аУДК 65.011 DOI: 10.31799/2077-5687-2026-3-24-33

МОДЕЛЬ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ФУНКЦИЙ КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА МЕЖДУ ОПЕРАТОРОМ И КОЛЛАБОРАТИВНЫМ РОБОТОМ В КИБЕРФИЗИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ

М. В. Иванов
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

Предложена трехуровневая математическая модель, позволяющая оценить сложность контрольных операций на основе метода анализа иерархий, функциональные возможности оператора с учетом динамики когнитивной нагрузки и утомляемости, а также распределить задачи между человеком и роботом на основе целочисленного программирования. Проведено экспериментальное исследование на участке сборки электронных модулей приборостроительного предприятия. Получены значения интегральной сложности для типовых контрольных операций, индивидуальные параметры когнитивного ресурса операторов и показатели эффективности распределения функций.

Ключевые слова: распределение функций, коллаборативные роботы, управление качеством, киберфизическая система, когнитивная нагрузка, утомляемость оператора, метод анализа иерархий, целочисленное программирование, Индустрия 5.0.

Для цитирования:
Иванов, М. В. Модель распределения функций контроля качества между оператором и коллаборативным роботом в киберфизической системе / М. В. Иванов // Системный анализ и логистика. – 2026. – № 3(51). – с. 24-33. DOI: 10.31799/2077-5687-2026-3-24-33.

THE QUALITY CONTROL FUNCTIONS DISTRIBUTION MODEL BETWEEN AN OPERATOR AND A COLLABORATIVE ROBOT IN A CYBER-PHYSICAL SYSTEM

M. V. Ivanov
St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

An analysis of the quality control functions distribution problem was conducted for the joint work of an operator and a collaborative robot within a unified cyber-physical system of a modern instrumentation production in the context of the transition to the "Industry 5.0" concept. A three-level mathematical model is proposed that allows assessing the complexity of quality control operations based on the hierarchy analysis method, evaluating the operator's functional capabilities considering the dynamics of cognitive load and fatigue, as well as distributing tasks between the human and the cobot based on integer programming. An experimental study was conducted at an electronic module assembly section of an instrument-making enterprise. The values of integral complexity for typical control operations, individual parameters of the operator cognitive resource, and performance indicators of function distribution were obtained.

Keywords: function distribution, collaborative robots, quality management, cyber-physical system, cognitive load, operator fatigue, analytic hierarchy process, integer programming, Industry 5.0.

For citation:
Ivanov, M. V. The quality control functions distribution model between an operator and a collaborative robot in a cyber-physical system / M. V. Ivanov // System analysis and logistics. – 2026. – № 3(51). – p. 24-33. DOI: 10.31799/2077-5687-2026-3-24-33.

Введение

Современное промышленное производство характеризуется активным внедрением коллаборативных роботов (коботов), способных безопасно работать совместно с человеком в едином производственном пространстве. В отличие от традиционных промышленных роботов, работающих в изолированных ячейках, коботы предназначены для непосредственного взаимодействия с оператором при выполнении совместных задач [1]. Это открывает новые возможности для организации процессов контроля качества, где сильные стороны человека (гибкость, способность к распознаванию сложных образов, принятие решений в нестандартных ситуациях) могут быть эффективно дополнены преимуществами кобота (высокая точность, повторяемость, отсутствие утомляемости) [2].

В условиях перехода к концепции «Индустрия 5.0» особую актуальность приобретает

задача распределения функций контроля качества между человеком-оператором и коботом в рамках единой киберфизической системы [3]. Эффективность совместной работы человека и кобота в значительной степени определяется тем, насколько рационально распределены функции между ними. Несбалансированное распределение задач приводит к следующим негативным последствиям:

- **Избыточная загрузка оператора** – выполнение монотонных, высокоточных измерений, требующих длительной концентрации внимания, приводит к быстрому утомлению и снижению достоверности контроля со стороны оператора [4];
- **Недостаточное использование кобота** – передача коботу задач, которые эффективнее выполняет человек, негативно влияет на окупаемость приобретенного оборудования [5];
- **Снижение общей эффективности производства** – неправильное распределение задач увеличивает общее время контроля и снижает пропускную способность производственного участка [6].

Таким образом, необходима разработка формальной модели распределения функций контроля качества между оператором и коллаборативным роботом, учитывающей как объективные характеристики контрольных операций и технические возможности кобота.

1. Разработка модели оценки сложности контрольных операций

Процесс контроля качества продукции может быть представлен как последовательность элементарных контрольных операций, каждая из которых характеризуется набором параметров, определяющих ее сложность и требования к исполнителю.

Для количественной оценки сложности контрольных операций предлагается использовать метод анализа иерархий [7], адаптированный для задач контроля качества. Иерархическая структура оценки сложности включает уровни, представленные на рисунке 1.

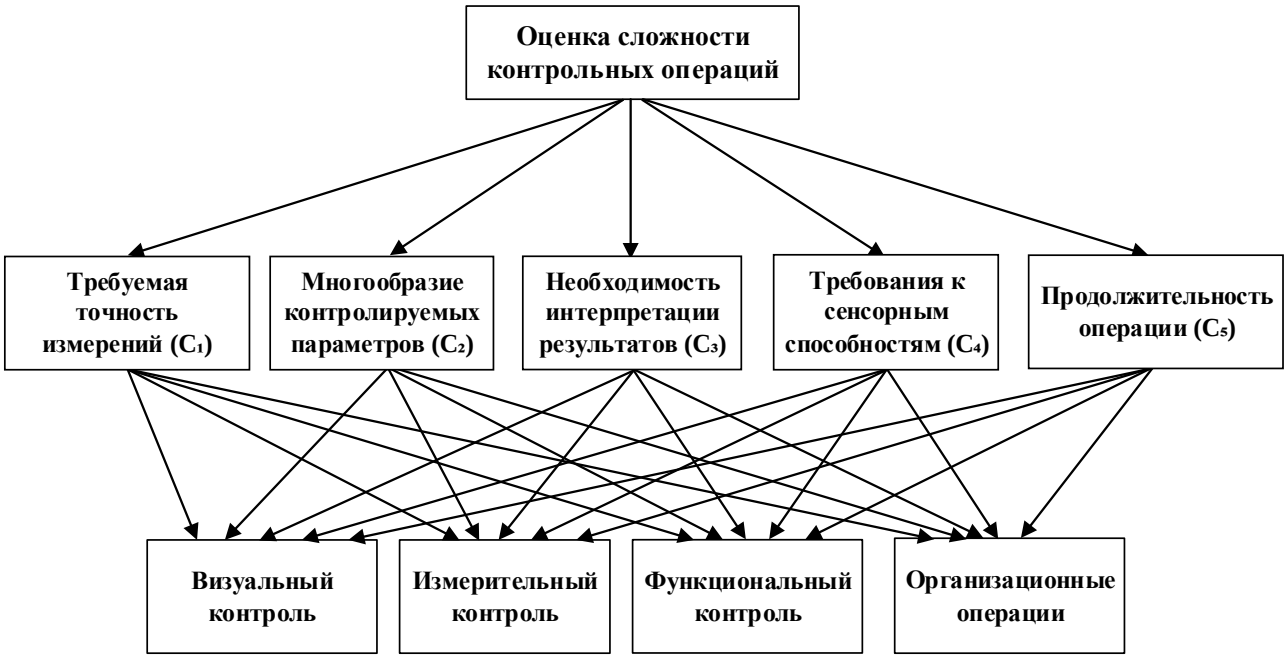


Рис. 1. Уровни структуры оценки сложности контрольных операций

Критериями сложности являются:

1. **Требуемая точность измерений (C_1):** характеризует допустимую погрешность контроля. Чем выше точность, тем сложнее операция;

2. **Многообразие контролируемых параметров (C_2):** характеризует количество одновременно контролируемых параметров и их разнородность;
3. **Необходимость интерпретации результатов (C_3):** характеризует степень субъективности в принятии решения о годности/браке;
4. **Требования к сенсорным способностям (C_4):** характеризует необходимость использования различных органов чувств (зрение, осязание, слух);
5. **Продолжительность операции (C_5):** характеризует время, необходимое для выполнения контроля.

Матрица парных сравнений критериев имеет вид [8]:

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{15} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{25} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{51} & a_{52} & \cdots & a_{55} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

где a_{ij} – оценка относительной важности i-го критерия по сравнению с j-м.

Вектор приоритетов критериев вычисляется как собственный вектор матрицы A по формуле (1) [9], соответствующий максимальному собственному значению λ_{max}:

$$\begin{cases} A \cdot w = \lambda_{max} \cdot w \\ \sum_{i=1}^{5} w_i = 1, \quad w_i > 0 \end{cases} \quad (2)$$

Интегральная оценка сложности i-й контрольной операции вычисляется по формуле:

$$S_i = \sum_{k=1}^{5} w_k \cdot s_{ik} \quad (3)$$

где w_k - значение весового коэффициента k-го критерия из вектора приоритетов критериев по формуле (2), s_{ik} – оценка i-й операции по k-му критерию (табл. 2).

Все критерии сложности оцениваются по шкале в соответствии с экспертными оценками, приведенными в таблице 1.

Таблица 1 – Шкала оценок критериев сложности контрольных операций

Балл	**Точность, C_1**	**Многообразие, C_2**	**Интерпретация, C_3**	**Сенсорика, C_4**	**Длительность, C_5**
1	±0,5 мм и грубее	1 параметр	Однозначное решение	Зрение	до 5 с
2	±0,1 мм	2 параметра	Простая интерпретация	Зрение + осязание	5-15 с
3	±0,05 мм	3-4 параметра	Средняя неопределенность	Зрение + слух	15-30 с
4	±0,02 мм	5-6 параметров	Высокая неопределенность	Все три канала	30-60 с
5	±0,01 мм и точнее	7 и более параметров	Экспертное решение	Сложная сенсорная интеграция	более 60 с

На основе интегральной оценки сложности S_i по формуле (3) все контрольные операции классифицируются на три группы:

1. **Операции низкой сложности** ($S_i \leq 2.0$): могут выполняться как человеком, так и роботом с высокой эффективностью. Рекомендуется передавать роботу для снижения монотонной нагрузки на оператора.
2. **Операции средней сложности** ($2.0 < S_i \leq 3.5$): требуют анализа для определения наиболее эффективного исполнителя с учетом конкретных условий.
3. **Операции высокой сложности** ($S_i > 3.5$): требуют участия человека из-за необходимости интерпретации неоднозначных результатов, принятия решений в нестандартных ситуациях или использования сложной сенсорной интеграции.

2. Разработка модели функциональных возможностей оператора

Интегральная оценка функциональных возможностей оператора для выполнения j-й операции определяется как:

$$F_j^{on} = \sum_{r=1}^{5} v_r \cdot f_{jr},$$

где v_r – весовые коэффициенты, отражающие важность r-й группы профессиональных качеств для выполнения задачи контроля; f_{jr} – оценка r-го качества оператора применительно к j-й операции по шкале от 0 до 1.

Группы профессиональных качеств оператора контроля:

1. **Точность и стабильность движений (v_1):** характеризует способность выполнять точные измерительные операции без дрожания рук.
2. **Острота зрения и способность к визуальному анализу (v_2):** характеризует способность обнаруживать мелкие дефекты и различать оттенки.
3. **Внимание и концентрация (v_3):** характеризует способность длительное время сохранять высокий уровень концентрации.
4. **Память и знание нормативной документации (v_4):** характеризует способность запоминать требования и применять их в практике контроля.
5. **Способность к принятию решений в нестандартных ситуациях (v_5):** характеризует готовность и способность принимать решения в условиях неопределенности.

Фактор утомляемости является ключевым при распределении функций контроля, поскольку длительное выполнение монотонных операций приводит к снижению внимания, увеличению числа ошибок и снижению достоверности контроля [10]. Для его учета предлагается модель когнитивного ресурса:

$$K(t+1) = K(t) - \lambda_j \cdot \Delta t + \rho \cdot (K_{max} - K(t)) \cdot \Delta t \quad (4)$$

где $K(t)$ – текущий доступный когнитивный ресурс, λ_j – интенсивность расхода когнитивного ресурса, ρ – коэффициент восстановления когнитивного ресурса, K_{max} - максимальный доступный когнитивный ресурс, Δt – шаг дискретизации (рекомендуется Δt = 1 мин). Доступный когнитивный ресурс определяет эффективность выполнения контрольной операции.

Текущая оценка функциональных возможностей оператора для выполнения j-й операции:

$$F_j^{on}(t) = F_j^{on}(0) \cdot \frac{K(t)}{K_{max}},$$

где $K(t)$ – текущий доступный когнитивный ресурс по формуле (4), K_{max} – максимальный доступный когнитивный ресурс, $F_j^{on}(0)$ – исходная оценка функциональных возможностей (при $K(t)=K_{max}$).

Для оценки текущей когнитивной нагрузки оператора предлагается использовать индекс когнитивной нагрузки, основанный на модели многоканального внимания [11]:

$$\begin{cases} CL(t) = \sum_{i=1}^{3} \beta_i \cdot \frac{L_i(t)}{L_i^{max}} \\ \sum_{i=1}^{3} \beta_i = 1 \end{cases} \quad (5)$$

где β_i – весовые коэффициенты для трех типов когнитивных ресурсов: сенсорного (β_1 = 0.3), оперативного (β_2 = 0.4), долговременного (β_3 = 0.3); $L_i(t)$ – текущая загрузка i-го ресурса; L_i^{max} – максимальная емкость i-го ресурса.

Критические уровни когнитивной нагрузки:

- $CL(t) < 0.5$ - нормальная нагрузка, работа эффективна;
- $0.5 \leq CL(t) < 0.7$ - повышенная нагрузка, требуется контроль;
- $0.7 \leq CL(t) < 0.85$ - высокая нагрузка, риск ошибок повышен;
- $CL(t) \geq 0.85$ - критическая нагрузка, требуется немедленный отдых или перераспределение задач.

3. Разработка модели распределения функций

Пусть имеется множество контрольных операций $J=\{1,2,\ldots,n\}$, которые необходимо распределить между оператором и коллаборативным роботом. Каждая операция j характеризуется:

- Сложностью S_j (определяется по модели оценки сложности контрольных операций);
- Требуемой точностью (допустимая погрешность, мм или %);
- Трудоемкостью T_j (время выполнения операции, мин).

Задача распределения функций может быть формулирована как задача целочисленного программирования:

$$F = \sum_{j=1}^{n} \left(C_j^{on} \cdot x_j + C_j^{коб} \cdot y_j \right) \to \min,$$

где C_j^{on} – стоимость выполнения контрольной операции оператором, $C_j^{коб}$ – стоимость выполнения контрольной операции коботом, причем операция должна быть назначена либо оператору, либо роботу:

$$x_j + y_j = 1, \quad j = 1,\ldots,n,$$

где $x_j \in \{0,1\}$ – индикатор назначения операции j человеку; $y_j \in \{0,1\}$ – индикатор назначения операции j роботу.

Стоимость выполнения контрольной операции оператором вычисляется по формуле:

$$C_j^{оп} = c_{оп} \cdot T_j + c_{ош}^{оп} \cdot (1 - p_j^{оп}), \quad (6)$$

где $c_{оп}$ – стоимость минуты рабочего времени оператора (включая накладные расходы); T_j – трудоемкость операции, мин; $c_{ош}{}^{оп}$ – стоимость ошибки контроля оператором; $p_j{}^{оп}$ – вероятность правильного определения годности/брака оператором.

Стоимость выполнения контрольной операции коботом может быть вычислена как:

$$C_j^{коб} = c_{коб} \cdot T_j + c_{ош}^{коб} \cdot (1 - p_j^{коб}), \quad (7)$$

где $c_{коб}$ – стоимость амортизации кобота в минуту работы; T_j – трудоемкость операции, мин; $c_{ош}{}^{коб}$ – стоимость ошибки контроля коботом; $p_j{}^{коб}$ – вероятность правильного определения годности/брака коботом.

Экспериментальная апробация разработанной модели проведена на участке сборки электронных модулей производственного предприятия. Участок оснащен:

- 4 коботами с измерительными головками и камерами машинного зрения;
- 2 автоматизированными измерительными станциями на базе систем технического зрения;
- 6 рабочими местами операторов контроля.

Эксперимент проводился на 6 типовых операциях контроля качества (табл. 2).

Таблица 2 – Характеристики контрольных операций

№	Тип операции	Параметры контроля	Точность, мм	Время, с	Сложность S_j
1	Визуальный контроль поверхности	Царапины, сколы, посторонние включения	0.1	15	1.8
2	Контроль геометрических размеров	Длина, ширина, высота, диаметр	0.02	30	3.2
3	Контроль усилия затяжки	Момент затяжки резьбовых соединений	0.5 Н·м	10	2.5
4	Контроль цвета и тона	Отклонение от эталона по L*a*b*	$\Delta E \leq 1$	20	2.8
5	Комплексный контроль	Геометрия + усилие + визуальный осмотр	0.02 + 0.5 Н·м	45	4.1
6	Контроль электрических параметров	Сопротивление, емкость, напряжение	0.5%	25	3.5

На основе метода анализа иерархий по формуле (2) определены весовые коэффициенты критериев сложности (табл. 3).

Таблица 3 – Весовые коэффициенты критериев сложности (после агрегации экспертных оценок)

Критерий	Значение весового коэффициента критерия w_k
Требуемая точность, C_1	0.32
Многообразие параметров, C_2	0.24
Интерпретация результатов, C_3	0.21
Сенсорные способности, C_4	0.13
Длительность операции, C_5	0.10

В исследовании участвовали 12 операторов контроля с различным стажем работы (от 1

до 15 лет). Для каждого оператора определены индивидуальные параметры модели функциональных возможностей (табл. 4).

Таблица 4 – Индивидуальные параметры операторов

Оператор	**Стаж, лет**	**Исходная оценка функциональных возможностей оператора $F_j^{on}(0)$**	**Интенсивность расхода когнитивного ресурса λ_j**	**Максимальный доступный когнитивный ресурс K_{max}**	**Коэффициент восстановления когнитивного ресурса ρ**
1	8	0.92	0.08	100	0.015
2	3	0.78	0.12	85	0.012
3	12	0.95	0.06	110	0.018
4	5	0.82	0.10	90	0.014
5	1	0.65	0.18	70	0.010
6	10	0.90	0.07	105	0.017
7	6	0.85	0.09	95	0.015
8	15	0.96	0.05	115	0.020
9	4	0.75	0.14	80	0.012
10	7	0.88	0.08	100	0.016
11	9	0.90	0.07	105	0.017
12	2	0.70	0.16	75	0.011

На основе разработанной модели выполнено распределение функций контроля между операторами и коботами. Фрагмент результатов для оператора 1 представлен в таблице 5.

Таблица 5 – Распределение функций контроля (фрагмент результатов для оператора 1)

Период	**Задачи человека**	**Задачи кобота**	**Коэффициент загрузки человека**	**Значение индекса когнитивной нагрузки, *CL(t)***
08:00-10:00	Операции 1, 3, 6	Операции 2, 4, 5	0.72	0.45
10:00-12:00	Операции 1, 2, 4	Операции 3, 5, 6	0.68	0.52
12:00-13:00	Операции 1, 5	Операции 2, 3, 4, 6	0.55	0.38
13:00-15:00	Операции 1, 3, 4	Операции 2, 5, 6	0.70	0.50
15:00-17:00	Операции 1, 2, 3, 4	Операции 5, 6	0.78	0.61

На рисунке 2 представлена динамика когнитивной нагрузки операторов в течение рабочего дня, вычисляемая по формуле (5).

Анализ динамики когнитивной нагрузки (рис. 2) позволяет выявить следующее:

1. При использовании традиционного подхода (без адаптивного распределения) в период с 10:00 до 11:00 и с 15:00 до 16:00 индекс когнитивной нагрузки оператора достигал значений в среднем $CL(t) \geq 0,85$, что, согласно разработанной классификации, соответствует критическому уровню и сопровождается ростом числа ошибочных решений. Внедрение предложенной модели позволило полностью исключить попадание в красную зону, обеспечив в среднем $CL(t) \leq 0,61$ в течение всей смены;
2. Динамическое перераспределение задач (табл. 5) позволило поддерживать коэффициент загрузки оператора в среднем в диапазоне 0,55-0,78, что соответствует «зеленой» и «желтой» зонам по шкале когнитивной нагрузки, за счет смещения высокоточных и монотонных операций (№2 – контроль геометрических размеров, №6 – электрические параметры) в периоды наиболее высокой утомляемости оператора (10:00-12:00 и 15:00-17:00) на кобота;
3. Если при базовом подходе к окончанию рабочего дня когнитивный ресурс оператора $K(t)$ истощался в среднем до 35-40% от максимального [12], что приводило к падению достоверности контроля, то при использовании модели остаточный ресурс

составил в среднем 62-68% ($CL \approx 0,52$). Это позволяет оператору качественно выполнять сложные комплексные операции (№5) даже в поздние часы работы.

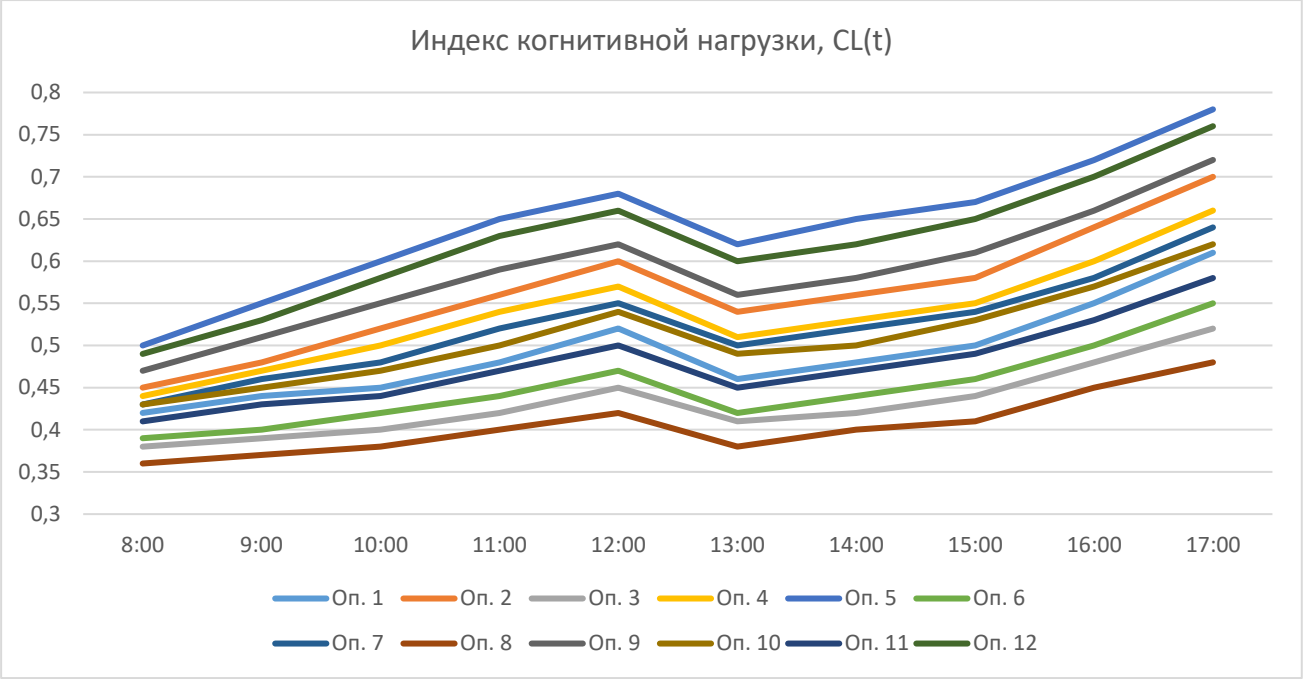


Рис. 2. Динамика когнитивной нагрузки оператора в течение смены при различных подходах к распределению функций

Для количественной оценки эффективности распределения рассчитаны значения стоимостных показателей C_j^{on} и $C_j^{коб}$ по формулам 6 и 7 соответственно с использованием следующих исходных данных: стоимость минуты оператора c_{on} = 15 руб./мин (с учетом накладных расходов), стоимость амортизации кобота $c_{коб}$ = 8 руб./мин, стоимость ошибки контроля принята равной 500 руб. (усредненная стоимость обнаружения дефекта на последующих этапах сборки).

Расчет показал (Таблица 6), что передача операций низкой и средней сложности коботу обеспечивает снижение приведенных затрат в среднем на 18-25% за счет меньшей стоимости амортизации оборудования по сравнению с оплатой труда оператора и более высокой вероятности правильного определения годности для стандартизированных измерений ($p_{коб}$ = 0,97-0,99 против p_{on} = 0,92-0,95 для однотипных операций).

Таблица 6 – Сравнительная оценка затрат на выполнение контрольных операций

№ операции	**Сложность контрольной операции S_j**	**Исполнитель (по модели)**	**Стоимость выполнения контрольной операции оператором C_j^{on}, руб.**	**Стоимость выполнения контрольной операции коботом $C_j^{коб}$, руб.**	**Экономия, %**
1	1,8	Кобот	4,5	3,2	28,9%
2	3,2	Кобот	12,8	9,6	25,0%
3	2,5	Совместно	5,2	4,9	5,8%
4	2,8	Совместно	8,1	7,8	3,7%
5	4,1	Оператор	17,4	22,5	-29,3%
6	3,5	Кобот	12	9,5	20,8%

Таким образом, рациональное распределение функций контроля качества позволяет не только снизить когнитивную нагрузку на оператора (социальный эффект в рамках концепции «Индустрия 5.0»), но и достичь экономического эффекта за счет улучшения использования дорогостоящего человеческого ресурса на операциях, требующих экспертной интерпретации.

Заключение

В результате проведенного исследования разработана формальная математическая модель распределения функций контроля качества между оператором и коллаборативным роботом в киберфизической системе приборостроительного производства. Основные научные и практические результаты работы:

1. Разработана модель оценки сложности контрольных операций на основе метода анализа иерархий, адаптированная для задач оценки контроля качества и позволяющая определить потенциальную возможность перераспределения операций между оператором и коллаборативным роботом;
2. Предложена математическая модель оценки функциональных возможностей оператора с учетом факторов утомляемости и когнитивной нагрузки; динамики когнитивного ресурса оператора, описывающая изменение функциональных возможностей оператора в течение рабочей смены с учетом сложности выполняемых операций и индивидуальных характеристик оператора;
3. Разработана модель распределения функций между оператором и коллаборативным роботом на основе целочисленного программирования, позволяющая оценить условия работы и перераспределять задачи при их изменении с учетом стоимости проводимых работ;
4. Экспериментально подтверждена эффективность разработанной модели на участке сборки электронных модулей: сохранение когнитивного ресурса оператора в среднем на уровне 62–68% к концу рабочей смены, что обеспечивает стабильное качество выполнения комплексных контрольных операций в поздние часы работы. Передача операций низкой и средней сложности коботу обеспечивает снижение приведенных затрат в среднем на 18–25% за счет меньшей стоимости амортизации оборудования по сравнению с оплатой труда оператора, а также более высокой вероятности правильного определения годности для стандартизированных измерений ($p_{коб}$ = 0,97-0,99 против $p_{оп}$ = 0,92-0,95 для однотипных операций).

Предложенная модель может быть использована при проектировании киберфизических систем управления качеством, организации рабочих мест с коллаборативными роботами, а также для повышения эффективности существующих производственных процессов контроля качества в рамках концепции «Индустрия 5.0» на предприятиях приборостроения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Довгаль В. А.* Анализ актуальности использования коллаборативных роботов для процесса производства компонентов возобновляемых источников энергии / В. А. Довгаль, Н. Ш. Козлова // Вестник Адыгейского государственного университета. Серия 4: Естественно-математические и технические науки. – 2023. – №2 (321). – С.68-73.
2. *Смещук Е. А.* Исследование возможности повышения эффективности производственных процессов в приборостроении за счет использования коллаборативных роботов / Е. А. Смещук, Я. А. Щеников // Инновационное приборостроение. – 2023. – Т. 2, № 2. – С. 11-19.
3. ГОСТ Р 71576-2024. Системы киберфизические. Общие положения. – М.: Российский институт стандартизации, 2024. – 8 с.



4. *Путилин М. С.* Влияние психологической усталости, связанное с выполнением задач по предназначению, у операторов бпла различных типов на систему распознавания движения глаз / М. С. Путилин // Журнал психолого-педагогических исследований. – 2024. – №3. – С.37-42.
5. *Ревуцкий Л. Д.* Экономические и социальные последствия недоиспользования производственных и коммерческих возможностей предприятия / Л. Д. Ревуцкий // Имущественные отношения в РФ. – 2008. – №5. – С.71-86.
6. *Рогов В. Ю.* Особенность производственной мощности предприятий с единичным типом производства / В. Ю. Рогов, Т. Б. Савченко // Байкальская наука: идеи, инновации, инвестиции: Сборник материалов всероссийской научно-практической конференции с международным участием. – Иркутск, 2021. – С. 141-148.
7. *Саати Т.* Принятие решений. Метод анализа иерархий / Т. Саати. – М.: Радио и связь, 1993. – 278 с.
8. *Ершова Н. М.* Принятие решений на основе метода анализа иерархий / Н. М. Ершова // Вісник ПДАБА. – 2015. – № 9 (210). – С. 39-46.
9. *Никул Е. С.* Алгоритм анализа матриц парных сравнений с помощью вычисления векторов приоритетов / Е. С. Никул // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2012. – № 2. – С.241-247.
10. *Абдрахманова А. Ш.* Влияние когнитивной нагрузки на показатели силы: рандомизированное контролируемое исследование / А. Ш. Абдрахманова, Ф. А. Мавлиев, А. С. Назаренко // Наука и спорт: современные тенденции. – 2023. – № 1. – С. 6-17.
11. *Wickens C. D.* Multiple resources and performance prediction / C.D. Wickens // Theoretical Issues in Ergonomics Science. – 2002. – № 3. – P.159-177.
12. *Givi Z. S.* Modelling worker reliability with learning and fatigue / Z. S. Givi, M. Y. Jaber, W. P. Neumann // Applied Mathematical Modelling. – 2015. – Volume 39, Issue 17. – P. 5186-5199.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Иванов Максим Викторович
к.т.н., старший преподаватель каф. 5 «Инноватики и интегрированных систем качества»
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения
Россия, 190000, Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, д.67, лит. А
E-mail: umka62@list.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Ivanov Maksim Viktorovich
Ph.D. of Engineering Sciences, senior lecturer of the department 5 «Innovation and integrated quality systems»
Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation
67, Bolshaya Morskaia str., Saint-Petersburg, 190000, Russia
E-mail: umka62@list.ru

Дата поступления: 10.09.2026
Дата принятия: 14.09.2026