



МОДЕЛЬ СИМБИОТИЧЕСКОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ОПЕРАТОРА СЛОЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ И РОБОТИЗИРОВАННЫХ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ КОМПЛЕКСОВ ПРИ МНОГОКАНАЛЬНОМ ДИСТАНЦИОННОМ УПРАВЛЕНИИ

М. В. Иванов

Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

Предложено формальное описание модели симбиотического взаимодействия человека-оператора сложной технической системы и роботизированного производственного комплекса, учитывающего многоканальное дистанционное управление. Определен вид модели и ее ограничения в рамках концепции цифрового производства «Индустря 5.0», предполагающая сотрудничество оператора и коллаборативного робота в среде киберфизической производственной системы.

Ключевые слова: симбиотическое взаимодействие, киберфизическая система, оператор, коллаборативный робот, формальная модель, сложная техническая система, производство, информационный канал, дистанционное управление, Индустря 5.0.

Для цитирования:

Иванов, М. В. Модель симбиотического взаимодействия оператора сложных технических систем и роботизированных производственных комплексов при многоканальном дистанционном управлении / М. В. Иванов // Системный анализ и логистика. – 2025. – № 5(48). – с. 56-63. DOI: 10.31799/2077-5687-2025-5-56-63.

THE SYMBIOTIC INTERACTION MODEL BETWEEN THE OPERATOR OF COMPLEX TECHNICAL SYSTEMS AND ROBOTIC PRODUCTION COMPLEXES UNDER MULTICHANNEL REMOTE CONTROL

M. V. Ivanov

St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

A formal description of the model of symbiotic interaction between a human operator of a complex technical system and a robotic production complex, taking into account multi-channel remote control, is proposed. The model type and its limitations are defined within the framework of the digital production concept “Industry 5.0”, which involves cooperation between an operator and a collaborative robot in the environment of a cyber-physical production system.

Keywords: symbiotic interaction, cyberphysical systems, operator, collaborative robot, formal model, complex technical system, production, information channel, remote control, Industry 5.0.

For citation:

Ivanov, M. V. The symbiotic interaction model between the operator of complex technical systems and robotic production complexes under multichannel remote control / M. V. Ivanov // System analysis and logistics. – 2025. – № 5(48). – p. 56-63. DOI: 10.31799/2077-5687-2025-5-56-63.

Введение

В связи с внедрением цифрового производства возникает проблема описания модели производственной системы и определения роли человека в ней. Целью Третьей промышленной революции, характеризующейся заменой аналоговых систем обработки информации, и концепции цифрового производства «Индустря 4.0», характеризующейся внедрением информационных сетей и технологий обработки распределенной информации, является создание полностью автоматизированного производства, в которой человек выполняет минимальную работу, заключающуюся в настройке, переналадке и контроле процессов производства [1]. В этих условиях модель производственной системы возможно представить как изменяющееся во времени физическое состояние производственной системы в зависимости от внешних и внутренних воздействий. В упрощенном виде элементарное воздействие на систему без влияния внешних и внутренних факторов выглядит следующим образом:



$$y(t) = y_0(t) + x(t), \quad (1)$$

где $y(t)$ – текущее состояние системы, $y_0(t)$ – предыдущее состояние системы, $x(t)$ – внешние и внутренние переменные системы, t – время.

В связи с эволюцией концепции «Индустрія 4.0» в «Индустрія 5.0» [2], описание производственной системы изменяется. При автоматизации человеческого труда изменение системы происходит преимущественно либо со стороны промышленных роботов, либо со стороны человека, но при гармоничном сочетании труда человека и кобота (коллаборативного робота) [3], согласно концепции «Индустрія 5.0», вытеснение того или иного элемента воздействия не происходит.

Разработка формальной модели многоканального симбиотического взаимодействия

Концепция «Индустрія 5.0» регламентирует главное положение человека в производственной системе, в которой кобот не только не вытесняет человеческий труд, но и усиливает его [4]. Поэтому, воздействие на систему со стороны совместного труда человека и кобота выглядит следующим образом:

$$y(t) = y_0(t) + x_q(t) + x_K(t), \quad (2)$$

где $x_q(t)$ и $x_K(t)$ – внешние или внутренние воздействия на систему без посторонних факторов со стороны человека и кобота соответственно.

В реальной системе присутствует фактор ошибки человека в процессе выполнения воздействия на систему (человеческий фактор) [5] или фактор ошибки кобота в процессе выполнения воздействия на систему (машинный фактор, например, неправильная интерпретация команды человека коботом), а также погрешность воздействий на систему. Следует отметить, что погрешность воздействия на систему возможно частично или полностью устранить доводкой производственной системы, а человеческий/машинный фактор либо трудно, либо практически невозможно устранить, так как он проявляется непосредственно в процессе выполнения воздействия на систему, значительно влияя на результат воздействия.

Концепция «Индустрія 5.0» предполагает, что оператор сложной технической системы взаимодействует с коботом в информационной среде, образуя киберфизическую производственную систему [6]. Вследствие этого описание модели взаимодействия между человеком и коботом переносится из физической среды в информационную, так как воздействие на физическую среду происходит через информационные сигналы и наоборот: текущее физическое состояние среды возможно получать информационным способом. При этом существует влияние случайностей, влияющих на общий процесс производства. Поскольку человек и кобот находятся в единой информационной среде, то влияние случайных факторов на них приобретает одинаковый характер:

$$y(t) = y_0(t) + ((\alpha x_q(t) \pm \varepsilon_q) + (\beta x_K(t) \pm \varepsilon_K)) h(t), \quad (3)$$

где α - фактор ошибки человека в процессе выполнения воздействия на систему (человеческий фактор), β - фактор ошибки кобота в процессе выполнения воздействия на систему (машинный фактор), ε_q - погрешность воздействия на систему со стороны человека, ε_K - погрешность воздействия на систему со стороны кобота, $h(t)$ – случайное влияние на



внешнее или внутреннее воздействие на систему.

Воздействие на систему возможно осуществлять по различным информационным каналам связи. Всего их известно 5: зрительный, акустический, тактильный, обонятельный и вкусовой. Известно, что через различные каналы передачи информации передается разное количество информации. Большая часть информации передается через зрительный канал [7]. Таким образом, у системы определяется чувствительность на воздействие через определенный канал:

$$y(t) = \begin{bmatrix} y_{0_{3p}}(t) \\ y_{0_{cl}}(t) \\ y_{0_{makm}}(t) \\ y_{0_{ob}}(t) \\ y_{0_{vk}}(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \gamma_{3p} \left((\alpha_{3p} x_{Q_{3p}}(t) \pm \varepsilon_{Q_{3p}}) + (\beta_{3p} x_{K_{3p}}(t) \pm \varepsilon_{K_{3p}}) \right) h_{3p}(t) \\ \gamma_{cl} \left((\alpha_{cl} x_{Q_{cl}}(t) \pm \varepsilon_{Q_{cl}}) + (\beta_{cl} x_{K_{cl}}(t) \pm \varepsilon_{K_{cl}}) \right) h_{cl}(t) \\ \gamma_{makm} \left((\alpha_{makm} x_{Q_{makm}}(t) \pm \varepsilon_{Q_{makm}}) + (\beta_{makm} x_{K_{makm}}(t) \pm \varepsilon_{K_{makm}}) \right) h_{makm}(t) \\ \gamma_{ob} \left((\alpha_{ob} x_{Q_{ob}}(t) \pm \varepsilon_{Q_{ob}}) + (\beta_{ob} x_{K_{ob}}(t) \pm \varepsilon_{K_{ob}}) \right) h_{ob}(t) \\ \gamma_{vk} \left((\alpha_{vk} x_{Q_{vk}}(t) \pm \varepsilon_{Q_{vk}}) + (\beta_{vk} x_{K_{vk}}(t) \pm \varepsilon_{K_{vk}}) \right) h_{vk}(t) \end{bmatrix}, \quad (4)$$

где γ - чувствительность информационного канала.

Таким образом, формальное описание модели симбиотического взаимодействия оператора сложной технической системы S и роботизированного производственного комплекса при многоканальном дистанционном управлении возможно представить в следующем виде:

$$y(t) = F_S(y_0(t), x(t), \alpha, \beta, \gamma, \varepsilon, h(t), t), \quad (5)$$

где $y(t)$ – текущее состояние системы S , F_S – функция рассматриваемой системы S , определяющая ее поведение и связь с последующим ее состоянием, $y_0(t)$ – предыдущее состояние системы S , $x(t)$ – внешние и внутренние переменные, характеризующие воздействие на систему S , α - фактор ошибки человека в процессе выполнения воздействия на систему S (человеческий фактор), β - фактор ошибки кобота в процессе выполнения воздействия на систему S (машинный фактор), γ - чувствительность информационного канала к внешнему или внутреннему воздействию на систему S , ε - погрешность внешнего или внутреннего воздействия на систему S , $h(t)$ – случайное влияние на внешнее или внутреннее воздействие на систему S , t – время.

Сравнение характеристик производственных процессов и их описание с применением формальной модели симбиотического взаимодействия

Проведена сравнительная характеристика видов производственных процессов на рабочем месте по степени механизации и автоматизации [8], результаты которой приведены в таблице 1.



Таблица 1 – Сравнительная характеристика видов труда по степени механизации и автоматизации

Критерий сравнения	Ручной труд	Механизированный труд	Полуавтоматизированный труд	Автоматизированный труд (Индустрися 4.0)	Симбиотический труд (Индустрися 5.0)
Скорость процесса, ед/час	5-10	20-30	50-70	80-95	90-100+
Точность выполнения, %	85-90	90-92	95-97	98-99	99,5-99,9
Время подготовки, ч	0,5-1	2-4	8-12	16-24	20-30
Время переналадки, мин	5-10	30-45	60-120	180-300	45-90
Время настройки, ч	0,1-0,5	1-2	3-5	6-10	4-8
Время обслуживания, часов/неделю	2-4	6-8	10-12	12-16	8-10
Количество параметров настройки	3-5	10-15	25-40	50-100	30-60
Коэффициент использования времени, %	60-70	70-75	75-80	85-90	90-95
Операторов на единицу оборудования	1	1-2	3-5	10-20	5-8
Коэффициент закрепления операций, Кз	1 – 2	2 - 5	5 - 10	10 - 20	1 – 3
Уровень механизации труда, %	0	1-50	51-90	91-100	91-100
Степень автоматизации технологического процесса, %	0	< 30	30-70	> 70	> 70
Коэффициент занятости человека физическим трудом	> 0,9	0,6 – 0,9	0,3 – 0,6	< 0,3	< 0,3
Коэффициент занятости человека интеллектуальным трудом	< 0,1	0,1 – 0,4	0,4 – 0,7	0,7 – 0,9	> 0,9
Время реакции рабочего места на возмущение, с	> 1	> 1	0,1 - 1	< 0,1	< 0,1

При организации симбиотического труда высокое значение скорости процесса достигается за счет распределения задач: кобот выполняет быстрые операции, а человек решает нестандартные задачи, предотвращая простой. При этом достигается эффект усиления человеческого труда [9], что подтверждается формулой (2).

Находясь в единой среде, каждый участник производственного процесса, способен контролировать процесс выполнения задач своего партнера, что позволяет компенсировать человеческий и машинный фактор и достигать высоких показателей точности выполнения.



Для сравнения - при полностью автоматизированном труде машинная ошибка может накапливаться систематически.

Сравнительно большое время подготовки, переналадки и настройки при симбиотической организации труда обусловлены не только технической настройкой, но и:

- обучением взаимодействию;
- настройкой многоканальных интерфейсов (см. формула (4));
- адаптацией модели сотрудничества.

Сложность управления симбиотическим рабочим местом компенсируется гибкостью организации производственного процесса с возможностью интуитивного человеческого вмешательства.

Достижение среднего значения времени обслуживания становится возможным благодаря распределенной модели производства.

При симбиотической организации труда количество параметров меньше, по сравнению с полностью автоматизированным рабочим местом, поскольку контроль параметров частично осуществляет каждый участник процесса производства. Параметры включают в себя как технические настройки, так и параметры взаимодействия, среди которых чувствительность каналов связи (формула (4)), пороги принятия решений баланс автономии/контроля и т.п.

В киберфизической среде высокое значение коэффициента использования времени достижимо рационального распределения задач: человек способен решать различные проблемы производства в реальном времени при круглосуточной работе оборудования, что позволяет минимизировать простой.

Симбиотический тип производства позволяет включить человека в автоматизированные процессы производства как участника, управляющего сложными ситуациями, способного решать нестандартные задачи и координировать действия коботов. Поскольку кобот выполняет большую часть рутинных и трудоемких задач, то у оператора большую часть рабочего времени способен выделять на интеллектуальные задачи. При такой организации труда становится возможным сократить количество операторов на единицу оборудования по сравнению с автоматизированным производством.

Внедрение коботов на рабочие места выполняет одновременно две роли: механизации и автоматизации производственных процессов, поскольку кобот выполняет роль инструмента для оператора и на основе его применения автоматизируются различные рутинные задачи без участия человека.

Нахождение в единой киберфизической среде и взаимный контроль ее участников позволяют осуществлять оперативный отклик рабочего места на возмущения внутренней и внешней производственной среды (процесс может быть описан формулой (3)). Машинными средствами реализуется контроль состояния киберфизической среды в реальном режиме времени, а человек одновременно способен предсказывать ее поведение.

Результаты анализа характеристик видов труда по степени механизации и автоматизации представлены на рисунке 1. Для временных показателей и количества операторов значения характеристик инвертированы для удобства представления в виде диаграммы. Сравнение характеристик позволяет сделать вывод о превосходстве концепции «Индустря 5.0» над «Индустря 4.0» в возможности организации производственного процесса как в полностью автоматизированном режиме для массового производства, так и с участием человека для создания гибких научоемких производств [10] в соответствии с изменяющимися требованиями заказчика (рис. 2).

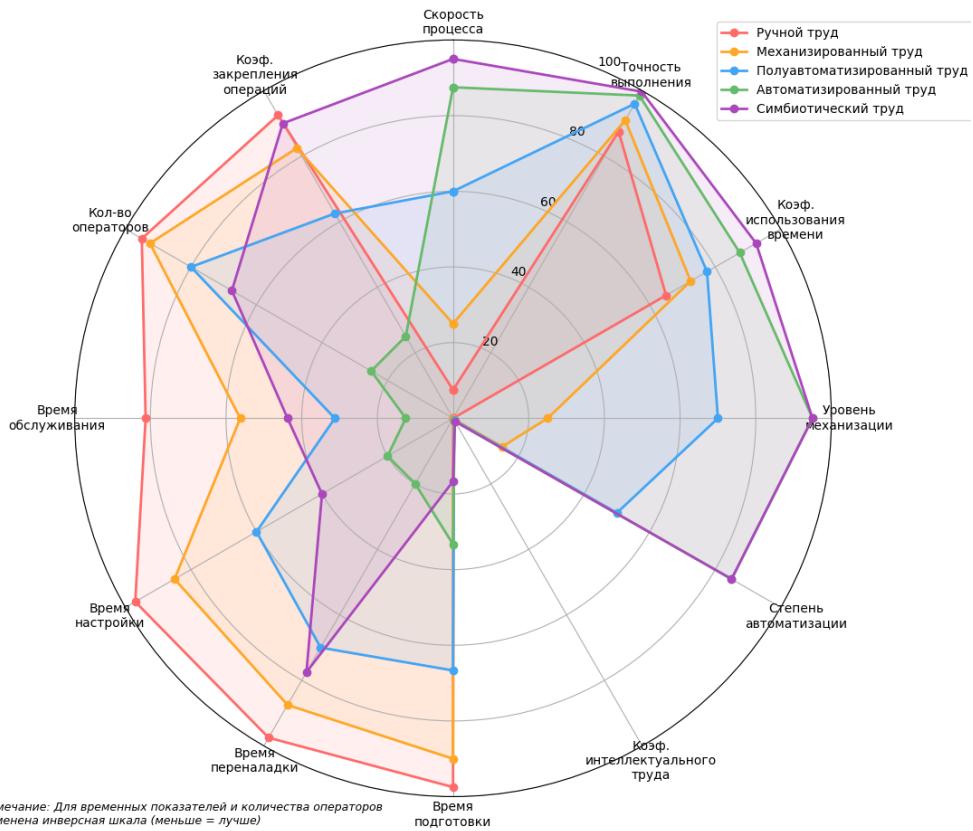


Рис. 1. Результаты анализа характеристик видов труда по степени механизации и автоматизации

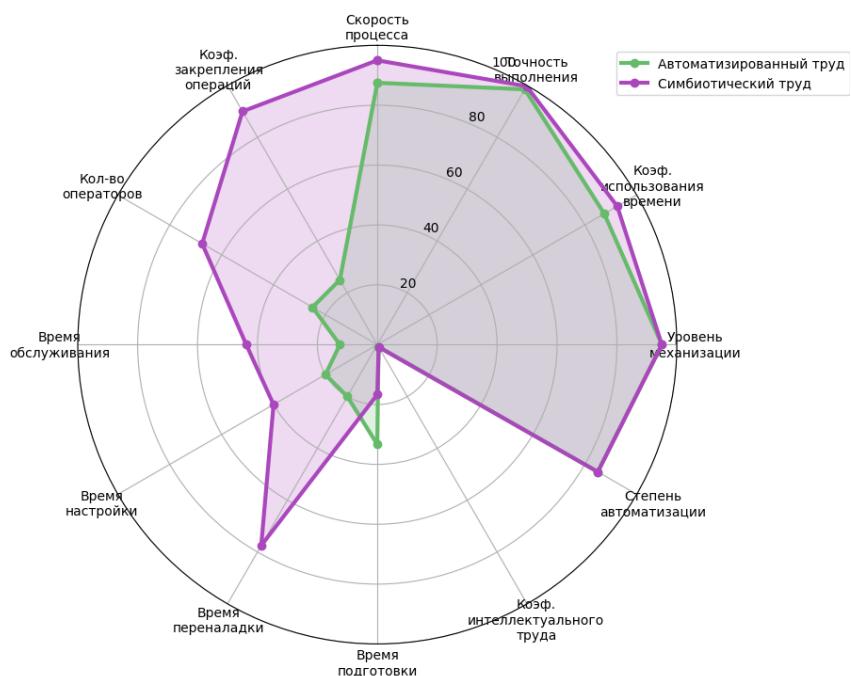


Рис. 2. Сравнение характеристик видов организации труда в соответствии с концепциями цифрового производства «Индустря 4.0» и «Индустря 5.0»

Заключение

- Рассмотрена киберфизическая среда взаимодействия оператора сложной технической системы и роботизированного производственного комплекса;



- Определены контекст и ограничения при описании процессов изменения информационного состояния киберфизической системы в рамках концепции «Индустрія 5.0»;
- Предложена формальная модель симбиотического взаимодействия оператора сложных технических систем и роботизированных производственных комплексов при многоканальном дистанционном управлении.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Степаненко А. А. Переход от Индустріи 4.0 к 5.0: тенденции и перспективы / А.А. Степаненко, И.К. Федорова, В.Ю. Земзюлина // Российские регионы в фокусе перемен: сб. докладов XVIII Международной конференции. – Екатеринбург, 2023. – С. 178-183.
2. Бабкин А. В. Управление кросс-отраслевым потенциалом развития в условиях Индустріи 5.0: теория, инструментарий и практические приложения / А.В. Бабкин, Е.В. Шкарупета, В.А. Плотников // Экономическое возрождение России. – 2022. – №2 (72). – С. 50-65.
3. Щеников Я. А. Модели коллаборации человека и робота в радиоэлектронном приборостроении / Я. А. Щеников, Е. А. Смешук // Математические методы и модели в высокотехнологичном производстве: тезисы докладов I Международного форума. – Санкт-Петербург, 2021. – С. 278-280.
4. Шестаков Р. Б. От Индустріи 4.0 к Индустріи 5.0: формирование, развитие, проблемы и перспективы / Р. Б. Шестаков, А. И. Филиппова-Глебова, Н. А. Яковлев // Вестник техносферной безопасности и сельского развития. – 2024. – №3(38). – С. 15-18.
5. Данилко В. Человеческий фактор как причина возникновения брака на производстве / В. Данилко // Современные технологии в науке и образовании - СТНО-2017: сб. трудов II Международной научно-технической и научно-методической конференции: в 8 т. – Т. 7. – Рязань, 2017. – С. 85-88.
6. ГОСТ Р 71576-2024. Системы киберфизические. Общие положения. – Москва: Российский институт стандартизации, 2024. – 8 с.
7. Долженкова В. И. Теоретические основы визуального обучения / В. И. Долженкова // Проблемы педагогики. – 2015. – № 4(5). – С. 17-23.
8. ГОСТ 23004-78. Механизация и автоматизация технологических процессов в машиностроении и приборостроении. Основные термины, определения и обозначения. – Москва: Изд-во стандартов, 1978. – 29 с.
9. Винниченко А. В. Исследование эргатической системы в производственной среде / А. В. Винниченко, Я.-Ю. А. Винниченко // Инновационное приборостроение. – 2025. – Т. 4. – № 4. – С. 5-11.
10. Смешук Е. А. Исследование возможности повышения эффективности производственных процессов в приборостроении за счет использования коллаборативных роботов / Е. А. Смешук, Я. А. Щеников // Инновационное приборостроение. – 2023. – Т. 2, № 2. – С. 11-19.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Иванов Максим Викторович

Канд. техн. наук, ассистент кафедры 5

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

PhD. tech. Sciences, assistant of department 5

Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

67, Bolshaya Morskaia str., Saint-Petersburg, 190000, Russia

E-mail: umka62@list.ru

Дата поступления: 21.11.2025

Дата принятия: 26.11.2025