

Методология моделирования процессов технологической подготовки гибких производств

Н.И. Аристова – к.т.н., ст. научный сотрудник лаб. 41

Задача - повышение эффективности промышленных производств ²



Приоритетная задача дискретного цифрового производства



ЭТАПЫ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПОДГОТОВКИ ПРОИЗВОДСТВА

Автоматизация

- Метрологическая экспертиза
- Выверка и отладка разработанных техпроцессов
- Выбор и технологическое конструирование оснастки
- Нормирование техпроцесса
- Выбор оборудования
- Разработка техпроцессов изготовления и контроля деталей, сборки и испытаний
- Разработка межцеховых технологических маршрутов

Трудно формализуемый

Отработка конструкции изделия на технологичность

Количественные показатели

- трудоемкость изготовления изделия;
- удельная материалоемкость;
- удельная энергоемкость;
- технологическая себестоимость;
- ...

Качественные показатели

- простота геометрии деталей;
- способы соединения элементов;
- возможность разборки и повторной сборки;
- унификация деталей;
- применение одного типоразмера комплектующих;
- ...

Не учитываются конкретные производственные условия, в том числе характеристики автоматов

Цифровизация = гибкость, клиентоориентированность

Сокращение времени выполнения технологической подготовки производства

Анализ эффективности и целесообразности изготовления изделия в условиях конкретного производства

Важная характеристика автоматов - показатель качественного выполнения технологических операций (ТО)

Научная проблема

Создание единого формализованного подхода для управления процессом технологической подготовки гибких производств



Решение

Методология цифрового моделирования для управления процессом технологической подготовки гибких производств

1. Методы формализованного представления иерархического дискретного производства, учитывающие показатели качественного выполнения ТО автоматами.

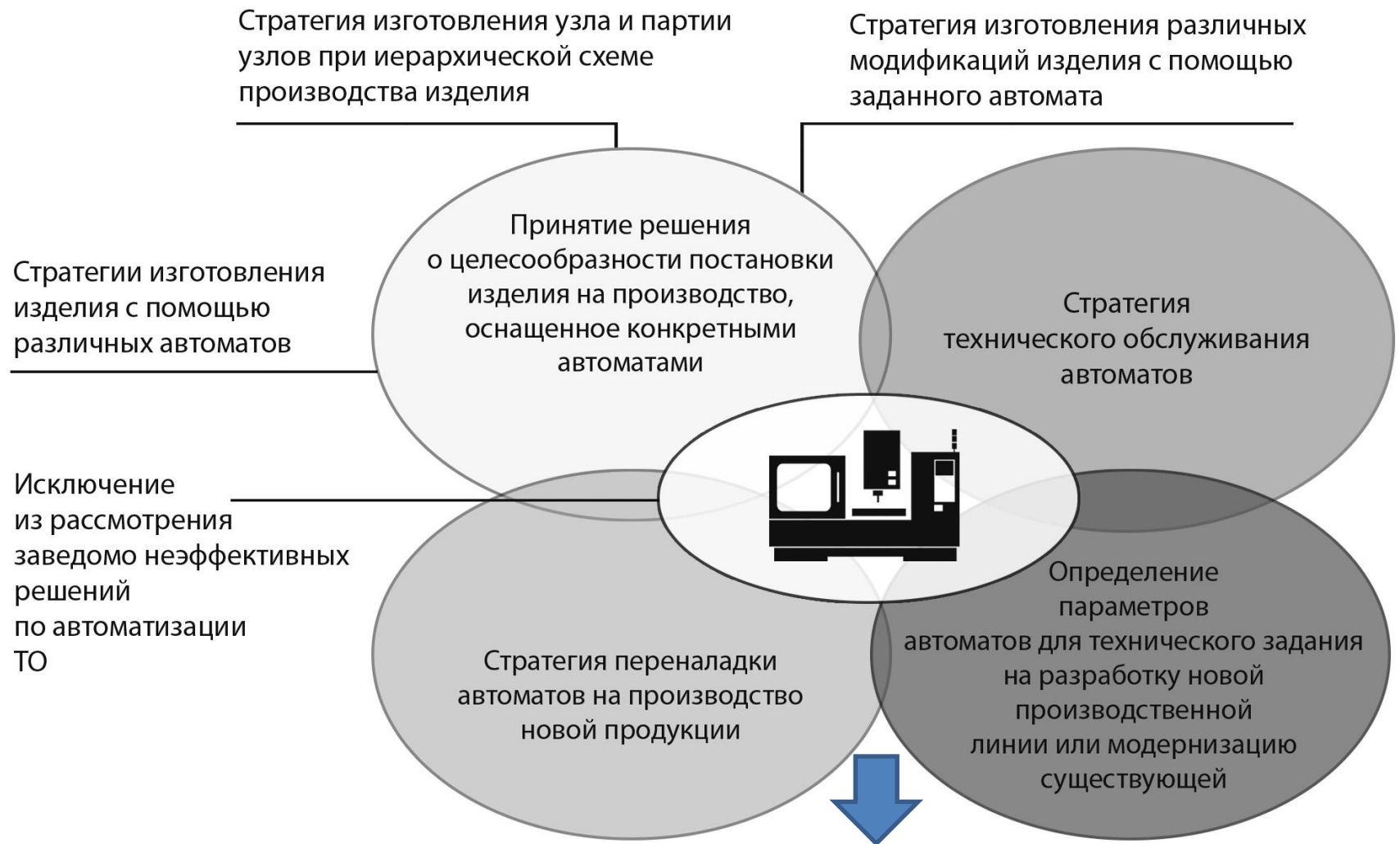
2. Обобщенная цифровая модель иерархического дискретного производства, описывающая различные производственные условия изготовления узлов/изделий.

3. Методы и алгоритмы для анализ эффективности автоматизации ТО изготовления изделия и техобслуживания автоматов с учетом показателей качественной работы автоматов для различных производственных условий.

Основные показатели эффективности:

- Минимальное среднее время изготовления
- Минимальная средняя стоимость изготовления изделия

Применение методологии цифрового моделирования для управления процессом технологической подготовки гибких производств



Сокращение времени выполнения технологической подготовки гибкого производства

Повышение эффективности и конкурентоспособности гибкого производства

Методология цифрового моделирования для управления процессом технологической подготовки гибких производств

Методы формализованного представления иерархического дискретного производства

Обобщенная цифровая модель иерархического дискретного производства

Методы и алгоритмы для анализ эффективности автоматизации ТО изготовления изделия и техобслуживания автоматов

1. Методы и алгоритмы, позволяющие синтезировать цифровые модели процесса автоматизации ТО

3. Методы и алгоритмы, позволяющие анализировать эффективность автоматизации ТО при изготовлении изделий на уровне узлов

3. Методы и алгоритмы, позволяющие анализировать эффективность автоматизации ТО при:

- изготовлении автоматов;
- техобслуживании автоматов;
- изготовлении изделий с учетом обслуживания автоматов

Методы формализованного описания дискретного иерархического производства, учитывающего показатели качественного выполнения ТО автоматами

Формализованное описание дискретного производства

Описание автоматов:

C – стоимость автомата;
 T – ресурс автомата;
 $\lambda = C/T$ – стоимость единицы рабочего времени автомата

Описание параметров выполнения ТО автоматами:

b - время выполнения ТО;
 p - вероятность качественного выполнения ТО

Описание изделия:

m – число требуемых видов ТО;
 n - число повторного выполнения каждого из m видов ТО

Цифровая модель процесса автоматизации ТО:

$$A = \begin{pmatrix} \alpha_{10} & \alpha_{11} & \alpha_{12} & \dots & \alpha_{1j} & \dots & \alpha_{1f} \\ \alpha_{20} & \alpha_{21} & \alpha_{22} & \dots & \alpha_{2j} & \dots & \alpha_{2f} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \alpha_{i0} & \alpha_{i1} & \alpha_{i2} & \dots & \alpha_{ij} & \dots & \alpha_{if} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \alpha_{m0} & \alpha_{m1} & \alpha_{m2} & \dots & \alpha_{mj} & \dots & \alpha_{mf} \end{pmatrix}$$

α_{ij} – параметр автоматизации

определяет, какую часть одинаковых операций i -го вида выполняет автомат j -го

типа;

$$0 \leq \alpha_{ij} \leq 1$$

Критерии эффективности:

- минимальное время изготовления изделия;
- минимальное среднее время изготовления;
- минимальная стоимость изготовления;
- минимальная средняя стоимость изготовления изделия

Допущения, принятые при формализованном описании дискретного производства

Время выполнения ТО определенного вида человеком и автоматом будем считать постоянной (не случайной) величиной.

Порядок выполнения ТО не учитывается

Методология цифрового моделирования для управления процессом технологической подготовки гибких производств

Методы формализованного представления иерархического дискретного производства

Обобщенная цифровая модель иерархического дискретного производства

Методы и алгоритмы для анализ эффективности автоматизации ТО изготовления изделия и техобслуживания автоматов

Методы и алгоритмы, позволяющие синтезировать цифровые модели процесса автоматизации ТО

Методы и алгоритмы, позволяющие анализировать эффективность автоматизации ТО при изготовлении изделий на уровне узлов

Методы и алгоритмы, позволяющие анализировать эффективность автоматизации ТО при:

- изготовлении автоматов;
- техобслуживании автоматов;
- изготовлении изделий с учетом обслуживания автоматов

Цифровые модели анализа эффективности автоматизации ТО при различных производственных условиях

Изготовление изделия человеком и системой автоматов

Время изготовления: $C_b(A) = \sum_{i=1}^m \alpha_{i0} b_{i0} n_{ij} + \sum_{i=1}^m \alpha_{i1} b_{i1} n_{ij} + \dots + \sum_{i=1}^m \alpha_{if} b_{if} n_{ij} = \sum_{j=0}^f \sum_{i=1}^m \alpha_{ij} b_{ij} n_{ij}$. Вероятность:

Стоимость: $C_x(A) = \sum_{i=1}^m \alpha_{i0} b_{i0} \lambda_0 n_{ij} + \sum_{i=1}^m \alpha_{i1} b_{i1} \lambda_1 n_{ij} + \dots + \sum_{i=1}^m \alpha_{if} b_{if} \lambda_f n_{ij} = \sum_{j=0}^f \sum_{i=1}^m \alpha_{ij} b_{ij} \lambda_j n_{ij}$. $P(A) = \prod_{j=0}^f \prod_{i=1}^m p_{ij}^{\alpha_{ij} n_{ij}}$

Изготовление изделия человеком и одним типом автомата

Время изготовления: $C_b(A) = G(A) + B(A) = \sum_{i=1}^m (1 - \alpha_i) g_i n_i + \sum_{i=1}^m \alpha_i b_i n_i$, Вероятность:

Стоимость: $C_x(A) = G(A) + \lambda B(A) = \sum_{i=1}^m (1 - \alpha_i) g_i n_i + \lambda \sum_{i=1}^m \alpha_i b_i n_i$ $P(A) = \prod_{i=1}^m q_i^{(1 - \alpha_i) n_i} p_i^{\alpha_i n_i}$

Ручное изготовление изделия

Время/стоимость $C_b = C_x = \sum_{i=1}^m g_i n_i$,

Вероятность $P = \prod_{i=1}^m q_i^{n_i}$,

Средние затраты на изготовление изделия:

по времени - $\Phi_b(A) = \frac{C_b(A)}{P(A)}$, по стоимости - $\Phi_x(A) = \frac{C_x(A)}{P(A)}$

Обозначения: f – число типов автоматов, m – общее число видов ТО, λ_j – стоимость единицы рабочего времени автомата j -го типа, n_{ij} – число ТО i -го вида, выполняемые автоматом j -го типа, b_{ij} и g_i – время выполнения ТО i -го вида автоматом j -го типа и человеком, p_i и q_i – вероятность качественного выполнения ТО i -го вида автоматом j -го типа и человеком, α_{ij} – параметр автоматизации

Обобщенная цифровая модель иерархического дискретного производства

Обобщенная цифровая модель оценки средней стоимости изготовления качественного автомата k -го типа: $\Phi_k(A) = C_k(A) / P_k(A)$

Аддитивная модель оценки стоимости изготовления автомата k -го типа из системы автоматов f типов системой таких же автоматов: $C_k(A) = \sum_{j=0}^f \sum_{i=1}^m \alpha_{kij} b_{ij} \lambda_j h_{ki}$,

Мультипликативная модель оценки вероятности качественного изготовления автомата k -го типа: $P_k(A) = \prod_{j=0}^f \prod_{i=1}^m p_{ij}^{\alpha_{kij} h_{ki}}$

Матрица, содержащая оценки стоимости изготовления k -го автомата:

ТО	Человек	Автомат 1	...	Автомат f
1	$\alpha_{10} b_{10} \lambda_0 h_1 +$	$\alpha_{11} b_{11} \lambda_1 h_1 +$	...	$+ \alpha_{1f} b_{1f} \lambda_f h_1 +$
...
m	$+ \alpha_{m0} b_{m0} \lambda_0 h_m +$	$\alpha_{m1} b_{m1} \lambda_1 h_m +$	...	$+ \alpha_{mf} b_{mf} \lambda_f h_m$

Матрица, содержащая оценки вероятности изготовления качественного автомата k -го типа

ТО	Человек	Автомат 1	...	Автомат f
1	$p_{10} \wedge \alpha_{10} h_1 \cdot$	$\cdot p_{11} \wedge \alpha_{11} h_1 \cdot$	...	$\cdot p_{1f} \wedge \alpha_{1f} h_1 \cdot$
...
m	$\cdot p_{m0} \wedge \alpha_{m0} h_m \cdot$	$\cdot p_{m1} \wedge \alpha_{m1} h_m \cdot$	...	$\cdot p_{mf} \wedge \alpha_{mf} h_m \cdot$

Матрица, содержащая оценки средней стоимости изготовления автомата k -го типа

ТО	Человек	Автомат 1	...	Автомат j	...	Автомат f
1	$\frac{\alpha_{10} b_{10} \lambda_0 h_1 +}{p_{10} \wedge \alpha_{10} h_1}$	$\frac{\alpha_{11} b_{11} \lambda_1 h_1 +}{p_{11} \wedge \alpha_{11} h_1}$	...	$\frac{\alpha_{1j} b_{1j} \lambda_j h_1 +}{p_{1j} \wedge \alpha_{1j} h_1}$	...	$\frac{\alpha_{1f} b_{1f} \lambda_f h_1 +}{p_{1f} \wedge \alpha_{1f} h_1}$
...
m	$\frac{\alpha_{m0} b_{m0} \lambda_0 h_m +}{p_{m0} \wedge \alpha_{m0} h_m}$	$\frac{\alpha_{m1} b_{m1} \lambda_1 h_m +}{p_{m1} \wedge \alpha_{m1} h_m}$	...	$\frac{\alpha_{mj} b_{mj} \lambda_j h_m}{p_{mj} \wedge \alpha_{mj} h_m}$	...	$\frac{\alpha_{mf} b_{mf} \lambda_f h_m}{p_{mf} \wedge \alpha_{mf} h_m}$

Обозначения: α_{kij} – параметр автоматизации ТО i -го вида автоматом j -го типа при изготовлении автомата k -го типа; b_{ij} – время выполнения ТО i -го вида автоматом j -го типа; λ_j – стоимость ед. рабочего времени автомата j -го типа; h_{ki} – число одинаковых ТО i -го вида, необходимых для изготовления одного экземпляра автомата k -го типа; f – число разных типов автоматов в системе; m – число видов ТО, необходимых для изготовления системы автоматов; p_{ij} – вероятность качественного изготовления ТО i -го вида автоматом j -го типа

Методология цифрового моделирования для управления процессом технологической подготовки гибких производств

Методы формализованного представления иерархического дискретного производства

Обобщенная цифровая модель иерархического дискретного производства

Методы и алгоритмы для анализ эффективности автоматизации ТО изготовления изделия и техобслуживания автоматов

Методы и алгоритмы, позволяющие синтезировать цифровые модели процесса автоматизации ТО

Методы и алгоритмы, позволяющие анализировать эффективность автоматизации ТО при изготовлении изделий на уровне узлов

Методы и алгоритмы, позволяющие анализировать эффективность автоматизации ТО при:

- изготовлении автоматов;
- техобслуживании автоматов;
- изготовлении изделий с учетом обслуживания автоматов

Алгоритмы синтеза цифровых моделей процесса автоматизации ТО, актуализированных по заданным производственным показателям

Алгоритм синтеза цифровой модели процесса автоматизации ТО, актуализированной по критерию минимума времени изготовления изделия

Построение матрицы, содержащей значения времени изготовления узла системой автоматов

$$C_b(A) = \sum_{j=0}^f \sum_{i=1}^m \alpha_{ij} b_{ij} n_i$$

$i=1, \dots, m$



ТО	Человек (R0)	R1	...	RJ	...	Rf
1	$\alpha_{10} b_{10} n_1 +$	$\alpha_{11} b_{11} n_1 +$	...	$+ \alpha_{1j} b_{1j} n_1 +$	...	$+ \alpha_{1f} b_{1f} n_1 +$
...
m	$+ \alpha_{m0} b_{m0} n_m +$	$\alpha_{m1} b_{m1} n_m +$	...	$+ \alpha_{mj} b_{mj} n_m +$	...	$+ \alpha_{mf} b_{mf} n_m$

где b_{ij} - время выполнения ТО i -го вида автоматом j -го типа, n_i - число одинаковых ТО i -го вида.



Поиск в каждой строке матрицы минимальных значений времени выполнения ТО i -го вида: $z_i = \min \langle b_{ij} \rangle$, которые формируют вектор минимальных значений времени выполнения ТО: $Z_b = (z_1, z_2, \dots, z_j, \dots, z_f)^T$

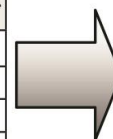


Построение вектора, содержащего типы автоматов, выполняющих соответствующие ТО за минимальное время: $R_{min} = (R_{z1}, \dots, R_{zi}, \dots, R_{zm})^T$



Синтез на основе R_{min} $A = \|\alpha_{ij}\|$:
 α_{ij} - параметр автоматизации ТО i -го вида автоматом j -го типа

ТО	R0	R1	...	RJ	...	Rf
1	0	0	...	Rj	...	0
m	R0	0	...	0	...	0
...
m	R0	0	...	0	...	0



ТО	R0	R1	...	RJ	...	Rf
1	0	0	...	1	...	0
m	1	0	...	0	...	0
...
m	1	0	...	0	...	0

Методология цифрового моделирования для управления процессом технологической подготовки гибких производств

Методы формализованного представления иерархического дискретного производства

Обобщенная цифровая модель иерархического дискретного производства

Методы и алгоритмы для анализ эффективности автоматизации ТО изготовления изделия и техобслуживания автоматов

Методы и алгоритмы, позволяющие синтезировать цифровые модели процесса автоматизации ТО

Методы и алгоритмы, позволяющие анализировать эффективность автоматизации ТО при изготовлении изделий на уровне узлов

Методы и алгоритмы, позволяющие анализировать эффективность автоматизации ТО при:

- изготовлении автоматов;
- техобслуживании автоматов;
- изготовлении изделий с учетом обслуживания автоматов

Методы и алгоритмы анализа эффективности автоматизации ТО для различных стратегий изготовления качественных узлов при иерархической схеме производства изделия по заданным производственным показателям



автоматизированного производства партии N качественных узлов

Алгоритм поиска параметров автоматизированного производства партии N качественных узлов

Синтез цифровой модели процесса автоматизации ТО $A = \|\alpha_{ij}\|$ по критериям минимального времени / стоимости / средней стоимости изготовления

ТО	R0	R1	...	Rj	...	Rf
1	0	0	...	1	...	0
...
m	1	0	...	0	...	0

Расчет вероятности изготовления качественного узла для синтезированной цифровой модели процесса автоматизации ТО

$$A = \|\alpha_{ij}\| \quad \Rightarrow \quad \begin{matrix} R_{min} = (R_{z1}, \dots, R_{zi}, \dots, R_{zm})^T \\ P_{min} = (P_{z1}, \dots, P_{zi}, \dots, P_{zm})^T \end{matrix} \quad \Rightarrow \quad P(A) = \prod_{i=1}^m p_{zi}^{h_i}$$

h_i – число одинаковых ТО i -го вида; m – число видов ТО; P_{zi} – вероятность качественного изготовления ТО i -го вида автоматом из вектора типов автоматов R_{min}

Определение дополнительного числа узлов ΔN , компенсирующих брак, по справочным таблицам. Задано: число качественных узлов N и вероятность S . Вероятность $P(A)$ рассчитана.

Справочная таблица. Оценка ΔN при $S \geq 0,999999$

N	Вероятность изготовления качественного узла P					
	0,9	0,92	0,95	0,98	0,99	0,999
	ΔN					
1	9	8	7	5	4	3
10	12	10	9	6	5	3
100	33	28	21	13	10	5
...
1000000	112900	88420	53800	21111	10588	1170

Биномиальное распределение числа качественных узлов в партии:

$$Bin(k, N, p) = C_N^k p^k (1-p)^{N-k}$$

k – число точно качественных узлов.
Вероятность, что в партии не менее N качественных узлов:

$$S(N + \Delta N) \leq \sum_{j=N}^{N+\Delta N} Bin(N, j, p)$$

Вычисление стоимости изготовления одного качественного узла в партии из $N + \Delta N$

Метод расчета стоимости изделия при иерархической схеме производства

Исходные данные

- 1) Общее число элементарных деталей, предназначенных для изготовления изделия: $N = n^m$
- 2) n - число элементов в узле, одинаковое на всех уровнях иерархии,
- 3) t - число уровней иерархии, g – время выполнения одной ТО, q^n - вероятность, что узел качественный, контроль узлов идеальный

Стоимость узла на каждом уровне иерархии

=

Средняя стоимость изготовления узла

+

Средняя стоимость n узлов предыдущего уровня

Метод расчета стоимости узла на t уровнях иерархии

Уровень 1.

$$c_1 = gnq^{-n}$$

Уровень 2.

$$c_2 = gnq^{-n} + c_1 nq^{-n} = gnq^{-n} (1 + nq^{-n})$$

Уровень 3.

$$c_3 = (gn + c_2 n)q^{-n} = gnq^{-n} (1 + nq^{-n} + n^2 q^{-2n})$$

...

...

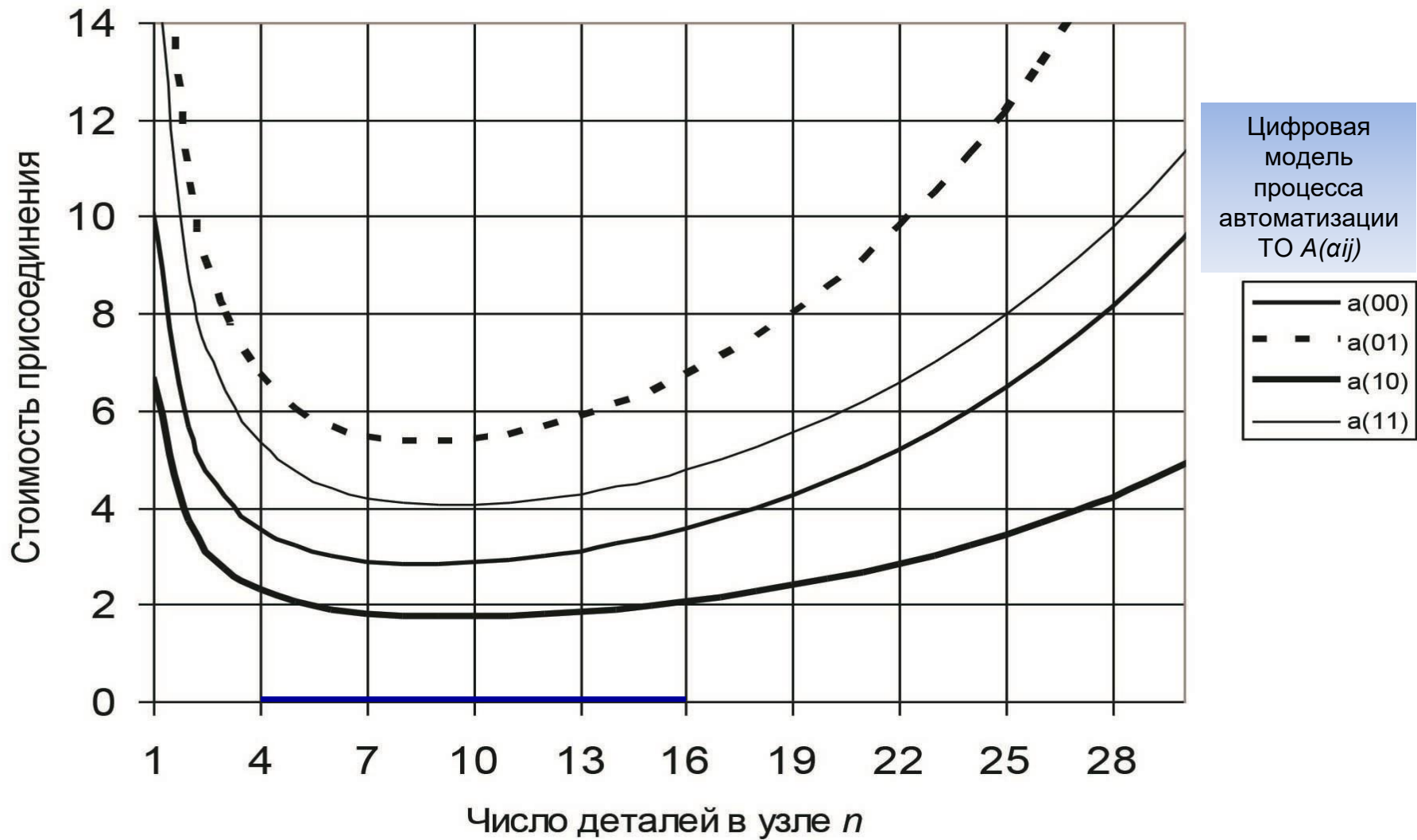
$$\text{Уровень } t: \quad c_m = (gn + c_{m-1} n)q^{-n} = gnq^{-n} (1 + nq^{-n} + n^2 q^{-2n} + \dots + n^{m-1} q^{-n(m-1)})$$

Стоимость изделия, изготовленного:
- по иерархической схеме:

$$c_m \approx gNq^{-nm}$$

- без контроля узлов: $c_m \approx gNq^{-n^m}$

Зависимость стоимости присоединения одной детали от числа деталей в узле для двух ТО



Методология цифрового моделирования для управления процессом технологической подготовки гибких производств

Методы формализованного представления иерархического дискретного производства

Обобщенная цифровая модель иерархического дискретного производства

Методы и алгоритмы для анализ эффективности автоматизации ТО изготовления изделия и техобслуживания автоматов

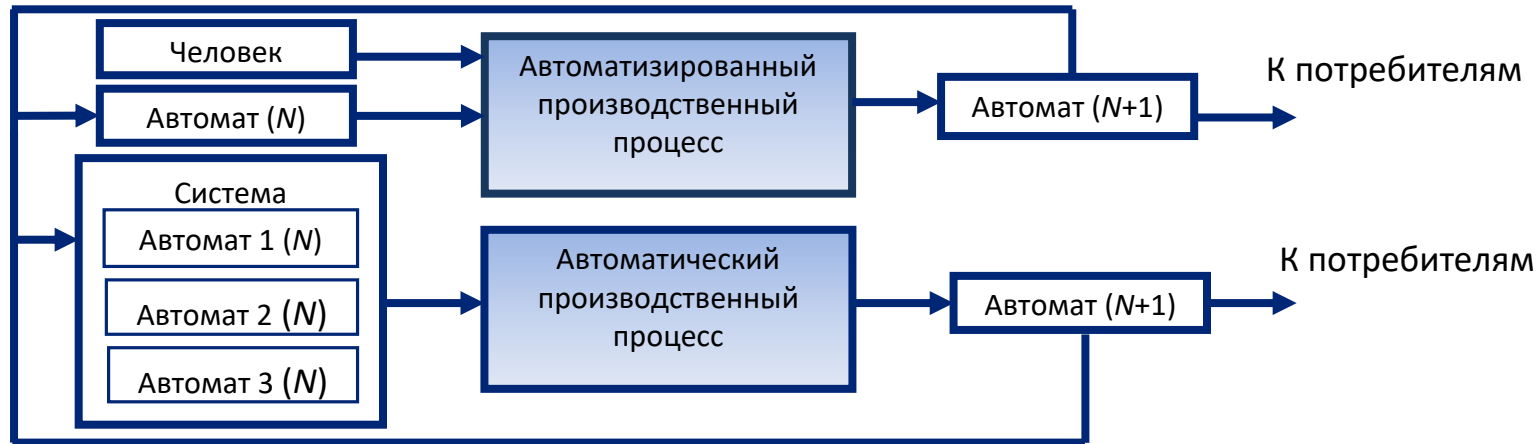
Методы и алгоритмы, позволяющие синтезировать цифровые модели процесса автоматизации ТО

Методы и алгоритмы, позволяющие анализировать эффективность автоматизации ТО при изготовлении изделий на уровне узлов

Методы и алгоритмы, позволяющие анализировать эффективность автоматизации ТО при:

- изготовлении автоматов;
- техобслуживании автоматов;
- изготовлении изделий с учетом обслуживания автоматов

Метод и алгоритмы анализа эффективности автоматизации ТО при производстве автоматов по критериям снижения их стоимости и стоимости единицы рабочего времени



Получены разностные уравнения для автомата партии N+1:

Стоимости

$$C_{N+1}(A) = G(A) + \lambda_N B(A)$$

Стоимости единицы рабочего времени

Средней стоимости единицы рабочего времени

$$\lambda_{N+1}(A) = \frac{\Phi_{N+1}(A)}{\tau} = \frac{G(A)}{TP(A) - B(A)} + \lambda_N \frac{B(A)}{TP(A) - B(A)}$$

Средней стоимости

$$\Phi_{N+1}(A) = (G(A) + \lambda_N B(A)) / P(A)$$

$$\lambda_{N+1}(A) = \frac{C_{N+1}(A)}{T} = \frac{G(A)}{T} + \lambda_N \frac{B(A)}{T}$$

Ресурс автомата после изготовления автомата N+1 уменьшается

$$\tau = T - \frac{B(A)}{P(A)}$$

Условие физической возможности изготовления автомата N+1:

$$\frac{B(A)}{P(A)} < T$$

где $G(A)$ и $B(A)$ – время работы человека и автомата, T – ресурс автомата, λ_N – стоимость единицы рабочего времени автомата N -й партии; $P(A)$ – вероятность качественного изготовления автомата

Алгоритм синтеза цифровой модели автоматизации ТО при производстве автоматов по критерию снижения их стоимости единицы рабочего времени

Построение матрицы, содержащей стоимости единицы рабочего времени автомата k -го типа:

Стоимость изготовления автомата

$$C_k(N+1) = \sum_{j=1}^f \sum_{i=1}^m \alpha_{kij} b_{ij} \lambda_j(N) h_{ki} + D_k$$

Стоимость единицы рабочего времени автомата

$$\lambda_k(N+1) = \sum_{j=1}^f \sum_{i=1}^m \alpha_{ij} e_{kij} \lambda_j(N) h_{ki} + E_k$$

где $e_k(i, j) = b_{ij} / T_k$ - относительное время выполнения ТО при изготовлении автомата k -го типа, T_k - время жизни автомата k -го типа, $E_k = D_k / T_k$ - относительная стоимость деталей автомата k -го типа.

ТО	Автомат R1	Автомат R2	...	Автомат Rf
1	$\alpha_{k11} e_{k11} h_{k1} \lambda_1 +$	$\alpha_{k12} e_{k12} h_{k1} \lambda_2 +$	...	$+ \alpha_{k1f} e_{k1f} h_{k1} \lambda_f +$
...
m	$\alpha_{km1} e_{km1} h_{km} \lambda_1 +$	$\alpha_{km2} e_{km2} h_{km} \lambda_2 +$	...	$+ \alpha_{kmf} e_{kmf} h_{km} \lambda_f +$

$+ E_k$

Элемент матрицы λ
с учетом вероятности
качественного выполнения ТО

$$\lambda_k(i, j) = \frac{\alpha_{kij} e_{kij} h_{ki} \lambda_j}{p_{ij} \wedge \alpha_{kij} h_{ki}}$$

Поиск в каждой строке матрицы минимальных значений стоимости единицы рабочего времени автомата, и формирование вектора $Z_{\min} = (z_1, z_2, \dots, z_j, \dots, z_f)^T$

Построение вектора, включающего типы автоматов, при выполнении ТО которыми у нового автомата минимальная λ : $R_{\min} = (R_{z1}, \dots, R_{zi}, \dots, R_{zm})^T$

Синтез по $R_{\min} \rightarrow A = \|\alpha_{ij}\|$, α_{ij} - параметр автоматизации ТО i -го вида автоматом j -го типа

Метод и алгоритмы анализа эффективности автоматизации ТО технического обслуживания автоматов по критериям продления их ресурса и снижения стоимости единицы рабочего времени



Обозначения: Φ – средняя стоимость качественного работа, $\Delta B/p_{mex}$ и $\Delta G/p_{mex}$ – средние затраты времени автомата/человека на техобслуживание, T – ресурс автомата, ΔT – увеличение ресурса автомата, p_{mex} – вероятность качественного выполнения ТО техобслуживания

Методы и алгоритмы анализа эффективности автоматизации ТО по критериям минимума значений времени и стоимости изготовления изделия (узла) с учетом затрат на обслуживание автоматов

Средняя стоимость выполнения ТО с учетом обслуживания автомата:

$$\Phi(A_{об}) = \Phi_{об}(A_{об}) + \Phi_{ст} + \Phi_{ст}(A_{об}) + \Phi_{ож}(A_{об})$$

Средние затраты на обслуживание автомата человеком или автоматом:

$$\Phi_{об}(A_{об}) = \frac{G_{об}}{Q_{об}} (1 - \alpha_{об}) + \lambda_R \alpha_{об} \frac{B_{об}}{P_{об}}$$

Средняя стоимость работы обслуживаемого автомата:

$$\Phi_{ст} = \lambda_{ст} \frac{B_{ст}}{P_{ст}}$$

Средние затраты автомата/человека в период работы автомата (ожидание):

$$\Phi_{ож}(A_{об}) = B_{ст} ((1 - \alpha_{об}) + \alpha_{об} \lambda_R)$$

Средние затраты ресурса автомата в период его обслуживания (ожидание):

$$\Phi_{ст}(A_{об}) = \lambda_{ст} (G_{об} (1 - \alpha_{об}) + \alpha_{об} B_{об})$$

Обозначения: $G_{об}$ и $B_{об}$ – время работы человека/автомата по обслуживанию автомата, $B_{ст}$ – время работы автомата, λ_R – стоимость единицы рабочего времени автомата, $\alpha_{об}$ – параметр автоматизации, показывающий исполнителя обслуживания автомата, $P_{об}$ и $Q_{об}$ – вероятность качественного обслуживания автомата автоматом/человеком, $\lambda_{ст}$ – стоимость единицы рабочего времени обслуживаемого автомата, $P_{ст}$ – вероятность качественной работы обслуживаемого автомата.

Алгоритм синтеза цифровой модели процесса автоматизации ТО, актуализированной по критерию минимума средних стоимостных затрат системы обслуживаемых автоматов

Построение матрицы средних стоимостных затрат системы автоматов на изготовление узла

Средние стоимостные затраты f обслуживаемых автоматов на изготовление узла

$$\Phi(A) = \sum_{j=0}^f \left(\sum_{i=1}^m \frac{\alpha_{ij} \lambda_j b_{ij} n_i}{p_{ij}^{n_i}} + \lambda_j U_j \right)$$

ТО	R1	...	RJ	...	Rf
1	$\lambda_1 \left(\frac{\alpha_{11} b_{11} n_1}{p_{11}^{n_1}} + U_1 \right)$	...	$+\lambda_j \left(\frac{\alpha_{1j} b_{1j} n_1}{p_{1j}^{n_1}} + U_j \right)$	...	$+\lambda_f \left(\frac{\alpha_{1f} b_{1f} n_1}{p_{1f}^{n_1}} + U_f \right)$
...
m	$\lambda_1 \left(\frac{\alpha_{m1} b_{m1} n_m}{p_{m1}^{n_m}} + U_1 \right)$	...	$+\lambda_j \left(\frac{\alpha_{mj} b_{mj} n_m}{p_{mj}^{n_m}} + U_j \right)$	...	$+\lambda_f \left(\frac{\alpha_{mf} b_{mf} n_m}{p_{mf}^{n_m}} + U_f \right)$

Время обслуживания автомата j -го типа

$$U_j = G_j (1 - \alpha_{обj}) + \alpha_{обj} \lambda_{Rj} B_j$$

Поиск в каждой строке матрицы минимальных стоимостных затрат

$$\mathbf{Z}_{\min} = (z_1, z_2, \dots, z_j, \dots, z_f)^T$$

Построение вектора, включающего типы автоматов, характеризующихся минимальными стоимостными затратами на изготовление узла: $\mathbf{R}_{\min} = (R_{z1}, \dots, R_{zi}, \dots, R_{zm})^T$

Синтез $A = \|\alpha_{ij}\|$, α_{ij} – параметр автоматизации ТО i -го вида станком j -го типа

Обозначения: f – общее число типов обслуживаемых автоматов, m – общее число видов ТО, n_i – число ТО i -го вида, b_{ij} – время выполнения ТО i -го вида автоматом j -го типа, α_{ij} – часть ТО выполненная автоматом j -го типа, G_j и B_j – временные затраты человека/автомата на обслуживание автомата j -го типа, λ_j и λ_{Rj} – стоимость единицы рабочего времени обслуживаемого автомата j -го типа и обслуживающего его автомата, $\alpha_{обj}$ – параметр автоматизации, определяющий исполнителя обслуживания автомата j -го типа, p_{ij} – вероятность качественного выполнения элементов ТО i -го вида автоматом j -го типа

Методология цифрового моделирования для управления процессом технологической подготовки гибкого производства

I. Методы и алгоритмы анализа эффективности цифровых моделей процесса автоматизации ТО при различных стратегиях изготовления узлов (партии узлов) для иерархической схемы производства с учетом:

- числа деталей в узле;
- стоимости деталей;
- повторного изготовления бракованного узла, контроля выполнения ТО;
- повторного контроля узла;
- узлов, компенсирующих брак, при изготовлении партии узлов

II. Методы и алгоритмы синтеза цифровых моделей процесса автоматизации ТО при изготовлении изделий/узлов и техобслуживании автоматов, актуализированных по заданным производственным показателям

III. Методы и алгоритмы оценивания значений производственных показателей по цифровым моделям процесса автоматизации ТО при изготовлении изделий/узлов и техобслуживании автоматов

Производственные показатели

Минимальные и минимальные средние значения:

- времени изготовления изделий/техобслуживания автоматов;
- стоимости изготовления изделий / техобслуживания автоматов;
- стоимости единицы рабочего времени автоматов

IV. Методы и алгоритмы анализа эффективности различных цифровых моделей процесса автоматизации ТО при изготовлении автоматов

V. Методы и алгоритмы анализа эффективности различных цифровых моделей процесса автоматизации ТО при техническом обслуживании автоматов

VI. Методы и алгоритмы анализа эффективности различных цифровых моделей процесса автоматизации ТО при изготовлении изделий с учетом обслуживания автоматов

Производственные показатели

Минимальные и минимальные средние значения:

- времени изготовления автоматов;
- стоимости изготовления автоматов;
- стоимости единицы рабочего времени автоматов

Производственные показатели:

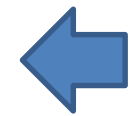
- Минимальные и минимальные средние значения единицы рабочего времени автоматов;
- Увеличение времени жизни автомата

Производственные показатели:

Минимальные средние значения времени и стоимости ожидания обслуживания автомата

Программное обеспечение, реализующее методологию цифрового моделирования для управления процессом технологической подготовки гибкого производства

Input-Data – модуль сбора и подготовки данных



Модуль подготовки данных для анализа эффективности автоматизации технологических операций

Исполнители ТО Технологические операции Узел Изделия Помощь Выход

Изделия

Поиск

Изделие

Изделия

Датчик

+50 -50

Узлы

- Узел1. Запрессовка стержня в корпус
- Узел2. Установка шарика
- Узел3. Установка крышки

Добавить Изменить Удалить

Технологические операции

- Взять болт, одеть шайбу, наживить, завернуть
- Взять магнит, установить на крышку
- Взять узел 2
- Завернуть болт динамомокмом 10 кгм
- Освободить готовый датчик из тисков

Исполнители

- Fanuc LR Mate 200ID/7L
- Hanwha HC
- Universal Robots 10

Анализ эффективности автоматизации технологических операций

Подготовка исходных данных Производство узла Производство изделия Производство автоматов Техническое обслуживание автоматов Переналадка Компенсация брака Помощь Выход

Производство узла

Поиск

Вид узла:

Вид узла

- Узел1. Запрессовка
- Узел2. Установка ш
- Узел3. Установка кр
- Фрезеровать пазы
- Фрезеровать торцы

+30 -30

Оценивание минимальной средней стоимости изготовления узла: « Фрезеровать торцы, центровать »

Технологические операции	ФС-300	ФС-400	Человек	Минимальная средняя стоимость	Вероятность	Оптимальная матрица автомата
Выбор программы фрезерного станка	0	0	2,00200197620122	2,00200197620122	0,9990000128	Человек
Выгрузить узел из фрезерного станка	0	0	5,00500494050305	5,00500494050305	0,9990000128	Человек
Загрузка фрезерного станка	0	0	15,0150148215091	15,0150148215091	0,9990000128	Человек
Фрезеровать торцы, центровать	1,8399476026	1,737848937	0	1,73784893767467	0,9990000128	ФС-400

Итоговые показатели

Минимальная средняя стоимость изготовления узла: минут

Вероятность качественного изготовления узла

Сохранить в EXCEL

Analitic – информационно-аналитическая система



Управление процессом технологической подготовки производства на ОАО «Кизлярский электромеханический завод» на примере изготовления датчика расхода жидкости

Конструктивно датчик состоит из узлов (сборочных единиц)

1. Корпус – включает корпус и приваренные к нему два штуцера (на чертеже поз. 1).
 2. Корпус со стержнем.
 3. Корпус с шариком.
 4. Корпус с крышкой.
- После изготовления каждого узла выполняется контрольная операция.

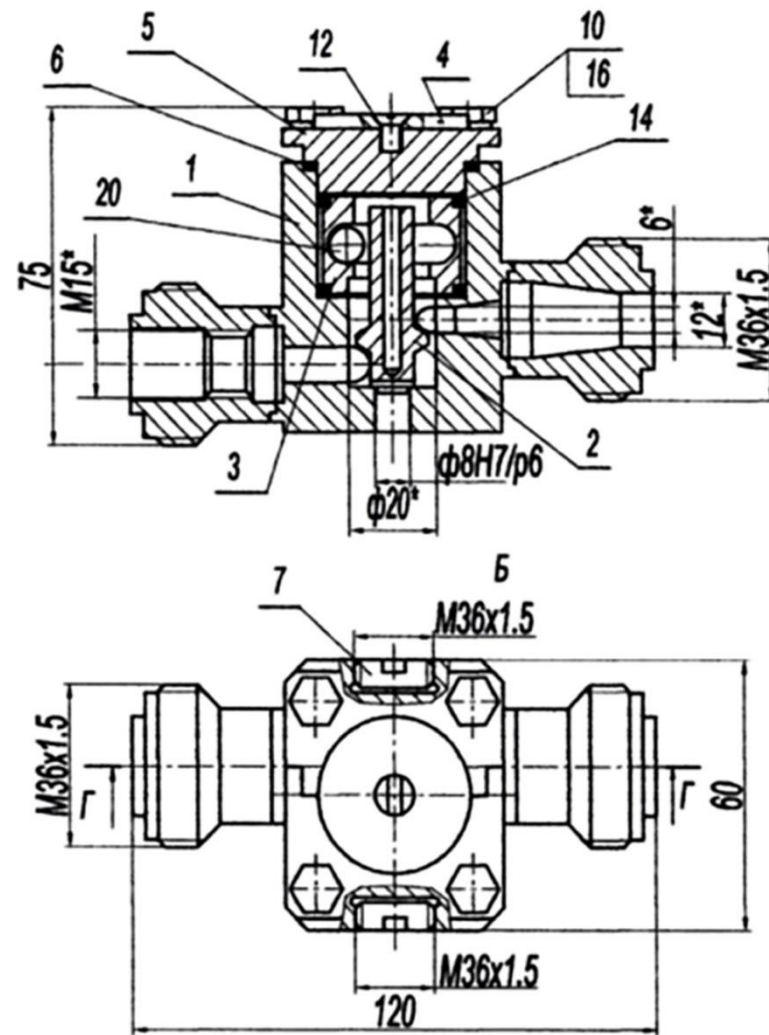
Информация о ТО изготовления датчика

По каждому узлу приводится описание ТО с характеристиками – время выполнения ТО и вероятность качественного выполнения ТО каждым исполнителем

Информация об используемых автоматах

	Автоматы	Тип	Стоимость, руб.	Стоимость, мин.	Стоимость единицы рабочего времени
R1	Гидравлический пресс	П6320Б	580000	48 000	0,0208
R2	Робот Hanwha	HCR12	2593500	240000	0,104
R3	Робот Universal Robots	UR 10	3046972	297600	0,13
R4	Робот Fanuc LR Mate	200iD/7L	2707700	249600	0,108

Конструкторская документация



Результаты управления процессом технологической подготовки производства на ОАО «КЭМЗ»

В процессе технологической подготовки производства датчика расхода жидкости решены задачи

Получены оценки значений времени, стоимости, вероятности качественного изготовления и средней стоимости при ручном изготовлении единицы изделия.

Получены цифровые модели процесса автоматизации ТО, актуализированные по критерию минимума средней стоимости при изготовлении первого узла

№ ТО	R1	R2	R3	R4	R1	R2	R3	R4	R1	R2	R3	R4	z1=b1/λ1	z2=b2/λ2	z3=b3/λ3	z4=b4/λ4	Z _{min}	R _{min}	z1/p1	z2/p2	z3/p3	z4/p4	Z _{min}	R _{min}
	b1/λ	b2/λ	b3/λ	b4/λ	p1	p2	p3	p4	b1/λ	b2/λ	b3/λ	b4/λ												
1.	-	0,2	0,2	0,2	1	0,999	0,999	0,999	-	0,021	0,026	0,021	0,021	R2	-	0,021	0,026	0,022	0,021	R2				
2.	-	0,5	0,6	0,5	1	0,999	0,999	0,999	-	0,052	0,078	0,054	0,052	R2	-	0,052	0,078	0,054	0,052	R2				
3.	-	0,1	0,1	0,1	1	0,999	0,999	0,999	-	0,01	0,013	0,011	0,01	R2	-	0,01	0,013	0,011	0,01	R2				
4.	-	0,2	0,3	0,2	1	0,999	0,999	0,999	-	0,021	0,039	0,022	0,021	R2	-	0,021	0,039	0,022	0,021	R2				
5.	-	0,2	0,2	0,2	1	0,999	0,999	0,999	-	0,021	0,026	0,022	0,021	R2	-	0,021	0,026	0,022	0,021	R2				
6.	-	0,3	0,4	0,2	1	0,995	0,992	0,995	-	0,031	0,052	0,022	0,022	R4	-	0,031	0,052	0,236	0,022	R4				
7.	-	0,2	0,3	0,2	1	0,999	0,999	0,999	-	0,021	0,039	0,022	0,021	R2	-	0,021	0,039	0,022	0,021	R2				
8.	-	0,1	0,1	0,1	1	0,999	0,999	0,999	-	0,01	0,013	0,011	0,01	R2	-	0,01	0,03	0,011	0,113	R2				
9.	1	1	1	1	0,9999	1	1	1	0,024	0,1	0,13	0,11	0,1	R1R2	0,024	0,1	0,13	0,11	0,1	R1R2				
10.	-	0,1	0,1	0,1	1	0,999	0,995	0,999	-	0,01	0,013	0,011	0,01	R2	-	0,01	0,013	0,022	0,01	R2				
11.	-	0,2	0,2	0,2	1	0,999	0,999	0,999	-	0,021	0,026	0,022	0,021	R2	-	0,021	0,026	0,022	0,021	R2				
12.	-	0,2	0,2	0,2	1	0,989	0,989	0,989	-	0,021	0,026	0,022	0,021	R2	-	0,021	0,026	0,022	0,021	R2				
13.	-	0,2	0,2	0,2	1	0,999	0,999	0,999	-	0,021	0,026	0,022	0,021	R2	-	0,021	0,026	0,022	0,021	R2				
14.	-	0,2	0,2	0,2	1	0,999	0,999	0,999	-	0,021	0,026	0,022	0,021	R2	-	0,021	0,026	0,022	0,021	R2				

Для решения производственного задания назначен автомат Fanuc.

Предложены возможные варианты повышения вероятности качественного изготовления изделия для партии из N =100 тыс. ед.

Узел	Название узла	Автоматическое изготовление		
		Мероприятие	P	Φ
1	Корпус + Стержень	ΔN=2115	0,9999	0,415
2	Корпус + Шарика	ΔN=712	0,9999	0,399
3	Корпус + Крышка	Повторная сборка 2,3% узлов	0,995	0,764
	Вероятность качеств. изготовления		0,995	
	Средняя стоимость изготовления			1,578

Получены оценки значений параметров: время, стоимость, вероятность качественного изготовления и средняя стоимости изготовления датчика с использованием автомата Fanuc.

Узел	Название узла	Ручное изготовление			Автоматическое изготовление			
		G	Q	Φ	B	P	C	Φ
1	Корпус + Стержень	10,6	0,9889	10,71	3,7	0,9831	0,40642	0,40682
2	Корпус + Шарика	5	0,9917	5,04	3,8	0,9891	0,3958	0,39623
3	Корпус + Крышка	11,9	0,982	12,12	7	0,9772	0,7292	0,73015
	Время изготовления	27,5			14,5			
	Вероятность изготовления		0,963			0,95		
	Стоимость изготовления						1,531	
	Средняя стоимость изготовления			27,87				1,5332

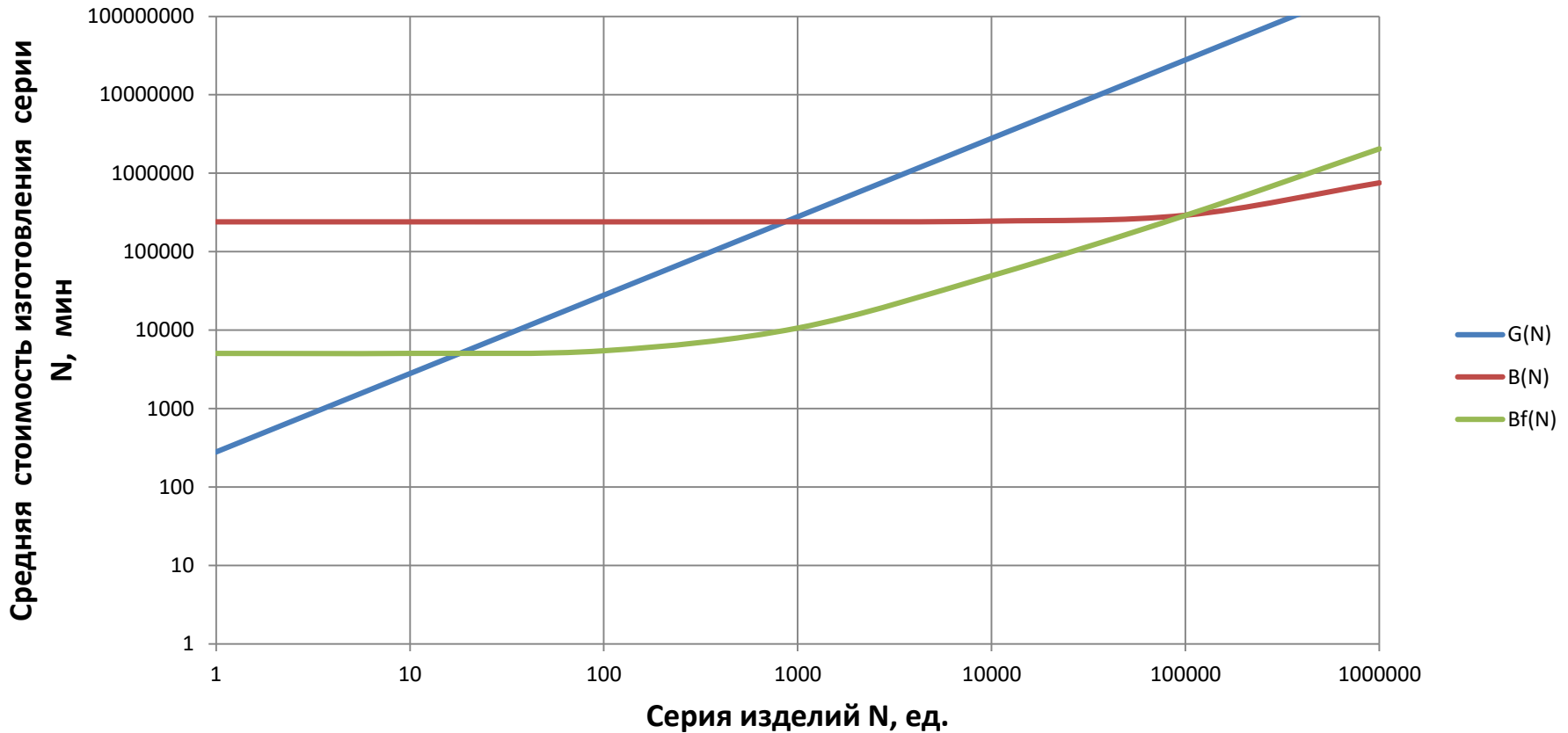
Получены оценки значений времени, стоимости, средней стоимости, вероятности качественного выполнения переналадки производственной линии на новую продукцию

Ручная смена захвата у робота (переналадка)

№ ТО	Описание операций	Человек				
		g0	g	q0	q	n
1.	Принести требуемый захват к месту монтажа	10	10	0,9999	0,9999	1
2.	Повернуть подпружиненную ручку	1	2	0,99	0,999	2
3.	Вынуть штифт	1	2	0,99	0,999	2
4.	Снять демонтируемый захват	3	6	0,99	0,999	2
5.	Аккуратно отложить в сторону	2	4	0,99	0,999	2
6.	Взять требуемый захват	1	2	0,9	0,999	2
7.	Одеть его на автомат	3	12	0,9	0,9999	4
8.	Вставить штифт	1	4	0,9	0,9999	4
9.	Повернуть подпружиненную ручку	1	4	0,9	0,9999	4
10.	Унести демонтированный захват	10	10	0,9999	0,9999	1
	Время монтажа G	33	56			
	Вероятность монтажа Q				0,9945	
	Средние стоимостные затраты человека на переналадку, G/Q		56,3			

Результаты управления процессом технологической подготовки производства на ОАО «КЭМЗ»

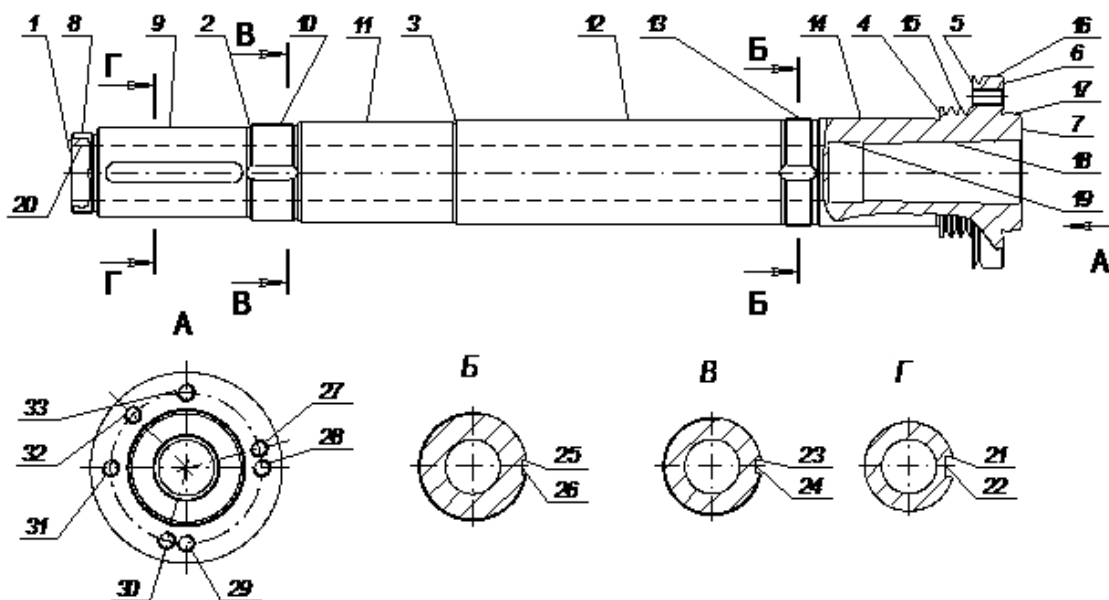
Зависимость средней стоимости партии изделий от величины партии



G – ручное изготовление изделия, B – автоматическое изготовление изделия,
Bf – изготовление на гибком производстве

Управление процессом технологической подготовки производства на ООО «Владимирский станкостроительный завод» на примере изготовления шпинделя токарного станка

Чертеж шпинделя токарного станка с кодировкой поверхностей детали



Информация о ТО изготовления шпинделя

При механической обработке заготовки под шпindelь требуется изготовить 15 узлов.

По каждому узлу приводится описание ТО с характеристиками – время выполнения ТО и вероятность качественного выполнения ТО каждым исполнителем

Информация об используемых автоматах

Идентификатор	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8
Тип автомата	Fanuc M-20iA	ФС-300	ФС-400	АТПП-125	С-300	СТПМ-125	SLT-320	КМЦ-600
Стоимость работа Ср, руб.	4093500	3850000	4000000	3547000	3931000	3400000	3478000	3900000
Стоимость работа Ср, мин	392976	369600	384000	340992	377376	326400	333888	374400
λ, мин	0,171	0,16	0,167	0,148	0,164	0,141	0,145	0,163

Результаты управления процессом технологической подготовки производства на ООО ВСЗ «Техника»

В процессе технологической подготовки производства шпинделя решены задачи

Получены оценки значений времени, стоимости, вероятности качественного изготовления и средней стоимости изготовления узлов шпинделя при обслуживании всех станков человеком

Изготовление Узла 1 - «Фрезеровать торцы. Сверлить центровочные отверстия». Используются фрезерные станки ФС-300 или ФС-400

Описание элементов ТО	Человек			ФС-300; $\lambda = 0,16$		ФС-400; $\lambda = 0,167$	
	$G_{об}$	$Q_{об}$	$G_{об}/Q_{об}$	b	p	b	p
Загрузка	15	0,999	15,015	15	1	15	1
Выбор режимов	0,5	0,999	0,5005	0,5	1	0,5	1
Работа станка	1	1	-	1,1	0,9999	1	0,9999
Выгрузка	7	0,999	7,007	7	1	7	1
Средняя стоимость работы, Фр			22,52	0,176		0,167	
Средняя стоимость ожидания, Фож	1,1			3,6		3,758	
Фр+Фож				3,776		3,925	
Время изготовления	23,6		Средняя стоимость изготовления узла			27,398	

Получены оценки значений производственных параметров изготовления узлов шпинделя при обслуживании шлифовальных станков сер. КШ автоматом, а всех остальных станков – человеком.

Изготовление Узла 8 - «Шлифовать центровые фаски». Используется шлифовальный станок КШ-400

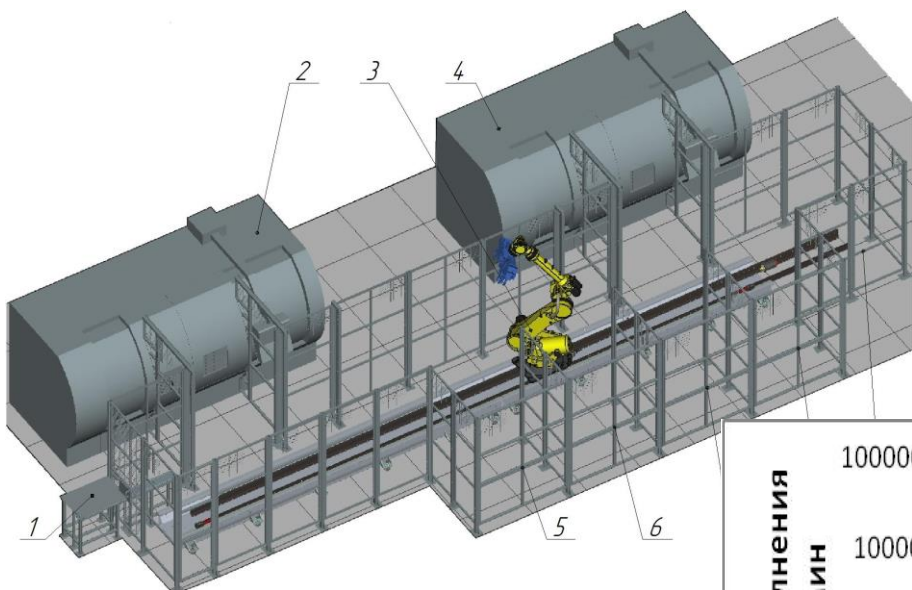
Описание элементов ТО	Человек			Fanuc M-20iA $\lambda = 0,171$			КШ-400 $\lambda = 0,175$	
	$G_{об}$	$Q_{об}$	$G_{об}/Q_{об}$	b	p	b/p	b	p
Загрузка	15	0,999	15,015	2	0,999	0,34234	15	1
Выбор режимов	0,5	0,999	0,5005	0,01	0,999	0,00171	0,5	1
Работа станка	0,8	1	0	0,8	1	0	0,8	0,9999
Выгрузка	7	0,999	7,007	1	0,999	0,17117	7	1
Время работы	22,5			3,01			0,8	
Время изготовления	23,3							
Средняя стоимость работы			22,5225			0,51522	0,14	
Средняя стоимость ожидания	0,8			0,1368			Чел:3,93	Роб:0,53
Средняя стоимость изготовления узла	При обслуживании чел-ком 27,4			При обслуживании роботом 4,73				

Получены цифровые модели процесса автоматизации ТО, актуализированные по критерию минимума средней стоимости узлов, которые могут быть изготовлены разными автоматами

Изготовление Узла 10 - «Шлифовать наружный конус и прилегающий торец фланца предварит.». Используется шлифовальные станки КШ-400, 600, 1000

Описание элементов ТО	Человек			Fanuc M-20iA $\lambda = 0,171$			КШ-400 $\lambda = 0,175$		КШ-600 $\lambda = 0,177$		КШ-1000 $\lambda = 0,181$	
	$G_{об}$	$Q_{об}$	$G_{об}/Q_{об}$	b	p	b/p	b	p	b	p	b	p
Загрузка	15	0,999	15,02	2	0,999	0,3422	-	1	-	1		1
Выбор режимов	0,5	0,999	0,502	0,01	0,999	0,0017	-	1	-	1		1
Работа станка		1	0		1	0	0,42	0,999	0,405	0,999	0,39	0,999
Выгрузка	7	0,999	7,01	1	0,999	0,1712	-	1	-	1		1
Время работы	22,5			3,01			0,42		0,405		0,39	
Средняя стоимость работы, Фр			22,532			0,515	0,0736		0,0718		0,0707	
Средняя стоимость ожидания, Фож	0,42				0,07		Ч 3,9375	Р 0,53	3,9825		4,0725	
Фр+Фож							4,011		4,054		4,143	
Время изготовления узла				22,92							3,43	
Средняя стоимость изготовления узла	Человек +КШ-400			26,96			Робот +КШ-400				1,87	

Разработанные методы и алгоритмы использовались при анализе и выработке рекомендаций в ходе модернизации производства в условиях импортозамещения, ООО «Униматик» (г. Екатеринбург)



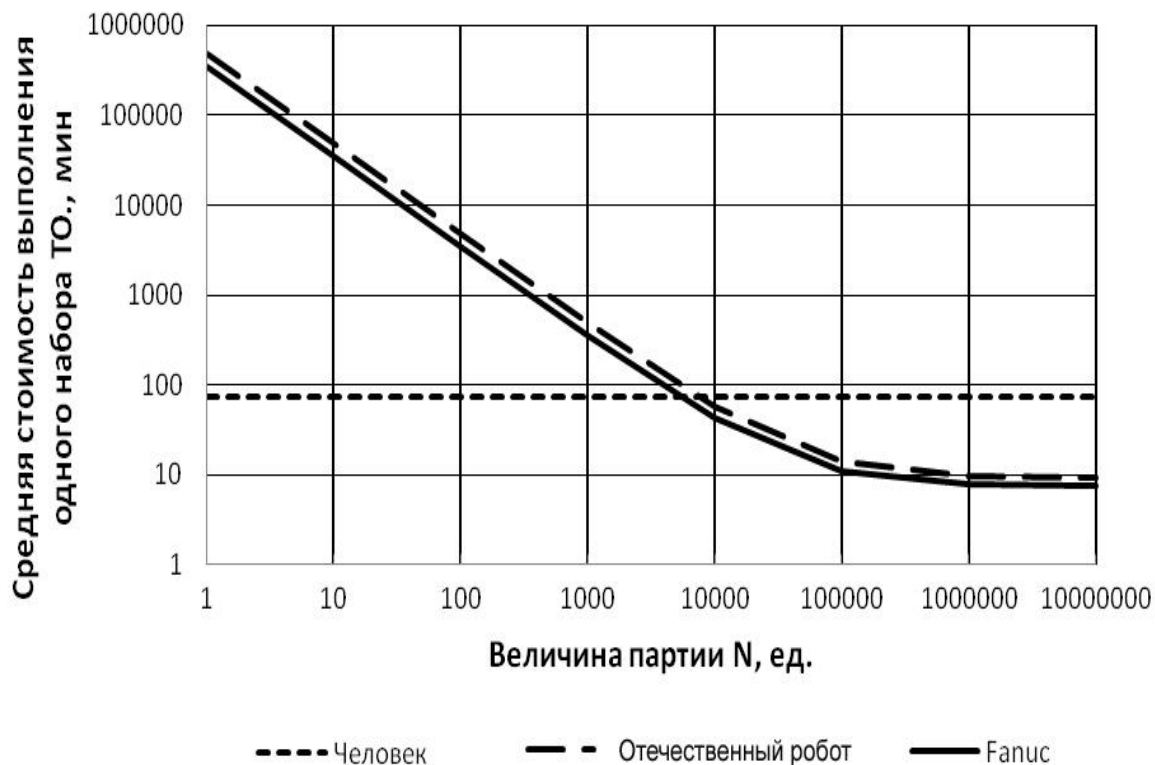
Трехмерная модель модернизируемой гибкой роботизированной ячейки

Отечественный робот

Число осей, ед.	6
Грузоподъемность	180 кг
Зона досягаемости	2900 мм
Стоимость	4,95 млн. руб.

Робот Fanuc R-2000iC/165F

Число осей, ед.	6
Грузоподъемность	165 кг
Зона досягаемости	2655 мм
Стоимость	4 млн. руб.



Результаты исследований

1. В работе решена актуальная научная проблема, имеющая важное значение для развития промышленности РФ в условиях цифровизации – разработана методология цифрового моделирования для управления процессом технологической подготовки гибкого дискретного производства, позволяющая анализировать эффективность автоматизации ТО изготовления изделий и техобслуживания автоматов по различным критериям, учитывающим показатели качественного выполнения ТО автоматами.
2. Разработаны методы формализованного описания дискретных иерархических производств, учитывающие показатели качественного выполнения ТО автоматами и не зависящие от видов ТО и выпускаемых изделий, типов автоматов.
3. Разработана обобщенная цифровая модель иерархического дискретного производства, описывающая различные производственные условия изготовления узлов/изделий с учетом показателей качественного выполнения ТО автоматами.
4. Разработаны методы и алгоритмы, позволяющие анализировать эффективность автоматизации ТО для различных стратегий изготовления качественных узлов и партии узлов при иерархической схеме производства изделия.

Выводы (продолжение)

5. Разработаны методы и алгоритмы, позволяющие:
 - синтезировать цифровые модели процесса автоматизации ТО при изготовлении изделия и техобслуживании автоматов, актуализированные по заданным производственным показателям;
 - оценивать значения производственных показателей по цифровым моделям процесса автоматизации ТО при изготовлении изделия и техобслуживании автоматов.
6. Разработаны методы и алгоритмы, позволяющие анализировать эффективность автоматизации ТО: изготовления изделий с учетом затрат на обслуживание автоматов, производства автоматов, технического обслуживания автоматов.
7. Разработано программное обеспечение, реализующее основные положения методологии цифрового моделирования для управления процессом технологической подготовки гибкого производства.
8. Исследована возможность применения методологии цифрового моделирования для управления процессом технологической подготовки различных дискретных производств.

Перспективы исследований

1. Разработать методы и алгоритмы для оценки эффективности автоматизации на уровне элементов ТО для различных производственных задач
2. Исследование возможностей методологии цифрового моделирования для управления процессом создания автономных систем.
3. Исследование возможностей методологии цифрового моделирования для управления процессом создания адаптивных систем.

**Спасибо за
внимание!**