+\gamma)TP(\alpha) - B(\alpha)}. \quad (7)$$

Очевидно, что техобслуживание имеет смысл, если оно приведет к снижению единицы рабочего времени (ЕРВР), то есть если будет соблюдено условие:

$$\lambda_1(\alpha) < \lambda(\alpha) \quad (8)$$

или подробно:

$$\frac{A_0 + A(\alpha)}{TP(\alpha) - B(\alpha)} > \frac{A_0 + A(\alpha) + A_1}{(1+\gamma)TP(\alpha) - B(\alpha)}. \quad (9)$$

Для примера рассмотрим простой одномерный случай с одной операции. Стоимость ЕРВР работа до техобслуживания определяется формулой:

$$\lambda(\alpha) = \frac{A_0 + a(1-\alpha)}{T - b\alpha} \quad (10)$$

После проведения техобслуживания стоимость ЕРВР изменится и будет равна:

$$\lambda_1(\alpha) = \frac{A_0 + a(1-\alpha) + A_1}{(1+\gamma)T - b\alpha} \quad (11)$$

где  $\gamma$  – коэффициент технического обслуживания (ТО).

На рис.1 приведены кривые зависимости стоимости единицы рабочего времени работы, построенные по формуле (11), для следующих параметров:  $A_0=0,4$ ;  $a=3$ ;  $b=10$ ;  $T=11$   $A_1=2$ ;  $\gamma$  изменяется в диапазоне  $0 \dots 1$ . Кривая  $\alpha=0$  соответствует ручному изготовлению технологической операции и ТО.

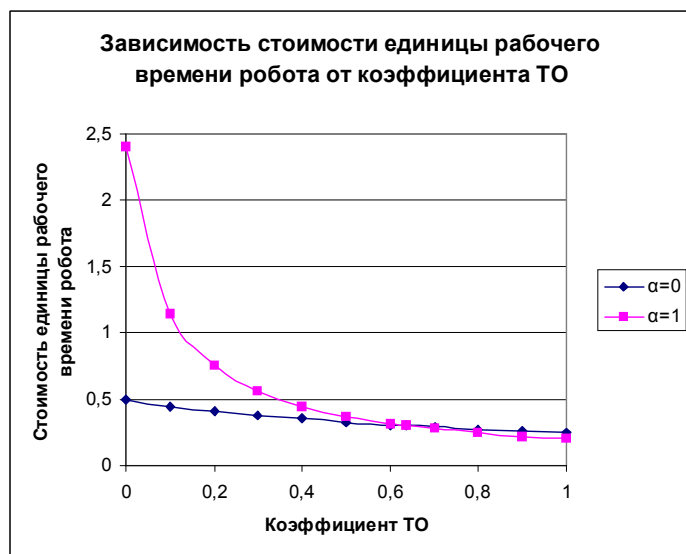


Рис. 1. Зависимость единицы рабочего времени работы от коэффициента ТО при  $\gamma(\alpha)$

Кривая  $\alpha=1$  соответствует автоматизированному изготовлению технологической операций и ТО. Как видно из рис.1, при заданных параметрах технологического процесса в начальной точке при  $\gamma=0$  автоматизация технологической операции и ТО значительно дороже (2,4 ед.), чем при ручном изготовлении и обслуживании (0,49 ед.). Далее с увеличением значения параметра  $\gamma$  и ручные, и автоматизированные операции приводят к снижению стоимости единицы рабочего времени. При  $\gamma \sim 0,63$  кривые пересекаются. А при  $\gamma=1$  стоимость автоматизированных работ будет дешевле ручных операций.

#### 4.2. Общий случай

Можно представить себе случай, когда робот участвует в своем собственном техобслуживании, например, смазывает перед работой шарниры. Тогда формула (7) для стоимости единицы рабочего времени работы изменится и примет вид:

$$\lambda_2(\alpha, \beta) = \frac{A_0 + A(\alpha) + A_1(\beta)}{(1+\gamma)TP(\alpha) - B(\alpha) - B_1(\beta)} \quad (12)$$

где  $(1-\beta)$  – часть технологических операций по техническому обслуживанию работа, которые может выполнить человек ( $0 < \beta < 1$ ),

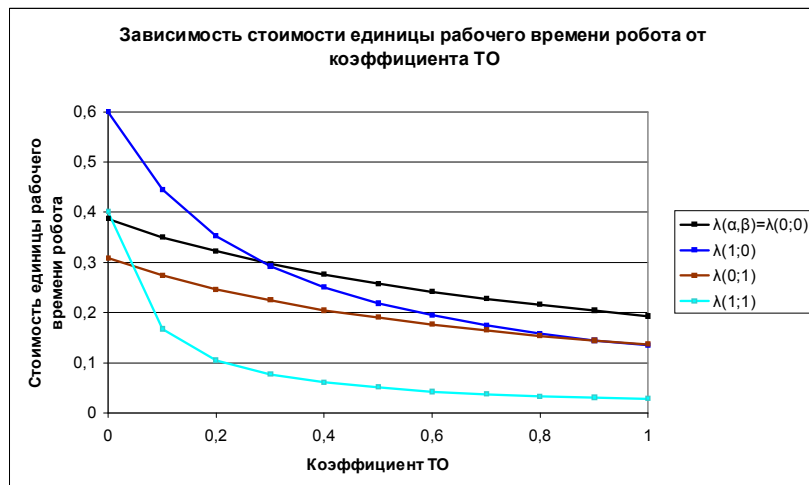
$A_1(\beta)$  – время по выполнению технологических операций человеком,

$B_1(\beta)$  – время по выполнению технологических операций роботом.

Для одномерного случая с одной операцией после проведения техобслуживания стоимость ЕРВР изменится и будет равна:

$$\lambda_2(\alpha, \beta) = \frac{A_0 + a(1-\alpha) + a_1(1-\beta)}{(1+\gamma)T - b\alpha - b_1\beta}; \quad T > b + b_1.$$

На рис. 2 приведены кривые зависимости стоимости единицы рабочего времени работа, построенные по формуле (11), для следующих параметров:  $A_0=0,4$ ;  $a=3$ ;  $b=10$ ;



**Рис. 2. Зависимость единицы рабочего времени работа от коэффициента ТО при  $\lambda(\alpha, \beta)$**

$T=14$   $a_1=2$ ;  $b_1=3$ ,  $\gamma$  изменяется в диапазоне  $0 \dots 1$ . Кривая  $\lambda(0,0)$  соответствует ручному выполнению технологической операции и ТО. Кривая  $\lambda(1,0)$  соответствует автоматизированному изготовлению технологической операции и ручному ТО. Кривая  $\lambda(0,1)$  соответствует ручному изготовлению технологической операции и автоматизированному ТО. Наконец, кривая  $\lambda(1,1)$  соответствует автоматизированному изготовлению и технологической операции.

Как видно из рис. 2, при заданных параметрах технологического процесса в начальной точке при  $\gamma=0$  самый дорогой случай соответствует  $\lambda(1,0)$ , самый дешевый  $\lambda(0,1)$ . Далее с увеличением значения параметра  $\gamma$  и ручные, и автоматизированные операции приводят к снижению стоимости единицы рабочего времени. При  $\gamma=1$  самый дорогой случай соответствует  $\lambda(0,0)$ , самый дешевый –  $\lambda(1,1)$ . То есть увеличение ресурса работа  $T$  приводит к удешевлению выполняемых им операций.

Необходимо отметить, что полученные результаты справедливы только для заданных в примере значениях переменных. При изменении значения любой переменной вычисления требуется повторять, чтобы определить оптимальный уровень автоматизации технологической операции и ТО. При этом далеко не во всех случаях автоматизация приведет к снижению стоимости единицы рабочего времени работа, как это было показано в примере.

## 5. Система имитационного моделирования

Для проверки работоспособности предложенного математического аппарата была разработана система имитационного моделирования, принципиальным элементом которой является учет брака при выполнении технологических операций (рис. 3).

Моделируемый технологический процесс состоит из ряда конвейеров, по которым передвигаются детали и узлы, из которых собирается робот. Вдоль конвейера установлены рабочие станции, выполняющие технологические операции (обозначены R), и станции, на которых происходит контроль (обозначены C). На станции может работать робот или человек. Администратор системы моделирования перед прогоном задает следующие параметры рабочих станций: исполнитель (робот или человек), время выполнения операции, вероятность брака при выполнении операции.

Система моделирования подсчитывает время работы человека на всех стадиях в стоимость изготавливаемого робота. Время работы робота во время выполнения операции записывается в его стаж. Если стаж превысил ресурс, то робот заменяется. На технологической станции система с заданной вероятностью фиксирует брак. На контрольной стан-

ции бракованные узлы отправляются в брак, их стоимость входит в стоимость изготавливаемого робота, а узел изготавливается заново.

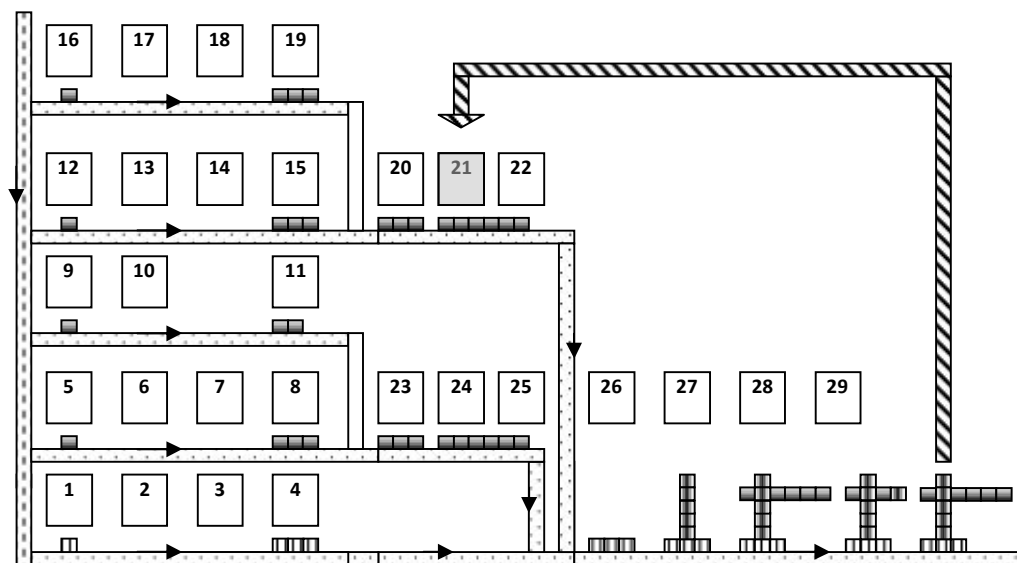


Рис. 2. Схема системы имитационного моделирования.

**R** – технологические станции, **C** – контрольные станции. Черными стрелками показаны направления движения конвейеров. Полосатая стрелка показывает, как происходит замена отказавшего 21-го робота одним из вновь изготовленных

## 5. Выводы

Рассмотрено влияние введения техобслуживания, увеличивающего ресурс робота, на работу самовоспроизводящейся системы роботов.

Показано, что введение технического обслуживания, даже увеличивающего ресурс робота, может как увеличить, так и уменьшить стоимость единицы рабочего времени робота. То есть само по себе введение технического обслуживания не гарантирует снижения стоимости единицы рабочего времени робота.

При введении технического обслуживания оптимальный вектор автоматизации может измениться. То есть может измениться оптимальное распределение работ между роботами и людьми по видам технологических операций.

## Литература

1. Чадеев В.М., Аристова Н.И. Самовоспроизведение механических роботов. – М.: Синтег, 2012. – 312 с.
2. Канторович Л.В. Математические методы организации и планирования производства. – Л.: Изд-во ЛГУ, 1939.
3. 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.
4. Lindström V., Winroth M. Aligning manufacturing strategy and levels of automation: A Case Study // Journal of engineering and technology management. – (27). – 2010. – 3–4. – P. 148–159.