

DOI:

## САМОВОСПРОИЗВЕДЕНИЕ ПРОМЫШЛЕННЫХ РОБОТОВ В УСЛОВИЯХ ПРОМЫШЛЕННЫХ КЛАСТЕРОВ

Чадеев В.М., Аристова Н.И.

*Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН,*

*Россия, г. Москва, ул. Профсоюзная д.65*

*chavama@ipu.ru, avtprom@ipu.ru*

*Аннотация: Рассматривается процедура самовоспроизведения различных типов промышленных роботов в условиях промышленных кластеров. Используется абстрактная модель производства, инвариантная к видам технологических операций (ТО). Рассмотрены алгоритмы для трех вариантов автоматизации: полное самовоспроизведение, частичное самовоспроизведение, использование роботов, приобретенных вне кластера*

Ключевые слова: самовоспроизведение промышленных роботов, степень автоматизации, технологическая операция, время выполнения операции, инвариантная к видам технологических операций теория производства, динамика изменения стоимости.

### Введение

В настоящее время в России проводятся активные исследования в области построения моделей кластеров в различных областях экономики, различных географических регионах, а также с учетом выявления структуры, компонентов и потенциала развития. Основной целью реализации кластерной политики является обеспечение высоких темпов экономического роста и диверсификации экономики за счет повышения конкурентоспособности предприятий, поставщиков оборудования, комплектующих, специализированных производственных и сервисных услуг научно-исследовательских и образовательных организаций, образующих территориально-производственные кластеры [1].

Экономический кластер – это сконцентрированные по географическому признаку группы взаимосвязанных компаний, специализированных поставщиков, поставщиков услуг, фирм в соответствующих отраслях, а также связанных с их деятельностью организаций (например, университетов, агентств по стандартизации, а также торговых объединений) в определенных областях, конкурирующих, но вместе с тем ведущих совместную работу» [2]. По М. Портеру конкурентоспособность региона или страны должна рассматриваться с точки зрения конкурентоспособности кластеров - объединений организаций и предприятий различных отраслей, способных эффективно использовать внутренние ресурсы. Кластер максимально учитывает рыночный механизм, является гибкой формой организации [3]. В этом его главное отличие от территориально-производственного комплекса и отраслевого подхода.

В качестве примера современного кластера, созданного в РФ, отметим кластер нефтехимических предприятий Республики Татарстан, включающий следующие компании [4]:

- поставщики сырья (нефти и газа) и перерабатывающие предприятия – ПАО «Татнефть», АО «ТАНЕКО», ОАО «ТАИФ-НК» и др.;
- предприятия производители нефтехимической продукции (неорганика, мономеры, полимеры, пластики, синтетические каучуки) – ПАО «Нижнекамскнефтехим», ПАО «Казаньоргсинтез», ОАО «Казанский завод синтетического каучука» и др.;
- производители конечной продукции (бытовая химия, фармацевтика, пластмассовые изделия, резиновые изделия) – ООО «Татнефть-Нефтехим», АО «Нэфис Косметикс», АО «КВАРТ», АО «Химический завод им. Л.Я. Карпова» и др.;
- подрядные организации, предприятия предоставляющие машины и оборудование для производства, предприятия вспомогательных производств, административных и информационных услуг из пояса малых и средних предприятий;
- министерства и ведомства, осуществляющие государственное регулирование промышленности – министерство промышленности и торговли РТ, министерство образования и науки РТ, министерство экономики РТ и др.;
- учреждения по подготовке квалифицированных кадров и НИОКР – академия наук РТ, ФГБОУ ВО «КНИТУ», ИОФХ им. А.Е. Арбузова, ТатНИПИнефть и др.;
- научно-промышленные комплексы – технополис Химград, инновационный технопарк «Идея», ОЭЗ ППТ «Алабуга» и др.

Каждый производственный кластер имеет свои особенности. При этом предприятия, участвующие в производственной кооперации в рамках кластера, имеют общую структуру производства, включающую одинаковые по выполняемым функциям блоки, отличающиеся только размерностью.

Для описания любой системы производства внутри кластера необходимо иметь:

- список всех изготавливаемых изделий (включая роботов);
- описание процедуры изготовления каждого вида изделия;
- описание процедуры изготовления каждого типа роботов;
- характеристики роботов как элементов производства;
- список и характеристики всех видов технологических операции (ТО), необходимые для изготовления всех видов изделий и роботов;
- общее число людей, задействованных в производственном процессе.

Цель работы, имея перечисленные данные рассчитать схему автоматизации производства внутри кластера, в которой затраты людей минимальны.

## 1 Абстрактная модель кластерной производственной системы

Абстрактная модель содержит следующие элементы: трудовые ресурсы, роботы, покупные изделия, воспроизводимые изделия.

Для проектирования производственной системы внутри кластера требуется определенный набор исходных данных. Эти данные в той или иной степени случайны, однако здесь будет рассмотрен только детерминированный случай. Это относится к значениям времени выполнения операций, ресурсам роботов, уровню брака и т. п. Учет всех этих случайностей сводится к вычислению вероятности брака.

Рассмотрим для кластерных систем три варианта автоматизации производства, требующих для своего расчета специальных алгоритмов.

- использование в производственном процессе роботов, приобретенных вне кластера,
- частичное самовоспроизведение роботов, когда в процессе производства роботов может принимать участие человек,
- полное самовоспроизведение роботов внутри кластера (безлюдное производство).

Для расчета кластерной системы необходимо иметь характеристики элементов абстрактной модели, в которую входят люди, изготавливаемые изделия и средства автоматизации.

## 2 Характеристики изделий и роботов кластерной системы

### 2.1 Характеристики изделий

Свойства изделий, которые необходимо производить в системе, определяются матрицами [5]:  $n = \|n_{ij}\|$ , размером  $m \times s$ ,  $N = \|N_k\|$ , размером  $1 \times s$ ,  $D = \|d_k\|$ , размером  $1 \times s$ , где  $n_{ij}$  – число технологических операций (ТО)  $i$ -го вида, необходимое для изготовления одного изделия  $k$ -го вида,  $S$  – число видов изделий,  $N_k$  – число изделий  $k$ -го вида, которое необходимо изготовить,  $d_k$  – стоимость покупных изделий, необходимых для изготовления одного изделия  $k$ -го вида.

### 2.2 Характеристики роботов

Свойства системы роботов определяются следующим набором матриц [4]:  $b = \|b_{ij}\|$  размером  $m \times f$ , где  $b_{ji}$  – время выполнения ТО  $i$ -го вида роботом  $j$ -го типа,  $f$  – общее число типов используемых на производстве роботов,  $m$  – число разновидностей ТО, необходимых для изготовления изделия,  $h = \|h_{ij}\|$  размером  $m \times f$ , где  $h_{ij}$  – число ТО  $i$ -го вида, необходимое для изготовления одного робота  $j$ -го типа.

Ресурсы роботов  $T$ , стоимости роботов  $C$  и стоимости единицы рабочего времени роботов  $\lambda$  задаются следующим набором матриц, где индекс  $j$  обозначает тип робота:  $T = \|T_j\|$ , размером  $1 \times f$ ,  $C = \|C_j\|$ ,  $\lambda = \|\lambda_j\|$ .

### 2.3 Характеристики человека

Производственные возможности людей содержатся в матрице [5]:  $G = \|g_i\|$ , размером  $1 \times m$ , где  $g_i$  – время выполнения человеком ТО  $i$ -го вида. Для сокращения формул иногда будет удобно рассматривать человека, как робота 0-го типа – элемент  $b_0 = \|b_{0i}\|$ , размером  $1 \times m$ , матрицы  $b = \|b_{ij}\|$ .

Второй характеристикой человека как элемента производственной системы является его ресурс. Ресурсом человека  $T_0(t)$  будем считать общий объем его рабочего времени за время работы на станции  $t$  (например, за год).

### 3 Матрица автоматизации

В кластерной системе на предприятиях работают и люди, и целая система роботов. Задача планирования автоматизации производства состоит в таком распределении работ между людьми и роботами, чтобы минимизировать затраты людей. Для этого как инструмент управления используется матрица автоматизации:  $A = \|\alpha_{ji}\|$  размером  $m \times f$ , где  $\alpha_{ij}$  – уровень автоматизации ТО  $i$ -го вида, выполняемых роботом  $j$ -го типа. Уровень автоматизации должен удовлетворять условиям  $0 \leq \alpha_{ji} \leq 1$ ;  $i = 1, 2, \dots, m$ ;  $j = 0, 1, \dots, m$ . Если все ТО  $i$ -го вида выполняются автоматом, то уровень автоматизации  $\alpha_i = 1$ , если человеком -  $\alpha_i = 0$ .

Если в ходе изготовления изделия необходимо выполнить ТО определенного вида, то это обязательно должен сделать или человек, или один из типов роботов. Если это условие не будет выполнено, то сборка изделия не будет завершена, и, как следствие, изделие не будет изготовлено, а пойдет в брак.

Стоимость изготовления изделия  $C(A)$  является функцией матрицы автоматизации. Оптимальная матрица автоматизации  $A$ , то есть при которой стоимость изготовления минимальна, содержит только 0 и 1.

### 4 Вычисление стоимости роботов

Стоимость автоматизированного изготовления роботов системой роботов с использованием матрицы автоматизации  $A$  вычисляется по формуле [6]:

$$(1) C_k(\alpha) = \sum_{i=1}^m \alpha_{0i} b_{0i} \lambda_0 h_{ki} + \sum_{i=1}^m \alpha_{1i} b_{1i} \lambda_1 h_{ki} + \dots + \sum_{i=1}^m \alpha_{fi} b_{fi} \lambda_f h_{ki}'$$

где  $m$  – число видов ТО, необходимых для изготовления изделия,  $b_{ij}$  – время выполнения ТО  $i$ -го вида автоматом  $j$ -го типа,  $\lambda_j$  – стоимость единицы рабочего времени автомата  $j$ -го типа,  $g_i = b_{0i}$  – время выполнения ТО  $i$ -го вида человеком,  $f$  – общее число типов роботов, доступных для автоматизации,  $h_{ij}$  – число одинаковых ТО  $i$ -го вида, необходимых для изготовления изделия  $C_k(\alpha)$ . Первая сумма – это затраты человека, вторая – затраты робота первого типа, последняя – затраты робота  $f$ -го типа.

Стоимость *ручного* изготовления изделия – отправная точка всех расчетов по оценке эффективности автоматизации. Для этого случая формула для стоимости примет более простой вид:

$$(2) C_k(0) = \sum_{i=1}^m g_i h_{ki}'$$

### 5 Данные, необходимые для расчета кластерных производственных систем

Исходные данные, необходимые для расчетов, должны содержать информацию о роботах, которые будут использоваться в кластере, о технологии их изготовления и о доступных средствах автоматизации их производства. Эти данные содержатся в следующих списках.

Список 1 длиной  $S$  строк всех типов роботов, необходимых для работоспособности кластера.

Список 2 длиной  $m$  строк всех видов ТО, необходимых для изготовления каждого из  $S$  видов роботов из списка 1.

Список 3 длиной  $f$  строк доступных типов роботов, которые могут выполнять все или некоторые ТО из списка 2.

Также необходима таблица производственных характеристик роботов из списка 3 (стоимость, ресурс, время выполнения ТО из списка 2). Характеристики рабочих, которые будут изготавливать изделия из списка 1 (рабочее время, время выполнения ТО из списка 2).

### 6 Динамические уравнения стоимости самовоспроизводящегося робота

Стоимость изготовления робота при автоматизированном производстве складывается из трех компонентов:

$$(3) C = \lambda B(\alpha) + D + G(\alpha),$$

где  $G(\alpha)$  – это прямые затраты человека на сборку робота,  $D$  – стоимость покупных деталей,  $B(\alpha)$  – затраты времени робота,  $\alpha$  – степень автоматизации производства есть вектор, компоненты которого – степень автоматизации каждого конкретного вида технологических операций,  $\lambda$  – стоимость единицы рабочего времени робота, участвующего в изготовлении робота. Стоимость единицы рабочего времени робота определим как отношение его стоимости  $C$  к времени жизни (ресурсу) робота  $T$ :

$$(4) \lambda = C / T .$$

Учитывая (4), перепишем (3) в виде:

$$(5) C = CB(\alpha) / T + D + G(\alpha) .$$

Уравнение (5) описывает процесс изготовления робота человеком и роботом *предыдущего* поколения. Параметры изготавливающего и изготавливаемого роботов могут оказаться различными. Чтобы учесть это, перепишем (5) в виде:

$$(6) C(N) = C(N-1)B(\alpha) / T + D + G(\alpha) ,$$

где  $C(N)$  – стоимость робота  $N$ -го поколения,  $C(N-1)$  – стоимость робота  $(N-1)$ -го поколения.

Решение разностного уравнения (6) имеет вид (в предположении, что вектор автоматизации  $\alpha$  – постоянен):

$$(7) C(N) = \frac{G + D}{T} \cdot \frac{1 - (B/T)^N}{1 - B/T} + C(0)(B/T)^N ,$$

Автоматизация производства роботов с помощью роботов физически возможна только, если затраты изготавливающего робота  $B(\alpha)$  меньше его ресурса  $T$ . В этом случае входящие в уравнение отношения  $B(\alpha)/T < 1$ , и асимптотическое решение будет равно:

$$(8) C(\infty) = \frac{G + D}{T - B} .$$

При условии, что  $B(\alpha)/T < 1$ , это решение не зависит от начальных условий, а только от вектора автоматизации  $\alpha$ .

Затраты человека  $G(\alpha)$  и робота  $B(\alpha)$  в (3) описываются формулами:

$$(9) G(\alpha) = \sum_{i=1}^m (1 - \alpha_i) g_i h_i, \quad B(\alpha) = \sum_{i=1}^m \alpha_i b_i h_i .$$

где  $m$  – число видов ТО, необходимых для изготовления робота. Этот индекс в суммах будем опускать, предполагая, однако, что суммирование проводится по всем видам операций как автоматизированных, так и ручных,  $g_i$  – время выполнения технологической операции  $i$ -го вида человеком,  $b_i$  – время выполнения технологической операции  $i$ -го вида роботом,  $h_i$  – число одинаковых операций  $i$ -го вида, необходимых для изготовления робота,  $\alpha_i$  – степень автоматизации технологической операции  $i$ -го вида, а вектор  $\alpha$ , определяет схему автоматизации производства.

## 7 Кооперация заводов

### 7.1 Схема кооперации заводов

Завод №1 изготавливает роботов  $N$ -го поколения  $R(N)$ , используя для автоматизации их производства конструктивно таких же роботов предыдущего поколения  $R(N-1)$ . Завод №2 изготавливает гидроприводы  $M(0)$  и продаёт их всем желающим, в том числе и заводу №1, который использует их для изготовления роботов. Схема кооперации показана на рис. 1.

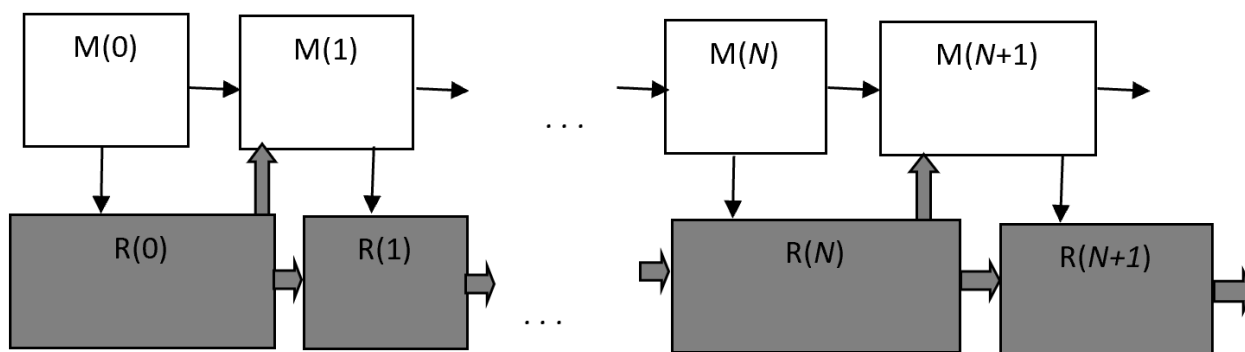


Рис. 1. Схема кооперации заводов. На схеме  $M(N)$  – гидропривод  $N$ -го поколения;  $R(N)$  – робот  $N$ -го поколения. На рисунке верхняя линия изготавливает поколения гидроприводов, нижняя – роботов.

Рассмотрим кооперацию заводов, когда завод роботов продает свою продукцию заводу гидроприводов для автоматизации производства, а завод гидроприводов снижает цену на свою продукцию, покупаемую заводом роботов.

## 7.2 Основные уравнения

Стоимость автоматизированного изготовления робота вычисляется по формулам (6) и (9). Вся система кооперации заводов без автоматизации производства гидроприводов опишется системой уравнений:

$$(10) \quad C(N) = C(N-1)B(\alpha) / T + G(\alpha) + D_R + D_F,$$

$$(11) \quad F(N) = G_F(\alpha=0) + B_F(\alpha=0) + D_F \equiv F(0),$$

$$(12) \quad G(\alpha) = \sum (1 - \alpha_i) g_i h_i, \quad B(\alpha) = \sum \alpha_i b_i h_i,$$

$$(13) \quad G_F(\alpha=0) = \sum g_i n_i \quad B_F(\alpha=0) = 0.$$

где  $C(N)$  – стоимость робота  $N$ -го поколения,  $g_i$  – время выполнения технологической операции  $i$ -го вида человеком,  $h_i$  – число операций  $i$ -го вида, необходимых для изготовления робота,  $n_i$  – число операций  $i$ -го вида, необходимых для изготовления гидропривода,  $b_i$  – время выполнения технологической операции  $i$ -го вида роботом,  $D_R$  – стоимость покупных деталей, необходимых для изготовления робота,  $D_F$  – стоимость покупных деталей, необходимых для изготовления гидропривода,  $F(0)$  – стоимость покупных гидроприводов, ручной сборки.

## 8 Исходные данные для моделирования

Рассмотрим процесс изменения стоимости роботов по поколениям. Пусть для изготовления робота нужны покупные детали и выполнение 4 видов технологических операций (ТО). Исходные данные приведены в табл. 1. Время жизни робота  $T = 1000$ .

Таблица 1. Исходные данные

Вид ТО	g	b	n	h	$D_F$	$D_R$
ТО-1	4	5	4	12	10	80
ТО-2	3	12	4	20	10	80
ТО-3	3	240	4	10	10	80
ТО-4	23	4	6	8	10	80

В табл. 1 обозначено: ТО – технологическая операция,  $g$  – время выполнения ТО человеком,  $b$  – время выполнения ТО роботом,  $n$  – число одинаковых ТО, необходимых для сборки гидроприводов,  $D_f$  – стоимость покупных деталей для гидроприводов,  $D_R$  – стоимость покупных деталей для роботов.

### 8.2 Стоимость ручной сборки гидропривода и робота

Сначала вычислим стоимость ручной сборки гидропривода. Используя (11) и (13), получим

$$(14) \quad F(0) = \sum_{i=1}^4 g_i n_i + D_F .$$

Используя данные табл. 1, получим окончательно:

$$(15) \quad F(0) = 218 .$$

Для вычисления стоимость ручной сборки робота, используя (10) и (12), получим формулу

$$(16) \quad C(0) = \sum_{i=1}^4 g_i h_i + D_R + F(0) .$$

Используя данные табл. 1 и (16), получим окончательно:

$$(17) \quad C(0) = 860 ,$$

стоимость рабочего времени робота будет соответственно равна

$$(18) \quad \lambda(0) = 0,86 .$$

## 9 Динамика изменения стоимости робота от поколения к поколению

### 9.1 Определение оптимального вектора автоматизации

Изменение стоимости робота от поколения к поколению при фиксированной стоимости покупных гидроприводов происходит по уравнению

$$(19) \quad C(N) = \lambda(N-1)B(\alpha) + G(\alpha) + D_R + F(0) .$$

Для решения этого уравнения необходимо сначала определить оптимальный вектор автоматизации  $\alpha(\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4)$ , который позволил бы получить минимальную стоимость робота. Для этого, используя табл. 1, составим таблицу для определения оптимального вектора автоматизации производства 1-го поколения роботов, с помощью роботов 0-го поколения. Напомним,  $\lambda(0) = 0,86$ .

Таблица 2. Вектор автоматизации изготовления робота 1-го поколения

	Время выполнения ТО		Стоимость выполнения ТО роботом	Оптимальная стоимость операции	Оптимальный вектор автоматизации
	человеком	роботом			
Вид ТО	g	b	$\lambda(0)b$	Z(1)	$\alpha(1)$
ТО-1	4	5	4,3	4	0
ТО-2	3	12	10,32	3	0
ТП-3	3	240	206,4	3	0
ТП-4	23	4	3,44	3,44	1

### 9.2 Вычисление стоимости роботов всех поколений

Вычисление стоимости роботов любого, например N-го, поколения происходит по (19), но каждый раз необходимо предварительно определять  $\lambda(N-1)$  и Z(N), как в табл. 2. После этого составляется таблица для вычисления стоимости робота.

Таблица 3. Стоимость робота 1-го поколения

Вид ТО	Z(1)	$\alpha(1)$	h	F(0)	$D_R$	$C(1) = Z(1) * h + F(0) + D_R$
ТО-1	4	0	12	26	80	154
ТО-2	3	0	20	22	80	162
ТО-3	3	0	10	22	80	132
ТО-4	3,44	1	8	148	80	255,52
					$C(1) =$	703,52
					$\lambda(1) =$	0,70352

Проводя такие расчеты для следующих поколений, получим картину изменения стоимости роботов при фиксированной стоимости покупных гидроприводов. Результаты приведены в табл. 4

Таблица 4. Стоимости роботов при фиксированной стоимости покупных гидроприводов

Номер поколения $N$	0	1	2	3	4
Стоимость робота $C(N)$	860	704	693	692	692
Стоимость рабочего времени робота $\lambda(N)$	0,860	0,704	0,693	0,692	0,692

### 9.3 Стоимость автоматизированного изготовления гидропривода

Рассмотрим автоматизированное производство гидроприводов с помощью роботов 0-го поколения. Используя (11) и (13), получим:

$$(20) \quad F(1) = \sum (1 - \alpha_i) g_i n_i + \lambda(0) \sum \alpha_i b_i n_i + D_F$$

Поскольку виды ТО, используемые для автоматизации производства и роботов и гидроприводов, совпадают, то совпадают и схемы автоматизации. Поэтому, используя табл. 3, как основу, рассчитаем стоимость гидропривода 1-го поколения

Таблица 5. Стоимость гидропривода 1-го поколения

Вид ТО	Z(1)	$\alpha(1)$	n	$D_F$	$F(1)=Z*n+D_F$
ТО-1	4	0	4	10	26
ТО-2	3	0	4	10	22
ТО-3	3	0	4	10	22
ТО-4	3,44	1	6	10	30,64
				$F(1)=$	100,64

## 10 Стратегия обмена между заводами

Завод №2 решил удешевить производство гидроприводов, автоматизировав их производство с помощью роботов завода №1. В общем случае автоматизация производства гидроприводов может оказаться как выгодной, так и не выгодной. Все зависит от возможностей роботов и их стоимости. Подробности оптимизации отложим на потом, а сначала рассмотрим случай, когда автоматизация привела к снижению стоимости гидроприводов, то есть что  $F(0) > F(1)$ .

Завод №2, снизив стоимость гидроприводов, увеличит свои конкурентные преимущества. Завод №1 в следующем поколении, используя более дешевые гидроприводы, тоже увеличит свои конкурентные преимущества. Действительно, стоимость робота с дешевыми гидроприводами снизится на величину снижения стоимости гидроприводов и будет равна не  $C(0)$ , а  $C(1) < C(0)$ . Соответственно, стоимость единицы рабочего времени робота следующего поколения  $\lambda(1)$  будет равна  $C(1)/T$ , то есть меньше чем  $\lambda(0)$ . Схема взаимодействия заводов показана на рис. 1.

Обратим внимание на то, что конструкция изделий при автоматизации производства не меняется! Завод №2 выпускает все время одну и ту же конструкцию гидроприводов, завод №1 выпускает все время одну и ту же модель роботов. Показанные на рис. 1 гидроприводы разных поколений  $M(0)$ ,  $M(1)$ ,  $M(2)$  ... конструктивно ничем друг от друга не отличаются – они близнецы. Точно так же модели роботов разных поколений  $R(0)$ ,  $R(1)$ ,  $R(2)$ , передаваемые на завод гидроприводов, конструктивно ничем друг от друга не отличаются – они тоже близнецы

Что же меняется?

Происходит чудо. Симбиоз двух заводов приводит к последовательному снижению стоимости как гидроприводов, так и роботов. Конструкция не меняется, а стоимость снижается!

Здесь следует сделать несколько оговорок. Речь идет о смене поколений. Это значит, что если на заводе №2 изготовили робот нового поколения, например,  $N$ -го, а на заводе №1 еще работает робот  $(N-1)$ -го поколения и его ресурс еще не кончился, то менять его не имеет смысла. Это близнецы. А вот когда робот  $(N-1)$ -го поколения умрет, то менять его нужно на более дешевого робота  $N$ -го поколения. Таким образом, скорость эволюции системы автоматизации производства зависит от времени жизни робота: чем жизнь робота короче, тем более быстрой может быть эволюция.

Что вообще происходит?

Происходит последовательное вытеснение человека дешевыми роботами из сферы производства. Это и есть смысл автоматизации.

## 11 Динамика изменения стоимости

### 11.1 Исходные данные

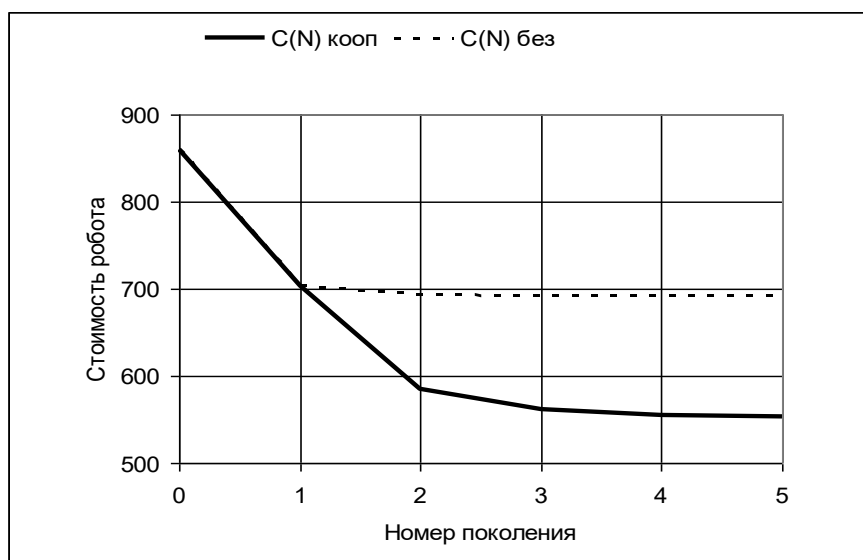
Приведем численную иллюстрацию схемы автоматизации, показанной на рис. 1. Исследуем динамику изменения стоимости гидроприводов и стоимости единицы рабочего времени робота по мере автоматизации производства и смены поколений роботов. В табл. 1 приведены исходные данные для расчетов. Были вычислены стоимости гидроприводов и роботов 0-го поколения:  $C(0)=860$ ;  $F(0)=218$ ;  $\lambda(0)=0,860$ .

### 11.2 Итерационная схема вычисления стоимости роботов

Разностные уравнения (19) и (20) позволяют вычислить будущие значения стоимости роботов по параметрам предыдущего поколения (табл. 6).

Таблица 6. Вычисление стоимости робота (N+1)-го поколения

ТО	Определение $Z(N+1)$ и $\alpha(N+1)$					Вычисление стоимости робота $C(N+1)$			
	g	b	$\lambda(N)$ b	$Z(N+1)$	$\alpha(1)$	h	$F(N)$	$D_R$	$C(N+1)$
ТО-1	4	5	4,3	4	0	12	26	80	154
ТО-2	3	12	10,32	3	0	20	22	80	162
ТО-3	3	240	206,4	3	0	10	22	80	132
ТО-4	23	4	3,44	3,44	1	8	148	80	255,52
								$C(N+1)=$	703,52
T=	1000							$\lambda(N+1)=$	0,70352



Результаты моделирования приведены на рис. 2.

Рис.2. Динамика изменения стоимости. Пунктирная линия – изменение стоимости самовоспроизводящегося промышленного робота без кооперации с поставщиком комплектующих, толстая линия – при кооперации с поставщиком.

Как видно из рис. 2 существенно снижает стоимость самовоспроизводящихся роботов.

## Литература

1. Осканян А.А. Кластер как организационная форма обеспечения инновационной конкурентоспособности региона // Особенности государственного регулирования внешнеторговой деятельности в современных условиях: Тр. науч.-практ. конф. Ростов-на-Дону. Ч.1 Ростов н/Д: Российская таможенная академия. Ростовский филиал. 2014. С.157-167
2. Портер М. Э. Конкуренция. Пер. с англ.: уч. пос. М.: Вильямс, 2005. 608 с.
3. Лизунов В.В. Производственные кластеры как ключевой элемент региональной социально-экономической системы // Спецификация региональной промышленной политики с



- использованием элементов кластерного подхода (на материалах Омской области). Под ред. В.В. Карпова, В.В. Алещенко. Новосибирск: ИЭОПП СО РАН. 2016. (480 с.). С.164-202.
4. *Лубнина Л.А., Галимулина Ф.Ф., Бронская В.В., Аминова Г.А.* О создании кластеров нефтехимических предприятий на примере Республики Татарстан // Автоматизация в промышленности. 2020. №1.
  5. *Чадаев В.М., Аристова Н.И.* Automation of Autonomous Largescale Production Systems / Proceedings of the 12 International Conference "Management of large-scale system development" (MLSD2019). М.: IEEE, 2019. С. 1-4.
  6. *Чадаев В. М., Аристова Н. И.* Самовоспроизведение механических роботов. М.: СИНТЕГ. 2012. - 312 с.