

DOI: 10.17323/2587-814X.2026.1.41.53

# Управление эффективностью предприятий на основе технологии цифровых двойников в индустрии пятого поколения

Юрий Филиппович Тельнов<sup>a</sup> 

E-mail: Telnov.YUF@rea.ru

Татьяна Константиновна Кравченко<sup>b</sup> 

E-mail: tkravchenko@hse.ru

<sup>a</sup> Российский экономический университет им. Г. В. Плеханова, Москва, Россия

<sup>b</sup> Высшая школа бизнеса, Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», Москва, Россия

## Аннотация

В условиях возрастающей потребности в повышении эффективности управления предприятиями, поддерживающими реализацию принципов цифровой трансформации на основе концепции индустрии пятого поколения, возрастает актуальность выполнения исследований по разработке соответствующих систем в части обеспечения непрерывного целенаправленного и устойчивого развития, клиентоцентричности и социальной направленности производства. В качестве эффективных средств построения систем управления эффективностью предприятий выступает технология цифровых двойников и ее многоагентная реализация. Вместе с тем, недостаточность научных исследований в этой области обуславливает цель статьи, заключающейся в развитии продуктивно-ресурсного подхода к управлению эффективностью предприятия на основе цифровых двойников в индустрии пятого поколения. Отличительной особенностью подхода, предлагаемого авторами, является использование динамической технологии управления эффективностью предприятий на основе цифровых двойников, которая обеспечивает интеграцию бизнес-процессов и используемых ресурсов на уровне не только одного предприятия, но и на уровне сетевых цепочек создания стоимости на базе общей цифровой платформы бизнес-экосистемы. В работе проведен анализ подходов к интеллектуализации управления предприятиями, на основе которого сформулированы требования к системе управления эффективностью предприятий, обеспечивающей решение взаимосвязанных задач

целенаправленного развития предприятий, формирования гибких цепочек создания стоимости, рационального и устойчивого использования ресурсов предприятия. Проанализированы возможности и недостатки процесса управления эффективностью в системах класса ЕРМ. Обосновано применение технологии цифровых двойников и ее многоагентной реализации для построения системы управления эффективностью предприятий в условиях массовой кастомизации и сетевого характера цепочек создания стоимости в индустрии пятого поколения. Разработан процесс управления эффективностью предприятий на всех стадиях жизненного цикла на основе технологии цифровых двойников продуктов и ресурсов, динамически обеспечивающий целенаправленность, адаптивность и устойчивость функционирования и развития предприятия.

**Ключевые слова:** индустрия пятого поколения, целенаправленность, адаптивность, устойчивость, управление эффективностью предприятия, цифровой двойник продукта, цифровой двойник ресурса

**Цитирование:** Тельнов Ю. Ф., Кравченко Т. К. Управление эффективностью предприятий на основе технологии цифровых двойников в индустрии пятого поколения // Бизнес-информатика. 2026. Т. 20. № 1. С. 41–53. <https://doi.org/10.17323/2587-814X.2026.1.41.53>

### Введение

Основным целям цифровой трансформации предприятий относят рост производительности труда, повышение качества выпускаемой продукции и оказываемых услуг, массовую кастомизацию производства, гибкость и адаптивность производственных и бизнес-процессов за счет широкого применения технологий применения цифровых платформ и цифровых двойников [1–3]. Полная автоматизация производства очень часто ведет к отрицательным социальным последствиям: росту безработицы, снижению творческого начала в труде, нарушениям защищенности производственных систем от непреднамеренных и злонамеренных действий, перепроизводству продукции с нарушениями экологии, избыточным потреблением дорогостоящих ресурсов: материальных, энергетических, финансовых, что в общем плане ведет к неустойчивому развитию экономики.

В процессе цифровой трансформации на основе принципов индустрии 4-го поколения получают развитие новые формы организации корпоративных связей предприятий в рамках создания бизнес-экосистем, формирования на основе интегрированных программно-технических платформ

цифровых и сетевых предприятий [4–6]. Базой для создания таких предприятий являются новые цифровые технологии такие, как промышленный интернет, облачные технологии, обработка больших объемов данных, машинное обучение, многоагентные системы, генеративный искусственный интеллект и др. Концепция индустрии четвертого поколения позволяет строить гибкие цифровые и сетевые предприятия, динамически обучающиеся при построении цепочек создания стоимости на больших объемах данных для удовлетворения конкретных запросов потребителей.

В части работ, отражающих возможности построения многоагентных систем, позволяющих оптимизировать использование ресурсов в динамических бизнес-процессах на основе имитационного моделирования, следует отметить [7–9], в которых представлены эффективные методы динамической поддержки принятия оперативных управленческих решений. В [10] предлагается подход к формированию различных сценариев стратегического развития социально-экономических систем с использованием эволюционного оптимизационного алгоритма на основе имитационного моделирования. Вместе с тем, оперативный и стратегический

контуры управления в указанных работах рассматриваются раздельно.

В современных условиях развития цифровых предприятий требуется более оперативное обновление стратегии на основе необходимости непрерывного изменения бизнес-процессов и обратного динамического влияния изменения стратегии на оперативные бизнес-процессы. Кроме того, требования массовой кастомизации, когда потребитель интерактивно участвует в разработке и настройке продуктов для своих собственных нужд [11], усложняют решение задач согласования целей между участниками совместной экономической деятельности. Возникающие проблемы цифровой трансформации предприятий на принципах индустрии 4-го поколения обуславливают необходимость дальнейшей интеллектуализации процессов управления предприятиями, обеспечивающих их целенаправленное, адаптивное и устойчивое развитие.

Перечисленные выше принципы развития предприятий в последние годы отражаются в концепции индустрии 5-го поколения [12, 13], в которой производство становится человеко-центричным не только с точки зрения потребителей продукции и услуг, но также и с точки зрения самих производителей, то есть работников предприятий, для которых повышается их роль в принятии решений на различных уровнях управления даже в роботизированном производстве. Вместе с тем производство требует обеспечения большей безопасности и устойчивости с точки зрения потребления необходимых ресурсов. Предприятия индустрии 5-го поколения приобретают самоорганизующую форму функционирования в соответствии с обновляемыми на динамической основе целями, которые определяются не только потребностями в изменениях рыночной ситуации, но также устанавливаются с учетом социальных потребностей общества в самом широком контексте.

Параллельно с концепцией индустрии четвертого и пятого поколения в мире развивается концепция создания смарт предприятий (умных или интеллектуальных предприятий) [14–16]. В концепции смарт предприятий основными принципами являются достижение устойчивого развития, повышающее доверие между участниками предприятия, проведение исследований инвестиций путем моделирования поведения рынка, переосмысление стратегии и бизнес-моделей, гибкое планирование бюджета, непрерывный монито-

ринг бизнес-процессов, получение обратной связи на всех уровнях управления путем измерения бизнес-результатов, углубленное понимание процессов и взаимозависимости между ними. В данной концепции в полной мере реализуется подход к созданию самообучающихся интеллектуальных предприятий на новой технологической основе.

В работе [17] развиваются принципы интеллектуального, самоконфигурируемого производства, которые отражают идею непрерывного цикла целеполагания, конфигурации и реконфигурации цепочек создания стоимости, мониторинга и контроллинга исполнения бизнес-процессов с целью обеспечения устойчивого развития на основе применения технологий нейросетевого моделирования, обработки больших объемов данных, многоагентных систем. Такая постановка проблемы очень близка к сложившемуся подходу к непрерывному инжинирингу и цифровой трансформации предприятий, изложенному в [18]. При этом под устойчивостью предприятия будем понимать предприятие, способное «... найти оптимальное соотношение между всеми ее элементами, установить связи между ними, которые позволяют максимально долго поддерживать жизненно важные параметры на заданном уровне, эффективно противодействуя возмущающему воздействию внешней среды» [19]. С точки зрения устойчивости важно обеспечить сбалансированность всех ресурсов для достижения целевых показателей эффективности и результативности, а также их соответствие необходимым нормам использования с позиции удовлетворения потребностей внешней среды.

Для реализации принципов интеллектуализации производственных и бизнес-процессов в индустрии пятого поколения в статье рассматривается построение системы управления эффективностью предприятий, которая обеспечивала бы решение следующих взаимосвязанных задач:

- ◆ целенаправленное развитие предприятий, направленное на гибкое и динамическое формирование целей и планов в соответствии с оперативно изменяющейся окружающей средой и социальными потребностями;
- ◆ формирование гибких цепочек создания стоимости, обеспечивающих динамичную реализацию рыночных потребностей в соответствии со стратегическими и оперативными целями предприятия;

- ◆ устойчивое и сбалансированное использование ресурсов предприятия в производственных и бизнес-процессах, направленное на безопасное, экологичное и социально-оправданное применение.

Построение такой системы управления эффективностью в статье предлагается осуществить на основе развития продуктивно-ресурсного подхода к организации цифровых двойников с использованием многоагентной технологии, позволяющей динамически осуществлять мониторинг стратегических целей посредством измерения показателей эффективности процессов, накапливать большие объемы данных и проводить своевременную актуализацию стратегии. Реализация предлагаемого подхода потребует создания нового поколения цифровых платформ на основе принципов индустрии пятого поколения.

### 1. Анализ традиционного подхода к управлению эффективностью предприятия в системе ЕРМ

В современных условиях основными целями развития предприятий являются проведение непрерывных инноваций, обеспечение устойчивости развития, экологичности производства, гибкости, экономичности, повышения качества, скорости и адаптивности производственных и бизнес-процессов, которые определяют вектор развития целенаправленных компаний. При этом целенаправленность компаний реализуется на стратегическом и операционном уровнях.

- ◆ На стратегическом уровне рассматриваются цели бизнеса по всем направлениям деятельности и особенно выделяются перспективные, возможно новые виды деятельности, с учетом происходящих изменений во внешней среде и состояния компетенций и потенциала компании на текущий момент времени.
- ◆ На операционном (продуктовом) уровне для отдельных видов деятельности, на котором определяются возможности организации производственных и бизнес-процессов с учетом реализации интересов всех заинтересованных сторон: потребителей, инвесторов, менеджмента, персонала, внешних организаций.

На стратегическом уровне цели бизнеса обычно организуются в виде различных типов систем

сбалансированных показателей (BSC) или стратегических карт [20]. Классически цели видов основной деятельности отражаются на третьем уровне (уровень внутренних бизнес-процессов). Виды деятельности в современных условиях клиентоцентричности и динамичности реализации трактуются как сервисы организации, предоставляемые различным категориям потребителей [21]. С другой стороны, декларация возможностей реализации сервисов отражаются в концепциях компетенций и способностей организаций [22].

Для измерения достижимости целей используется инструментарий ключевых индикаторов (показателей) эффективности (KPI). Для выбора набора целей и KPI в соответствии с выбранной стратегией обычно используются библиотеки (репозитории), содержащие описания и шаблоны вычисления показателей [23]. В последующем данные показатели отражаются в специализированных информационно-аналитических системах, оснащенных инструментарием анализа эффективности бизнес-процессов (Enterprise Performance Management, ЕРМ) [24–26] и извлечения знаний из собираемых данных в мониторинге процессов (Process Mining) [27].

Для целенаправленности развития предприятий очень важно обеспечить взаимодействие целей организации на стратегическом уровне и ключевых индикаторов эффективности на операционном уровне. Процесс соотнесения целей с операциями, обеспечивающими их выполнение, называется операционализацией целей [21]. Чтобы перейти от стратегических целей к операционным целям обычно используют диаграммы окружения целей [28]. Такое взаимодействие осуществляется в результате последовательной детализации стратегических целей в виде наборов мероприятий для их достижения. Для мероприятий в свою очередь определяются исполняющие их бизнес-процессы и ключевые индикаторы эффективности, которые измеряют результаты выполнения процессов. Пример диаграммы окружения цели представлен на *рисунке 1*. В системах управления эффективностью предприятий [25] осуществляется мониторинг ключевых индикаторов эффективности, на основе которого проводится анализ достижения целей и возможное последующее изменение как нормативных значений KPI, так и изменение самих целей на уровне BSC.



Рис. 1. Диаграмма окружения цели.

Процесс управления эффективностью бизнеса в системе ЕРМ представлен на рисунке 2.

Рассмотрим процесс управления эффективностью бизнеса в системе ЕРМ более подробно. На основе стратегии предприятия и внешних источников информации о конкурентной среде строится сбалансированная система показателей и диаграммы окружения целей.

Разработка бизнес-процессов на основе BSC и диаграмм окружения целей, как правило, осуществляется в нотации BPMN и реализуется с помощью Low-Code инструментальных средств. В системе ЕРМ выполняется привязка программных модулей, выполняющих сбор данных об исполнении ключевых индикаторов эффективности, к программным компонентам, реализующим операции бизнес-процесса, и устанавливаются плановые показатели эффективности выполнения процессов (KPI).

При выполнении операций бизнес-процесса осуществляется сбор метрик эффективности (KPI), которые помещаются в базу данных мониторинга исполнения бизнес-процессов.

В результате сбора информации оперативно выполняется аналитика эффективности исполнения операций специальным модулем ЕРМ, реализующим методы извлечения знаний из процессов (Process Mining). При этом проводится анализ как отдельных показателей, так и их интеграция путем свертки и последующая оценка.

На основе полученных данных проводится анализ как текущей ситуации, так и делается прогноз с помощью методов машинного обучения для необходимых изменений тактических плановых показателей на уровне бизнес-процессов и стратегических целей на уровне всего предприятия.

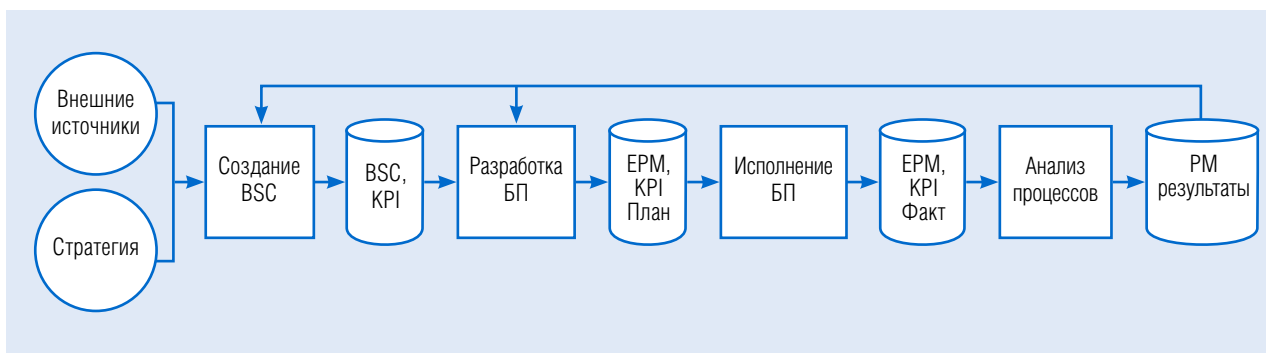


Рис. 2. Процесс управления эффективностью предприятия в системе ЕРМ.

Описанный процесс управления эффективностью предприятия в системе ЕРМ успешно применяется в традиционном бизнесе, для которого характерна относительная регулярность операционных процессов, и главным является мониторинг ключевых показателей эффективности, регулирующих достижение целей, а формирование стратегических целей осуществляется скорее для новых бизнес-процессов, которые в дальнейшем реализуются на регулярной основе. Структура же самих бизнес-процессов и их участников является относительно стабильной.

Для индустрии четвертого поколения и ее развития в пятом поколении характерным является большая изменчивость бизнес и производственных процессов в рамках массовой кастомизации продукции и оказываемых услуг, которые осуществляются в бизнес-экосистемах на основе цифровых платформ. В работах [18, 32] были разработаны принципы и модели создания сетевых предприятий под изменчивые бизнес-цели, обеспечивающие динамическую конфигурацию бизнес и производственных процессов на основе технологии цифровых двойников и реализующих их административных оболочек активов. Для таких предприятий требуется совершенствование методов управления эффективностью предприятий с учетом реализации требований динамического обеспечения целенаправленности, адаптивности и устойчивости функционирования предприятия.

## **2. Управление эффективностью предприятий на основе технологии цифровых двойников**

В современном массово-кастомизированном производстве для каждого продукта или проекта, связанного с продуктом, может строиться оригинальная конфигурация процесса, в котором в каждый момент времени участвуют различные исполнители, выбираемые на цифровой платформе. Принятие решений о развитии продуктовых линеек, переходе к производству новых продуктов и модернизации существующих, индивидуализации настройки продуктов на потребности конкретных заказчиков обуславливают необходимость управления на операционном уровне не только процессами, но и продуктами. Динамическое управление продуктами предполагает и динамическую конфигурацию бизнес-процессов под изменяющиеся биз-

нес-цели, требующую подбора наилучших ресурсов при определенных ограничениях на их использование и соблюдение требований устойчивости, причем в сетевой среде на единой цифровой платформе бизнес-экосистемы.

Специфика индустрии пятого поколения вызывает необходимость ускорения продуктовых инноваций (обновляемость номенклатуры, технологий, массовая кастомизация), с одной стороны, и обеспечения устойчивости использования всех ресурсов в процессах, с другой стороны. С этой точки зрения, цели процессного уровня должны отражать цели клиентоориентированности, гибкости и адаптивности бизнес и производственных процессов, а на последнем уровне стратегической карты, связанном с использованием ресурсов и технологий, должны отражаться цели устойчивости. В этой связи возрастает значение развития продуктово-ресурсного подхода к повышению эффективности управления предприятиями в условиях цифровой экономики.

В продуктово-ресурсном подходе очень важна инновационная стадия разработки качества продукта, на которой формируется набор функциональных и нефункциональных требований к продукту, являющийся основанием для проектирования продукции и услуг и спецификации последующих соглашений об уровне обслуживания (Service Level Agreement, SLA) с будущими партнерами по бизнесу. Эти требования конкретизируют ключевые индикаторы эффективности процессов относительно конкретных параметров производимых продуктов и используемых ресурсов. Формирование требований базируется на анализе внешнего рынка продукции и технологий и реализуется с помощью метода развертывания качества QFD и метода анализа видов, последствий и причин потенциальных несоответствий FMEA [29–31].

Анализ реализации требований к производству продуктов и использованию ресурсов с позиции достижений операционных целей в индустрии четвертого и пятого поколений непосредственно в традиционной системе класса ЕРМ практически невозможно реализовать в силу большого числа качественных и количественных характеристик и их динамических изменений от одного типа продукта к другому. В этой связи целесообразно разработать динамическую технологию управления эффективностью предприятий на основе цифровых двойников.

Цифровые двойники в соответствии с архитектурным фреймворком RAMI [2] являются информационными моделями, отражающими в каждый момент времени состояние как производимых продуктов, так и используемых ресурсов (оборудования, производственных линий, целых предприятий). Причем, формирование и использование информации о продукте по стадиям его жизненного цикла осуществляется в процессе взаимодействия цифрового двойника продукта с цифровыми двойниками ресурсов на основе многоагентной технологии [18]. Для цифрового двойника в форме интеллектуального агента предлагается типовой набор компонентов, который позволяет автоматизировать обработку различных ситуаций в процессе принятия решений о реагировании на события как во внешнем мире, так и при согласовании взаимодействия с другими агентами (рис. 3).

Рассмотрим основные компоненты интеллектуального агента, реализующие функции обработки ситуации:

- ◆ Наблюдатель – собирает данные о поведении реальных объектов, отображаемых в цифровом двойнике, интерпретирует полученные данные и вводит их в различные подмодели цифрового двойника.
- ◆ Анализатор – выявляет возможные отклонения от нормативных значений ключевых индикаторов эффективности KPI и соглашений об уровне обслуживания SLA.
- ◆ Решатель – принимает решения о необходимости изменения состояний реальных объектов и

инициирует взаимодействие (переговоры) с другими интеллектуальными агентами, принимает решения по результатам переговоров.

- ◆ Организатор – осуществляет информационный обмен с другими интеллектуальными агентами, посылая запросы и получая ответы.
- ◆ Документатор – фиксирует принимаемые решения и обновляет ключевые индикаторы эффективности и показатели SLA.

В соответствии с представленной архитектурой интеллектуального агента, реализующего функции цифрового двойника, принципиальная схема процесса управления эффективностью предприятия (производства продукта) реализуется в виде технологической схемы, показанной на рисунке 4. Рассмотрим эту схему более подробно.

Процесс разработки концепции нового продукта в виде набора требований должен соответствовать целевым установкам, которые заложены в стратегии предприятия, отраженной в сбалансированной системе показателей. При этом создается цифровой двойник продукта (ЦДП), в который переносятся ключевые индикаторы эффективности из диаграмм окружения целей BSC, например, точность соответствия заказа первоначально сформулированным требованиям, степень соответствия ресурсов заказу, скорость исполнения заказов и т.д. Из ЦДП с использованием онтологии предметной области запускаются сервисы анализа рынка аналогичных продуктов, материалов, технологий, конкурентов и поставщиков и отбора перспективных потребительских характеристик будущего продукта. В результате формируются функциональные и

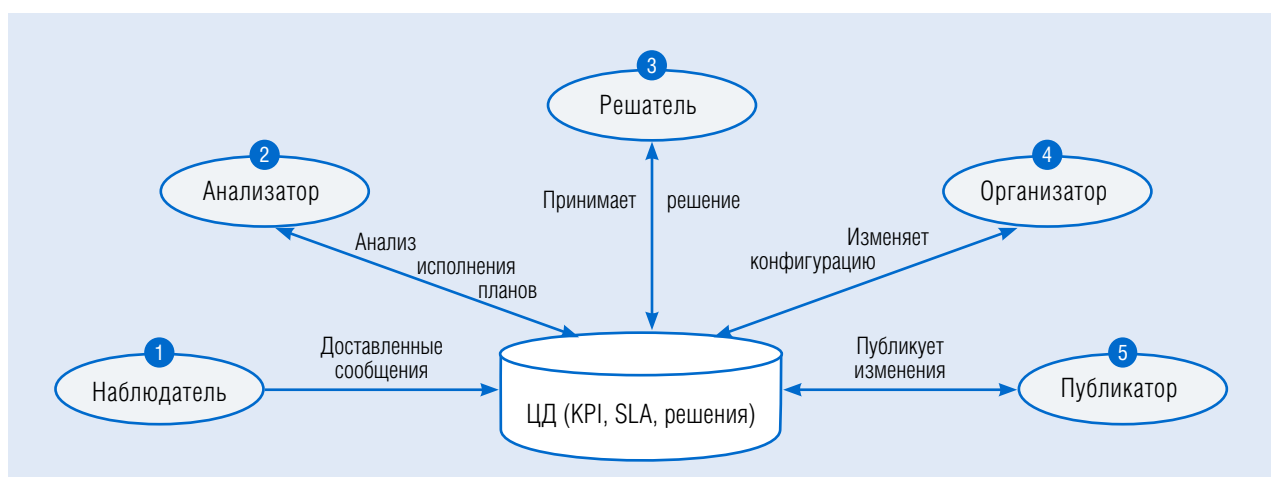


Рис 3. Архитектура интеллектуального агента (построено на основе [17]).

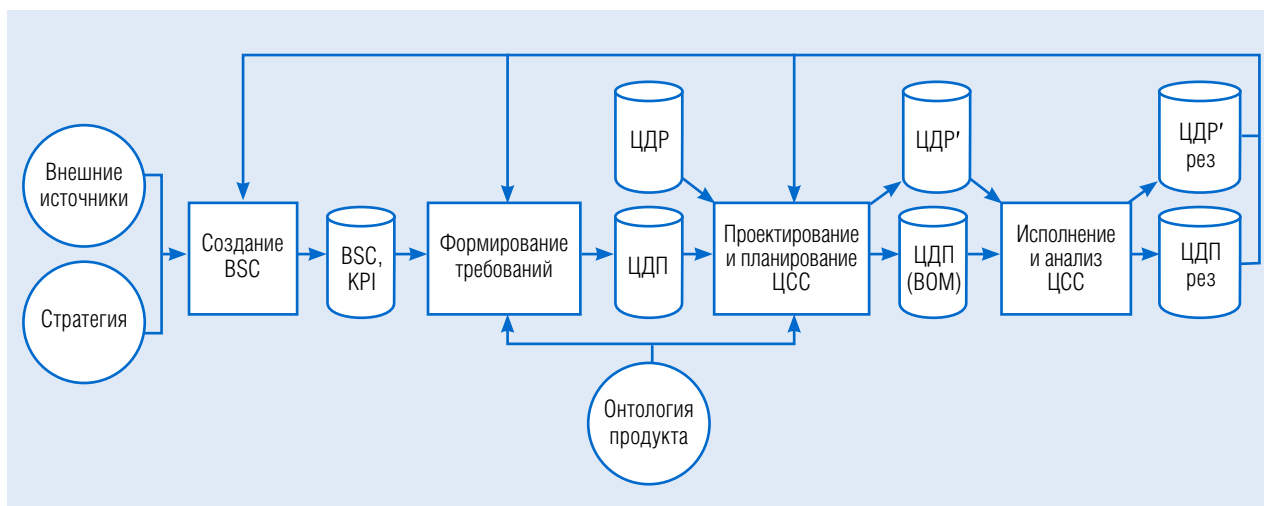


Рис. 4. Процесс управления эффективностью производства продукта на основе технологии цифровых двойников.

нефункциональные требования, которые заносятся в соответствующую подмодель цифрового двойника продукта.

В процессе проектирования изделия из цифрового двойника продукта запускается сервис формирования конструкции изделия и цепочки создания стоимости (ЦСС) с отбором для ее реализации конкретных партнеров по бизнесу. В результате проектирования в цифровом двойнике продукта в подсистеме конструкции изделия отображаются описание его структуры (Bill of Materials, BOM) и структуры технологического процесса.

В процессе проектирования участвуют цифровые двойники ресурсов (ЦДР), в которых отражаются профили способностей по выполнению различных операций. Цифровые двойники ресурсов создаются как на уровне предприятий, входящих в общую бизнес-экосистему на единой цифровой платформе, так и на уровне конкретного оборудования, реализующего операции. В результате отбора и согласования ресурсов в процессе проектирования в цифровых двойниках ресурсов фиксируется участие в конкретной цепочке создания стоимости для последующей реализации инновационного проекта. Далее при планировании формируются количественные и качественные характеристики плана производства продукта, который конкретизируется в виде соглашений об уровне обслуживания с предприятиями субподрядчиками и заносится как в цифровой двойник продукта, так и в цифровые двойники ресурсов.

Производственный процесс запускается из цифрового двойника продукта по плану, содержащемуся в этом двойнике, и разворачивается в соответствии с спроектированной цепочкой создания стоимости в последовательность операций. В процессе производства (исполнения цепочек создания стоимости) осуществляется накопление статистики в цифровых двойниках продуктов и ресурсов о ходе выполнения работ, которая, как было отмечено в предыдущем разделе, используется как для оперативного реагирования на изменения, так и для анализа целей в краткосрочном и долгосрочном масштабе времени.

Анализ эффективности использования отдельных ресурсов осуществляется путем запуска аналитических и прогнозных сервисов в цифровых двойниках ресурсов, а анализ эффективности сквозных процессов путем запуска соответствующих сервисов из цифровых двойников продуктов. В результате анализа может произойти пересмотр параметров требований и ключевых индикаторов эффективности, связанных с выпуском продукции и оказанием услуг, а также возможное изменение и стратегических целей предприятия.

В процессе выполнения основных процессов могут запускаться мониторинговые операции анализа не только их операционной эффективности, но также и анализа сопутствующих обеспечивающих процессов: расход электроэнергии, материалов, выполнения мероприятий по защите окружающей среды, защите информации и т.д. Для этого

в цифровых двойниках ресурсов необходимо задать подмодель нормативных атрибутов использования ресурсов с точки зрения соблюдения условий устойчивости функционирования. Анализ операционной эффективности использования ресурсов дает основание для прогнозирования устойчивости как основных, так и обеспечивающих бизнес и производственных процессов.

По сравнению с подходом к управлению эффективностью бизнес-процессов в системе ЕРМ, данный подход на основе цифровых двойников обладает целым рядом преимуществ:

1. Обеспечение анализа эффективности предприятий с помощью цифровых двойников как системы в целом, так и для отдельных продуктов и ресурсов.
2. Повышение оперативности и адаптивности цепочек создания стоимости под изменяющиеся рыночные цели.
3. Обеспечение интегрированности бизнес-процессов и используемых ресурсов на уровне не только одного предприятия, но и на уровне сетевых цепочек создания стоимости, формируемых на основе общей цифровой платформы бизнес-экосистемы.
4. Обеспечение анализа и управления устойчивостью использования ресурсов в различных производственных и бизнес-процессах.

### Заключение

Цифровая трансформация предприятий на основе концепции индустрии пятого поколения предполагает массовую кастомизацию производства, повышение творческой роли работников, социальную направленность экономической деятельности предприятий и обуславливает необходимость при-

менения технологий искусственного интеллекта в оптимизации бизнес-процессов и использования в них ресурсов. В результате проведенного исследования можно сделать вывод, что для решения проблемы повышения эффективности управления предприятиями необходимо создание системы на основе технологии цифровых двойников, которая должна обеспечивать непрерывное целенаправленное и устойчивое развития, клиентоцентричность и социальную направленность производства.

Анализ традиционных систем управления эффективностью предприятий показал ограниченность их применения для динамических условий функционирования предприятий, обуславливающих потребность своевременных изменений стратегических и оперативных целей предприятий в соответствии с изменяющимися продуктовыми потребностями с учетом требований устойчивости использования ресурсов.

Разработанный в работе процесс управления эффективностью предприятий на основе применения технологии цифровых двойников продуктов и ресурсов на всех стадиях жизненного цикла позволяет оперативно отражать состояние всех связанных процессов, проводить мониторинг исполнения требований и ключевых индикаторов эффективности, прогнозировать развитие ситуаций с использованием методов и средств машинного обучения и формулировать предложения по коррекции целей на оперативном и стратегическом уровнях.

Применение разработанной динамической технологии управления эффективностью предприятий позволит в полной мере реализовать принципы индустрии пятого поколения в цифровой трансформации предприятий и повысить эффективность управления предприятиями на всех этапах жизненного цикла. ■

### Литература

1. Шерр А.-В. Индустрия 4.0: от прорывной бизнес-модели к автоматизации бизнес-процессов. М.: Издательский дом «Дело», 2020.
2. Industrie 4.0. Reference Architectural Model Industrie 4.0 (RAMI4.0) – An Introduction // Federal Ministry for Economic Affairs and Energy of the Federal Republic of Germany. 2018. [Электронный ресурс]: <https://www.plattform-i40.de/PI40/Redaktion/EN/Downloads/Publikation/rami40-an-introduction.html> (дата обращения: 05.12.2025).
3. Многоуровневая структура фабрики будущего // Ассоциация Технет. [Электронный ресурс]: <https://technet-nti.ru/article/fabriki-buducshego> (дата обращения: 05.12.2025).
4. Управление бизнес-экосистемами: учебник / под общ. ред. К. Х. Абдурахманова. М.: ФГБОУ ВО «РЭУ им. Г. В. Плеханова», 2024.
5. Тельнов Ю. Ф., Брызгалов А. А., Козырев П. А., Королева Д. С. Выбор типа бизнес-модели для реализации стратегии цифровой трансформации сетевого предприятия // Бизнес-информатика. 2022. № 4. С. 50–67. <https://doi.org/10.17323/2587-814X.2022.4.50.67>

6. Тельнов Ю. Ф., Казаков В. А., Данилов А. В., Денисов А. А. Требования к программной реализации системы Индустрии 4.0 для создания сетевых предприятий // Программные продукты и системы. 2022. Т. 35. № 4. С. 561–566. <https://doi.org/10.15827/0236-235X.140.557-571>
7. Макаров В. Л., Бахтизин А. Р., Бекларян Г. Л., Акопов А. С. Цифровой завод: методы дискретно-событийного моделирования и оптимизации производственных характеристик // Бизнес-информатика. 2021. Т. 15. № 2. С. 7–20. <https://doi.org/10.17323/2587-814X.2021.2.7.20>
8. Keshvarinia M., MacKenzie C. A., Zhao Z. A simulation-based digital twin model for data-driven decision optimization // Decision Analytics Journal. 2025. Vol. 17. Article 100646. <https://doi.org/10.1016/j.dajour.2025.100646>
9. Макаров В.Л., Бахтизин А.Р., Бекларян Г.Л., Акопов А.С. Разработка программной платформы для крупномасштабного агент-ориентированного моделирования сложных социальных систем // Программная инженерия. 2019. Т. 10. № 4. С. 167–177.
10. Бекларян Г. Л. Агентное моделирование и оптимизация характеристик научно-производственных кластеров // Бизнес-информатика. 2024. Т. 18. № 1. С. 36–51. <https://doi.org/10.17323/2587-814X.2024.1.36.51>
11. Розанова Н. М. Индустрия 5.0: Золотой век или прыжок в темноту? // Вестник Института экономики Российской академии наук. 2023. № 6. С. 61–77. [https://doi.org/10.52180/2073-6487\\_2023\\_6\\_61\\_77](https://doi.org/10.52180/2073-6487_2023_6_61_77)
12. Soldatos J., Ipektsidis B., Kefalakis N., Despotopoulou A.-M. Reference architecture for AI-based Industry 5.0 applications // Artificial Intelligence in Manufacturing. Enabling Intelligent, Flexible and Cost-Effective Production Through AI. Springer, 2024. P. 3–26.
13. Nahavandi S. Industry 5.0—A Human-Centric Solution // Sustainability. 2019. Vol. 11. Article 4371. <https://doi.org/10.3390/su11164371>
14. Kusiak A. Smart manufacturing must embrace big data // Nature. 2017. Vol. 544. P. 23–25. <https://doi.org/10.1038/544023a>
15. Moghaddam M., Cadavid M. N., Kenley C. R., Deshmukh A. V. Reference architectures for smart manufacturing: A critical review // Journal of Manufacturing Systems. 2018. Vol. 49. P. 215–225. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2018.10.006>
16. Lu Y., Xu X., Wang L. Smart manufacturing process and system automation – A critical review of the standards and envisioned scenarios // Journal of Manufacturing Systems. 2020. Vol. 56. P. 312–325. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2020.06.010>
17. Lee S., Ryu K. Development of the architecture and reconfiguration methods for the smart, self-reconfigurable manufacturing system // Applied Sciences. 2022. Vol. 12. No. 10. Article 5172. <https://doi.org/10.3390/app12105172>
18. Тельнов Ю. Ф., Казаков В. А., Данилов А. В. Проектирование многоагентной системы сетевого предприятия // Бизнес-информатика. 2024. Т. 18. № 3. С. 70–86. <https://doi.org/10.17323/2587-814X.2024.3.70.86>
19. Григорян Е. С. Классификация видов устойчивости предприятия // Концепт (Научно-методический журнал). 2015. № 3. С. 86–90. [Электронный ресурс]: <http://e-koncept.ru/2015/15072.htm> (дата обращения: 05.12.2025).
20. Kaplan R. S., Norton D. P. The balanced scorecard—measures that drive performance. Harvard Business Review, 1992.
21. Cardoso E. C. S. Towards a methodology for goal-oriented enterprise management // 2013 17th IEEE International Enterprise Distributed Object Computing Conference Workshops, Vancouver, BC, Canada, 2013. P. 94–103. <https://doi.org/10.1109/EDOCW.2013.17>
22. Prahalad C. K., Hamel G. The core competence of the corporation. Harvard Business Review, 1990.
23. Hon K. K. B. Performance and evaluation of manufacturing systems // CIRP Annals. 2005. Vol. 54. No. 2. P. 139–154. [https://doi.org/10.1016/s0007-8506\(07\)60023-7](https://doi.org/10.1016/s0007-8506(07)60023-7)
24. Дружаев А. А., Исаев Д. В., Огуречников Е. В. Принципы управления развитием ЕРМ-систем // Бизнес-информатика. 2019. Т. 13. № 2. С. 73–83. <https://doi.org/10.17323/1998-0663.2019.2.73.83>
25. Концепция Business Performance Management: начало пути / Е. Ю. Духонин и [др.]. М.: Альпина Бизнес Букс, 2004.
26. Balaban N., Belić K., Gudelj M. Business process performance management: Theoretical and methodological approach and implementation // Management Information Systems. 2011. Vol. 6. No. 4. P. 3–9.
27. Прокопенко Н. Ю., Артюх Г. С. Применение технологии Process Mining для анализа данных и процессов (на платформе Loginom Community): учебное пособие. Нижний Новгород: ННГАСУ, 2025.
28. Рындина С. В. Моделирование бизнес-процессов с использованием платформы SILA Union: учеб.-метод. пособие. Пенза: Изд-во ПГУ, 2025.
29. Вашуков Ю. А., Дмитриев А. Я., Митрошкина Т. А. QFD: Разработка продукции и технологических процессов на основе требований и ожиданий потребителей: методические указания. Самара: СГАУ, 2012.
30. Вашуков Ю. А., Дмитриев А. Я., Митрошкина Т. А. Анализ видов, последствий и причин потенциальных несоответствий (FMEA): методические указания. Самара: СГАУ, 2008.
31. Построение структуры сетевого предприятия для создания инновационных продуктов / Ю. Ф. Тельнов и [др.] // Открытое образование. 2019. Т. 23. № 6. С. 59–73. <https://doi.org/10.21686/1818-4243-2019-6-59-73>
32. Тельнов Ю. Ф., Казаков В. М., Третьяков В. М. Разработка системы, основанной на знаниях, для проектирования инновационных процессов создания продукции сетевых предприятий // Бизнес-информатика. 2020. Т. 14. № 3. С. 35–53. <https://doi.org/10.17323/2587-814X.2020.3.35.53>

## Об авторах

### Юрий Филиппович Тельнов

доктор экономических наук, профессор;

заведующий кафедрой, кафедра прикладной информатики и информационной безопасности, Российский экономический университет им. Г. В. Плеханова, Россия, 117997, г. Москва, Стремянный пер., д. 36;

E-mail: Telnov.YUF@rea.ru

ORCID: 0000-0002-2983-8232

### Татьяна Константиновна Кравченко

доктор экономических наук, профессор;

профессор, Высшая школа бизнеса, Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», Россия, 119049, г. Москва, ул. Шаболовка, д. 28/11;

E-mail: tkravchenko@hse.ru

ORCID: 0000-0002-6479-6250

# Enterprise performance management based on digital twin technology in the fifth-generation industry

## Yury Filippovich Telnov <sup>a</sup>

E-mail: Telnov.YUF@rea.ru

## Tatyana Konstantinovna Kravchenko <sup>b</sup>

E-mail: tkravchenko@hse.ru

<sup>a</sup> Plekhanov Russian University of Economics, Moscow, Russia

<sup>b</sup> Graduate School of Business, HSE University, Moscow, Russia

## Abstract

In the context of the increasing need to improve the management efficiency of enterprises that support the implementation of the principles of digital transformation based on the concept of the fifth-generation industry, the relevance of research on the development of appropriate systems in terms of ensuring continuous targeted and sustainable development, customer-centricity and social orientation of production is increasing. Digital twin technology and its multi-agent implementation act as effective means of building enterprise performance management systems. At the same time, the lack of scientific research in this area determines the purpose of the article, which is to develop a product-resource approach to enterprise performance management based on digital twins in the fifth-generation industry. A distinctive feature of the proposed approach developed by the authors is the use of dynamic enterprise

performance management technology based on digital twins, which ensures the integration of business processes and resources used at the level of not only one enterprise, but also at the level of network value chains based on a common digital platform of the business ecosystem. The paper analyzes approaches to the intellectualization of enterprise management, on the basis of which the requirements for an enterprise performance management system are formulated, ensuring the solution of interrelated tasks of targeted enterprise development, the formation of flexible value chains, and the rational and sustainable use of enterprise resources. The possibilities and disadvantages of the efficiency management process in EPC class systems are analyzed. The paper substantiates the use of digital twin technology and its multi-agent implementation to build an enterprise performance management system in the context of mass customization and the network nature of value chains in the fifth-generation industry. A process for managing the efficiency of enterprises at all stages of the life cycle based on the technology of digital twins of products and resources has been developed, dynamically ensuring the targeting, adaptability and sustainability of the functioning and development of the enterprise.

**Keywords:** fifth-generation industry, targeting, adaptability, sustainability, enterprise performance management, product digital twin, resource digital twin

**Citation:** Telnov, Yu. F., & Kravchenko, T. K. (2026). Enterprise performance management based on digital twin technology in the fifth-generation industry. *Business Informatics*, 20(1), 41–53. <https://doi.org/10.17323/2587-814X.2026.1.41.53>

## References

1. Scheer A.-V. (2020). *Industry 4.0: from a breakthrough business model to business process automation*. Moscow: Delo Publishing House (in Russian).
2. Federal Ministry for Economic Affairs and Energy of the Federal Republic of Germany. (2018). *Industrie 4.0. Reference Architectural Model Industrie 4.0 (RAMI4.0) – An Introduction*. <https://www.plattform-i40.de/PI40/Redaktion/EN/Downloads/Publikation/rami40-an-introduction.html>
3. Technet Association. (2025). *The multilevel structure of the factory of the future* (in Russian). <https://technet-nti.ru/article/fabriki-buducshogo>
4. *Business ecosystem management* / Ed. K. H. Abdurakhmanov. (2024). Moscow: Plekhanov Russian University of Economics (in Russian).
5. Telnov, Yu. F., Bryzgalov, A. A., Kozyrev, P. A., & Koroleva, D. S. (2022). Choosing the type of business model for implementing the digital transformation strategy of a network enterprise. *Business Informatics*, 16(4), 50–67. <https://doi.org/10.17323/2587-814x.2022.4.50.67>
6. Telnov, Yu. F., Denisov, A. A., Kazakov, V. A., & Danilov, A. V. (2022). Requirements for the software implementation of the Industry 4.0 system for creating network enterprises. *International Journal “Programmnye Produkty i Sistemy,”* 25, 557–571 (in Russian). <https://doi.org/10.15827/0236-235x.140.557-571>
7. Makarov, V. L., Bakhtizin, A. R., Beklaryan, G. L., & Akopov, A. S. (2021). Digital plant: methods of discrete-event modeling and optimization of production characteristics. *Business Informatics*, 15(2), 7–20. <https://doi.org/10.17323/2587-814X.2021.2.7.20>
8. Keshvarinia, M., MacKenzie, C. A., & Zhao, Z. (2025). A simulation-based digital twin model for data-driven decision optimization. *Decision Analytics Journal*, 17, 100646. <https://doi.org/10.1016/j.dajour.2025.100646>
9. Makarov, V. L., Bakhtizin, A. R., Beklaryan, G. L., & Akopov, A. S. (2019). Development of software framework for large-scale agent-based modeling of complex social systems. *Software Engineering*, 10(4), 167–177 (in Russian). <https://doi.org/10.17587/prin.10.167-177>
10. Beklaryan, G. L. (2024). Agent-based modeling and optimization of the characteristics for research-and-production clusters. *Business Informatics*, 18(1), 36–51. <https://doi.org/10.17323/2587-814x.2024.1.36.51>
11. Rozanova, N. M. (2023). Industry 5.0: Golden Age or leap into the dark? *Bulletin of the Institute of Economics of the Russian Academy of Sciences*, 6, 61–77 (in Russian). [https://doi.org/10.52180/2073-6487\\_2023\\_6\\_61\\_77](https://doi.org/10.52180/2073-6487_2023_6_61_77)
12. Soldatos, J., Ipektsidis, B., Kefalakis, N., & Despotopoulou, A.-M. (2024). Reference architecture for AI-based Industry 5.0 applications. *Artificial Intelligence in Manufacturing*, 3–26. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-46452-2\\_1](https://doi.org/10.1007/978-3-031-46452-2_1)
13. Nahavandi, S. (2019). Industry 5.0—A Human-Centric Solution. *Sustainability*, 11(16), 4371. <https://doi.org/10.3390/su11164371>
14. Kusiak, A. (2017). Smart manufacturing must embrace big data. *Nature*, 544(7648), 23–25. <https://doi.org/10.1038/544023a>

15. Moghaddam, M., Cadavid, M. N., Kenley, C. R., & Deshmukh, A. V. (2018). Reference architectures for smart manufacturing: A critical review. *Journal of Manufacturing Systems*, 49, 215–225. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2018.10.006>
16. Lu, Y., Xu, X., & Wang, L. (2020). Smart manufacturing process and system automation – A critical review of the standards and envisioned scenarios. *Journal of Manufacturing Systems*, 56, 312–325. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2020.06.010>
17. Lee, S., & Ryu, K. (2022). Development of the Architecture and Reconfiguration Methods for the Smart, Self-Reconfigurable Manufacturing System. *Applied Sciences*, 12(10), 5172. <https://doi.org/10.3390/app12105172>
18. Telnov, Yu. F., Kazakov, V. A., & Danilov, A. V. (2024). Designing a multi-agent system for a network enterprise. *Business Informatics*, 18(3), 70–86. <https://doi.org/10.17323/2587-814x.2024.3.70.86>
19. Grigoryan E. S. (2015). Classification of types of enterprise sustainability. *Concept (Scientific and Methodological Journal)*, 3, 86–90 (in Russian). <http://e-koncept.ru/2015/15072.htm>
20. Kaplan, R.S., & Norton, D.P. (1992). *The balanced scorecard—measures that drive performance*. Harvard Business Review. <https://hbr.org/1992/01/the-balanced-scorecard-measures-that-drive-performance-2>
21. Cardoso, E. C. S. (2013). Towards a methodology for goal-oriented enterprise management. *2013 17th IEEE International Enterprise Distributed Object Computing Conference Workshops*, 94–103. <https://doi.org/10.1109/edocw.2013.17>
22. Prahalad, C. K., & Hamel, G. (1990). *The core competence of the corporation*. Harvard Business Review. <https://hbr.org/1990/05/the-core-competence-of-the-corporation>
23. Hon, K. K. B. (2005). Performance and evaluation of manufacturing systems. *CIRP Annals*, 54(2), 139–154. [https://doi.org/10.1016/s0007-8506\(07\)60023-7](https://doi.org/10.1016/s0007-8506(07)60023-7)
24. Druzhaev, A. A., Isaev, D. V., & Ogurechnikov, E. V. (2019). Principles of managing development of EPM systems. *Business Informatics*, 13(2), 73–83. <https://doi.org/10.17323/1998-0663.2019.2.73.83>
25. Dukhonin, E. Y., Isaev, D. V., Mostovoy, E. L., Boyko, A. G., Goryanskiy, P. S., Dukhonina, O. V., Nakhmkin, E. S., Rodionov, A. S., Slepov, Y. V., & Khomaza, D. V. (2005). *Business performance management: The BPM concept*. (G. V. Gens, Ed.). Alpina Business Books (in Russian). <https://pqm-online.com/assets/files/lib/books/dukhonin.pdf>
26. Balaban, N., Belić, K., & Gudelj, M. (2011). Business process performance management: Theoretical and methodological approach and implementation. *Management Information Systems*, 6, 3–9.
27. Prokopenko, N. Y., & Artyukh, G. S. (2025). *Application of Process Mining technology for data and process analysis (using the Loginom Community platform): A training manual*. Nizhny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering (in Russian).
28. Ryndina, S. V. (2025). *Business process modeling using the SILA Union platform: A training and methodological manual*. Penza State University (in Russian).
29. Vashukov, Y. A., Dmitriev, A. Y., & Mitroshkina, T. A. (2012). *QFD: Product and technological process development based on customer requirements and expectations: Methodological guidelines*. Samara State Aerospace University (in Russian).
30. Vashukov, Y. A., Dmitriev, A. Y., & Mitroshkina, T. A. (2008). *Analysis of types, consequences, and causes of potential non-conformities (FMEA): Methodological guidelines*. Samara State Aerospace University (in Russian).
31. Telnov, Yu. F., Trembach, V. M., Danilov, A. V., Yaroshenko, E. V., Kazakov, V. A., & Kozlova, O. A. (2019). Constructing network enterprise structure to create innovative products. *Open Education*, 23(6), 59–73 (in Russian). <https://doi.org/10.21686/1818-4243-2019-6-59-73>
32. Telnov, Yu. F., Kazakov, V. A., & Trembach, V. M. (2020). Developing a knowledge-based system for the design of innovative product creation processes for network enterprises. *Business Informatics*, 14(3), 35–53. <https://doi.org/10.17323/2587-814x.2020.3.35.53>

### About the authors

#### **Yury Filippovich Telnov**

Doctor of Sciences (Economics), Professor;

Head of the Department, Department of Applied Informatics and Information Security, Plekhanov Russian University of Economics, 36 Stremyanny Lane, Moscow 117997, Russia;

E-mail: Telnov.YUF@rea.ru

ORCID: 0000-0002-2983-8232

#### **Tatyana Konstantinovna Kravchenko**

Doctor of Sciences (Economics), Professor;

Professor, Department of Business Informatics, Graduate School of Business, HSE University, 26–28 Shabolovka St., Moscow 119049, Russia;

E-mail: tkravchenko@hse.ru

ORCID: 0000-0002-6479-6250