

ISSN 2523-4714

### 3. ЛОГИСТИКА

### 3. LOGISTICS

УДК 65.011.08+004.942

**О. В. Мясникова**

Институт бизнеса БГУ, Минск, Беларусь

#### МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭФФЕКТОВ ЦИФРОВОЙ ТРАНСФОРМАЦИИ ПРОИЗВОДСТВЕННО-ЛОГИСТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

*Рассмотрены вопросы определения эффектов, получаемых в результате цифровой трансформации производственно-логистических систем. Цель исследования – выделить и систематизировать эффекты цифровой трансформации производственно-логистической системы и предложить методические подходы их определения. Раскрывается сущность эффектов цифровой трансформации производственно-логистической системы как сложной социо-киберфизической системы. Разработана классификация эффектов цифровой трансформации. Предложена методика моделирования эффектов цифровой трансформации производственно-логистических систем. Определены факторы, способствующие и препятствующие получению эффектов цифровой трансформации. Разработан алгоритм оптимизации системы на базе интеллектуального цифрового двойника, предполагающий комплекс методов и решений по оптимизации производственно-логистических систем исходя из группы факторов, обуславливающих отклонение от целевого уровня эффективности.*

*Выводы, методика и алгоритм будут полезны в ходе подготовки и осуществления цифровой трансформации производственно-логистических систем.*

**Ключевые слова:** производственно-логистическая система, эффект, интеллектуальный цифровой двойник, моделирование, оптимизация, социо-киберфизическая система, метрики результативности, цифровая трансформация

**Для цитирования:** Мясникова, О. В. Моделирование эффектов цифровой трансформации производственно-логистических систем / О. В. Мясникова // Бизнес. Инновации. Экономика : сб. науч. ст. / Ин-т бизнеса БГУ. – Минск, 2023. – Вып. 8. – С. 114–128.

**O. Miasnikova**

School of Business of BSU, Minsk, Belarus

#### MODELING THE EFFECTS OF DIGITAL TRANSFORMATION OF PRODUCTION AND LOGISTICS SYSTEMS

*The article is devoted to the issues of determining the effects resulting from the digital transformation of production and logistics systems. The purpose of the study is to identify and systematize the effects of digital transformation of the production and logistics system and to propose methodological approaches to their definition. The essence of the effects of digital transformation of the production and logistics system as a complex socio-cyberphysical system has been revealed. A classification of digital transformation effects has been developed. A method for modeling the effects of digital transformation of production and logistics systems is proposed. The factors contributing to and hindering the effects of digital transformation have been identified. An algorithm for optimizing the system based on an intelligent digital twin has been developed. It assumes a set of methods and solutions for optimizing production and logistics systems based on a group of factors that cause a deviation from the target level of efficiency.*

*Conclusions, methodology and algorithm will be useful during the preparation and implementation of the digital transformation of production and logistics systems.*

**Keywords:** *production and logistics system, effect, Intelligent Digital Twin, modeling, optimization, socio-cyberphysical system, performance metrics, digital transformation*

**For citation:** Miasnikova O. Modeling the effects of digital transformation of production and logistics systems. *Biznes. Innovatsii. Ekonomika = Business. Innovations. Economics*. Minsk, 2023, iss. 8, pp. 114–128 (in Russian).

## Введение

Производственно-логистическая система (ПЛС) – относительно устойчивая совокупность звеньев цепи создания ценностей, взаимосвязанных в пределах цикла производства в едином процессе управления материальными, сервисными и сопутствующими им потоками.

Цифровая трансформация ПЛС (ЦТ ПЛС) является процессом преобразования структур, форм и способов, целевой направленности деятельности ПЛС на базе освоения инновационных и цифровых технологий.

Детализация разработанных ранее теоретико-методологических подходов к цифровой трансформации ПЛС, включая концепцию, принципы, модели, стратегии, тактику и сценарии [1; 2], приводит нас к необходимости рассмотрения проблемы определения эффектов и методов их расчета.

В настоящей статье поставлена цель исследования – выделить и систематизировать эффекты цифровой трансформации ПЛС и предложить методические подходы их определения.

Задачи исследования: раскрыть сущность и предложить классификацию эффектов цифровой трансформации ПЛС как сложной социо-киберфизической системы; предложить методику моделирования эффектов цифровой трансформации ПЛС на базе установленных факторов; разработать алгоритм оптимизации системы на базе интеллектуального цифрового двойника, который исходя из группы факторов, обуславливающих отклонение от моделируемого уровня эффективности, предполагает комплекс методов и решений по оптимизации производственно-логистических систем.

В качестве объекта нами рассматривается ПЛС как социо-киберфизическая система. В развитие выделенных ранее направлений влияния технологий цифровой экономики на базовые элементы ПЛС [3] предметом рассмотрения являются эффекты как изменения ПЛС, получаемые в результате цифровой трансформации. Осуществление цифровых преобразований ПЛС имеет комплекс последствий и не сводится к увеличению степени автоматизации принятия управленческих решений и управляемости системы как единственному возможному. Возникает необходимость систематизации эффектов и разработки подходов к расчету эффектов, появляющихся в ходе цифровой трансформации ПЛС.

Задачей является определение факторов, способствующих и препятствующих достижению определенного уровня прогресса, преодоления разрыва между результативностью действующей ПЛС и целевым ее уровнем, что связывается нами с необходимостью формирования факторной модели, систематизации факторов, оценки степени и направленности их влияния на эффекты цифровой трансформации ПЛС.

В работе [4] нами обосновано применение интеллектуального цифрового двойника для процессов оптимизации ПЛС. В развитие данного подхода в настоящей статье ставится задача разработать алгоритм оптимизации системы исходя из группировки факторов и формализованной модели оценки эффектов цифровой трансформации.

Методами исследования являются анализ, синтез, аналогия, абстракция, моделирование. Актуальность исследования определяется тем, что модель оценки эффектов цифровой трансформации и установленные закономерности проявления влияния системы факторов на ПЛС, а также алгоритм оптимизации ПЛС могут применяться при подготовке и реализации программы и проектов ЦТ организаций с различным объемом деятельности, ролью в цепях создания стоимости и уровнем цифровой зрелости процессов.

## Результаты и их обсуждение

**Эффекты цифровой трансформации.** Согласно прогнозам группы IDC, объем прямых инвестиций в цифровую трансформацию в период с 2020 по 2023 г. составит 6,8 трлн долл. США,

а к 2023 г. глобальные расходы на услуги и технологии, которые позволят осуществить цифровую трансформацию, оцениваются в 2,3 трлн долл. США (IDC, 2020) [5].

Глобальные расходы на цифровую трансформацию в логистике к 2030 г. составят 108,8 млрд долл. США, увеличившись в среднем на 9,6 % за период 2022–2030 гг. по оценкам ReportLinker в сентябре 2023 г. [6].

Эти факты делают проблему эффективности ЦТ особенно актуальной. Проблематика определения и оценки эффектов цифровой трансформации раскрывалась учеными в ряде исследований и опросов.

Исследование Deloitte [7] в 2020 г. показало, что руководители отмечают значительную роль в достижении эффектов ЦТ за счет интеллектуальных рабочих процессов (рис. 1). Под ними понимается внедрение и постоянная перекалибровка процессов, которые максимально используют как человеческие, так и технологические возможности для последовательного достижения положительных результатов и высвобождения ресурсов для более ценных действий. Среди них автоматизация процессов принятия решений, рутинных процессов и коммуникаций, создание центров передового опыта.

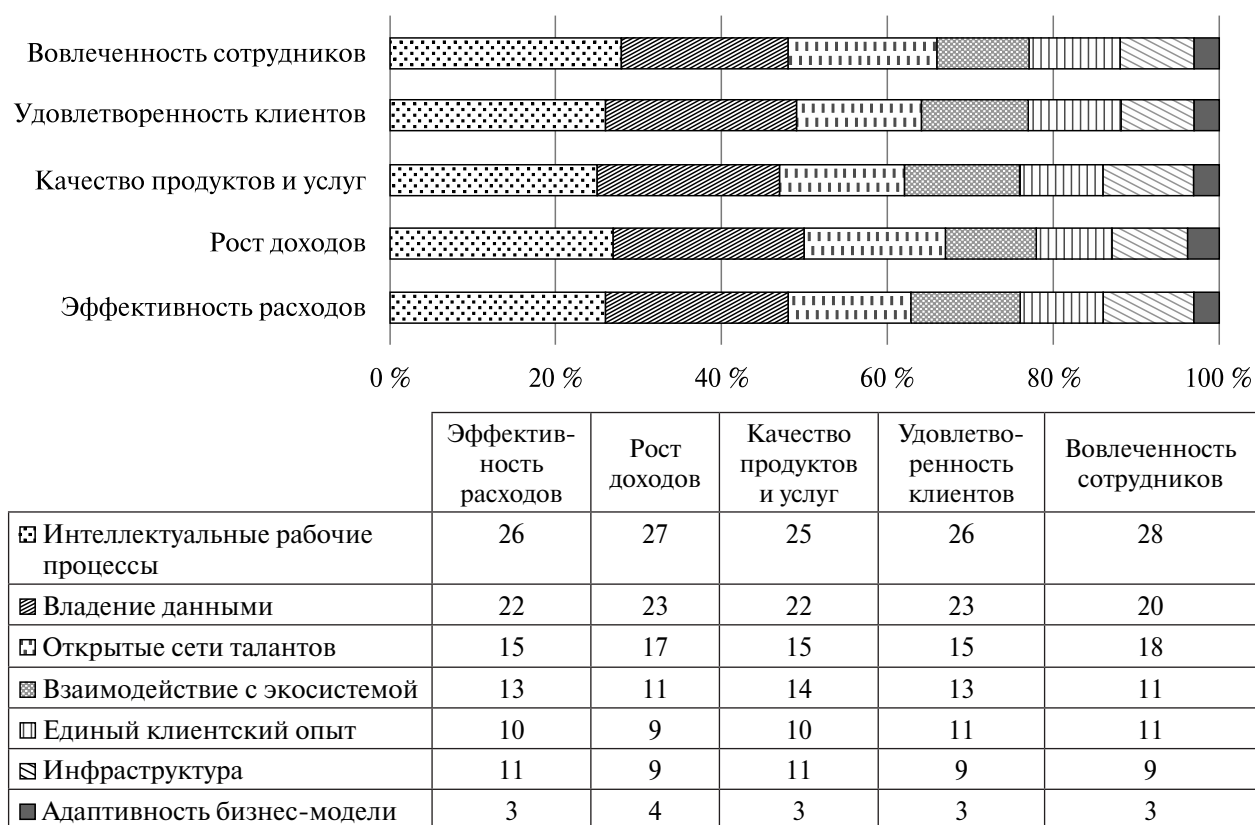


Рис. 1. Доля респондентов, отметивших роль основных элементов цифровой трансформации в достижении бизнес-результатов

И с т о ч н и к: разработано автором на основе [7].

Fig. 1. The role of the main pivots of digital transformation in achieving business outputs

S o u r c e: author's developed on the basis of [7].

Главные преимущества внедрения цифровой модели согласно опросу ptc.com – это повышение операционной эффективности (40 %), более быстрое время выхода на рынок (36 %), соответствие меняющимся ожиданиям клиентов (35 %), повышение качества нового продукта (26 %), увеличение повторного использования дизайна (25 %), сокращение затрат на разработку продукта (24 %), внедрение новых источников дохода (21 %), снижение затрат на низкое качество (14 %), увеличение доходности первого прохождения (5 %) [8].

Однако нам представляется целесообразным выразить эффекты цифровой трансформации не только укрупненно и качественно в форме получаемых бизнес-результатов (*outputs*), но и их конкретное количественное проявление в форме метрик и показателей (*metrics and indicators*), что, безусловно, актуально для организации и исполнения программ цифрового развития в микро-экономическом аспекте для ПЛС.

#### **Производственно-логистическая система как социо-киберфизическая система цифрового типа.**

В качестве объекта нами рассматривается ПЛС как социо-киберфизическая система. Как социо-киберфизическая система ПЛС имеет сложную структуру, многочисленные элементы которой взаимосвязаны посредством информационных технологий и управляются по заданному алгоритму. Это сложная, динамичная, экономическая, открытая, адаптивная система с обратной связью. ПЛС изменяется путем целенаправленного внедрения цифровых технологий, системы и инструментов. В ходе цифровой трансформации изменению подлежит ее состав, связи, форма взаимодействия элементов.

Анализ онтологической сущности социо-киберфизической системы позволил выявить ее сущностные характеристики как системы цифрового типа и выделить в составе следующие элементы:

1) эффективно интегрируемые физические компоненты, реализующих технологический процесс (исполнительные механизмы, выполняющие манипулирование физической реальностью);

2) интеллектуальные и информационные компоненты, обеспечивающие сбор, обработку, хранение данных (встроенные в физические компоненты вычислительные ресурсы, т. е. сенсоры, актуаторы, распределенные центры управления и расширенной аналитики, централизации и виртуализации данных, в том числе с использованием искусственного интеллекта);

3) компоненты коммуникационной среды, обеспечивающей обмен информацией внутри системы и с окружающей средой, передачу управляющих команд исполнительным механизмам и реализацию межмашинного взаимодействия посредством индустриального Интернета, проводных и беспроводных сетей связи, с полным аппаратно-программным обеспечением;

4) компоненты обеспечения безопасности, реализующие протоколы безопасного доступа к данным и исполнительным механизмам (средства информационной безопасности и система управления защитой);

5) социальные компоненты – человек как носитель интеллектуального и трудового ресурса, играющий меняет роль со-творца и со-исполнителя процессов проектирования новых изделий, программиста, аналитика, диспетчера.

**Эффекты цифровой трансформации производственно-логистической системы.** Исходя из сложной и комплексной природы ПЛС нами разработана классификация эффектов цифровой трансформации.

Эффекты цифровой трансформации ПЛС могут быть сгруппированы по следующим критериям.

Масштаб проявления – глобальный, региональный, локальный эффект.

Уровень проявления эффекта в ПЛС – рабочее место, группа рабочих мест (участок, цех), предприятие, группа предприятий (цепь поставок).

Природа эффекта – совокупность эффектов:

а) научно-технический (прирост научной информации, повышение технического уровня продукции, совершенствование технологии производства и оказания логистических услуг);

б) организационно-производственный (улучшение трудовых, организационно-производственных показателей, повышение уровня адаптивности, гибкости, устойчивости системы);

в) социальный (улучшение условий труда, ликвидация существенных различий между умственным и физическим трудом);

г) экономический (увеличение объемов и качества работы);

д) кибернетический (увеличение качества коммуникаций, управления).

Качество проявления эффекта: по влиянию – созидательный или разрушительный, по скорости – быстро или медленно проявляющийся, по размеру – малый или крупный, по динамике – затухающий или нарастающий.

Место проявления эффекта, т. е. элемент ПЛС, где эффект возникает: а) совокупность потоков, проходящих через систему; б) совокупность производственных ресурсов, формирующих компоненты социо-киберфизической системы (интегрируемые физические, интеллектуальные и информационные, коммуникационные, компоненты обеспечения безопасности и социальные компоненты); в) система управления потоками ресурсов; г) совокупность процессов преобразования потоков.

Форма проявления эффекта:

– количественная как повышение результативности системы – в виде сокращения затрат, повышения объемов результатов и их качества, повышение скорости получения результатов; сохранение жизнеспособности системы или ее элемента – в форме сохранения элемента, улучшения элемента, удаления элемента;

– качественная как повышение уровня проявления положительных характеристик системы, что фиксируется через улучшение совокупности ее свойств – адаптивности, оптимальности, гибкости, устойчивости, надежности, сохраняемости, управляемости, опережающего развития, безопасности.

Эффекты ЦТ ПЛС отражены в табл. 1.

Таблица 1

### Эффекты цифровой трансформации производственно-логистической системы

Table 1

#### Effects of digital transformation of the production and logistics system

Место проявления	Способ обеспечения эффекта	Форма проявления эффекта
Совокупность потоков, проходящих через систему	Технологии определения места нахождения, носимые устройства. Совместное использование CAD/CAE/CAM, PLM, PDM. Цифровые двойники и тени. Обработка больших данных, облачные и туманные вычисления. Автоматическое пополнение запасов материально-сырьевых ресурсов. Разработка «интеллектуальных» материалов, характеристики которых значительно изменяются под влиянием внешних воздействий, и создание на их основе «умных покрытий» и продуктов. Переход от добычи в пользу вторичного использования изделий, компонентов, материалов в замкнутых цепях поставок	Оперативный мониторинг движения товаров и услуг. Сокращение запасов, надежные поставки, гибкое реагирование в цепи поставок. Тиражирование решений, быстрое прототипирование, снижение затрат на доработки. Персонализированная продукция, кастомизация и оптимизация дизайна изделий. Исключение технологических операций обработки материала. Экономия за счет вторичного использования изделий, компонентов, материалов
Совокупность производственных ресурсов, формирующих компоненты социо-киберфизической системы	Быстрое изготовление инструментальной оснастки, производство пресс-форм методом аддитивного производства (3D-Printing). Дистанционное управление оборудованием, беспилотниками, дронами. Контроль движения работника методами смешанной реальности (Mixed Reality). Превентивный контроль оборудования, дистанционная диагностика, контроль операций. Контроль загрузки оборудования. Продвинутые роботы и коботы. Автоматическая загрузка и выгрузка обрабатываемых изделий, замена инструмента. Подготовка управляющих программ для всего станочного парка ЧПУ-оборудования на предприятии. Создание персональной и безопасной рабочей среды, управление микроклиматом. Совместное	Снижение брака, простоев. Низкие издержки, редкие простои, скорость переналадки, предиктивный ремонт. Исключение человеческого фактора, стабильность повторяемости позиционирования. Экономия на персонале, высокая производительность. Создание сбалансированной, сопряженной по качеству процессов системы. Экономия на инфраструктуре при «работе из дома»



Окончание табл. 1  
Ending of the table 1

Место проявления	Способ обеспечения эффекта	Форма проявления эффекта
	использование трудовых ресурсов / профессиональных навыков при частичной занятости и дистанционной работе	
Совокупность процессов преобразования потоков	Изготовление деталей, близких к заданной форме, методом аддитивного производства (3D-Printing) без инструментальной оснастки с минимальной последующей обработкой. Автоматизация выполнения опасных и тяжелых операций, сочетание нескольких видов обработки. Организация дистанционной работы. Автоматизированная сортировка, подбор и перемещение деталей и комплектующих с мест хранения к местам обработки и сборки. «Умные» конвейерные системы для перемещения лотков и коробок между рабочими станциями. Перемещение грузов под управлением интеллектуальных беспилотных транспортных систем	Сокращение длительности технологических операций. Надежность и точность действий. Быстрая переналадка, точность, бездефектность, скорость переналадки. Сокращение маршрутов движения, ускорение обработки. Ускорение движения потока. Безлюдное производство. Экономия расходов оплаты труда
Система управления потоками ресурсов	Технология Big Data, расширенная аналитика, машинное обучение. Принятие решений на основе данных. Инженерное ПО: САПР, PDM, PLM. Использование систем управления классов ERP, BI, APS, MES, MRP II, CSRP, CAD/CAE/CAM, PLM, CALS. Подтверждение реализуемости решений и соответствия требованиям, одновременная совместная работа. Моделирование поведения изделия в режиме реального времени с учетом реальных размеров. Создание интерактивного электронного технического руководства, документов по эксплуатации и ремонту изделия. Контроль загрузки оборудования. Перераспределение работ на свободные мощности в распределенном производстве. Работа модели SaaS для промышленных объектов. Система обратной связи и самообучения. Возможность автоматизировать измерения. Прогнозирование выходов из строя оборудования	Прогноз результатов исходя из анализа и оптимизации режимов всей технологической цепочки. Экономия на моделях, снижение материалоемкости, высокая надежность конструкции. Снижение затрат на производство классических макетов. Сокращение сроков формирования необходимой технологической документации и решения задач. Высокая точность и скорость измерений, предиктивный ремонт. Исключение человеческого фактора, рисков. Сокращение времени простоев ремонтируемых активов

Источники: разработано автором.

Source: author's developed.

**Методика моделирования эффектов цифровой трансформации производственно-логистических систем.** Решение проблем оптимизации следует связывать с развитием многокритериальных моделей оптимизации взамен однокритериальных, где критерием выступает, как правило, минимум затрат на отдельную функцию. Для освоения многокритериальных моделей необходимо организовать и выполнить:

- разработку совокупности частных показателей эффективности отдельных производственных и логистических функций и их объединение в систему результирующих показателей;
- разработку методов объединения результирующих показателей в интегральный критерий, например через рейтинговые балловые оценки;

- формирование системы формализованных ограничений – факторов как внутренней, так и внешней среды функционирования ПЛС;
- системное использование достаточно мощных средств моделирования, создания цифровых двойников, что жизненно необходимо в условиях большой размерности и высокого уровня неопределенности;
- организацию интегрированной системы мониторинга как результирующих показателей, так и параметров внешней среды.

Решение указанных задач несомненно требует значительных затрат времени и денег, однако обоснованные в единой системе оценки управленческие решения позволят более достоверно и качественно работать всем участникам ПЛС.

Показателями эффекта выступают:

- прирост выпуска продукции, соответствие предложения спросу по объему, качеству и времени выхода на рынок;
- увеличение качества продукции, повышение характеристик материалов технологичность, весовая эффективность (отношение прочности к удельному весу), надежность (выносливость, сопротивление малоцикловой усталости, статической и циклической трещиностойкость);
- расширение ассортимента;
- ускорение оборачиваемости, сокращение длительности производственных и логистических циклов, качество процессов и продуктов;
- абсолютная экономия ресурса (снижение потребления ресурса на единицу продукции), относительная экономия ресурса (прирост выпуска при сохранении потребления ресурса на единицу продукции на прежнем уровне);
- степень использования активов, ресурсов труда, поддержание оптимальных запасов.

Следует отметить, что меры ЦТ ПЛС имеют, как правило, комплексное влияние на ряд показателей эффекта, как показано в табл. 2.

Показатель эффекта ЦТ ПЛС предлагается определять как величину разрыва (gap) между фактически достигнутым (моделируемым) и целевым уровнем результирующих показателей. Так, минимальный разрыв будет отражать вариант ЦТ ПЛС, приближающий ее структуру к желаемому образу модели.

Сопоставление фактически достигнутых (моделируемых) и целевых результатов и проверка соответствия их отклонения заданными лимитами могут быть выражены следующим образом:

$$\Delta R = R_p - R_m \rightarrow \min,$$

где  $\Delta R$  – разрыв результирующих показателей;  $R_p$  – массив реальных фактически достигнутых результирующих показателей системы;  $R_m$  – массив моделируемых целевых результирующих показателей системы.

Показатель эффекта ЦТ ПЛС предлагается определять следующим вектором:

$$\mathbf{R} = R(\overline{Fl}, \overline{C} | \overline{X}_1, \overline{X}_2, \overline{X}_3) = \begin{pmatrix} R_1(\overline{Fl}, \overline{C} | \overline{X}_1, \overline{X}_2, \overline{X}_3) \\ R_2(\overline{Fl}, \overline{C} | \overline{X}_1, \overline{X}_2, \overline{X}_3) \\ R_3(\overline{Fl}, \overline{C} | \overline{X}_1, \overline{X}_2, \overline{X}_3) \\ R_4(\overline{Fl}, \overline{C} | \overline{X}_1, \overline{X}_2, \overline{X}_3) \\ R_5(\overline{Fl}, \overline{C} | \overline{X}_1, \overline{X}_2, \overline{X}_3) \end{pmatrix},$$

где  $R_i$  – массив результирующих показателей по варианту ПЛС, с заданными аргументами функции:  $\overline{Fl}$  – потоки как объект управления в ПЛС;  $\overline{C}$  – система управления в ПЛС, а также параметрами:  $\overline{X}_1$  – группа мер оптимизации за счет управленческих факторов;  $\overline{X}_2$  – группа мер оптимизации за счет организационных факторов;  $\overline{X}_3$  – группа мер оптимизации за счет материальных факторов.

Таблица 2

Table 2

## Меры, источники и показатели эффекта цифровой трансформации ПЛС

## Measures, sources and indicators of the effect of digital transformation of the production and logistics system

Меры	Источники экономического эффекта	Показатели, в уровне которых проявляются источники эффекта
Применение новых видов сырья, материалов	Совершенствование технологического процесса, изменение норм расхода ресурсов на единицу продукции	Качество продукции; уровень технологии; себестоимость продукции; прибыль, рентабельность производства; ритмичность производства; объем производства; организационно-технический уровень производства
Совершенствование технологического процесса	Совершенствование технологического процесса, изменение норм расхода ресурсов на единицу продукции	Длительность производственного цикла; качество продукции; затраты на обработку; себестоимость продукции, прибыль, рентабельность производства; запасы незавершенного производства; использование основных производственных фондов; производительность труда
Внедрение нового прогрессивного высоко скоростного оборудования	Увеличение объема производства Уменьшение количества оборудования (при неизменном объеме производства)	Производительность труда; фондоотдача; себестоимость продукции; прибыль, рентабельность производства Объем продукции с 1 м <sup>2</sup> производственной площади; стоимость обработки; количество отходов; себестоимость продукции; численность рабочих; производительность труда; прибыль, рентабельность производства
Комплексная механизация и автоматизация производства	Агрегирование машин Сокращение затрат ручного труда	Длительность производственного цикла; размер запасов незавершенного производства; оборачиваемость оборотных средств; качество продукции Уровень механизации труда; численность рабочих; производительность труда; себестоимость продукции; прибыль, рентабельность производства
Совершенствование организации производства	Повышение уровня организации производства Обеспечение сопряженной работы оборудования по переходам, соблюдение технологической дисциплины, режимов технической эксплуатации оборудования, нормативных запасов незавершенного производства	Организационно-технический уровень производства; качество продукции; ритмичность производства Качество продукции; уровень технологии; себестоимость продукции; прибыль, рентабельность производства; ритмичность производства; объем производства; организационно-технический уровень производства



Результирующие показатели группируются следующим образом:

$R_1$  – группа показателей «надежность» (reliability);

$R_2$  – группа показателей «оперативное реагирование» (responsiveness);

$R_3$  – группа показателей «гибкость» (agility);

$R_4$  – группа показателей «затраты» (cost).

$R_5$  – группа показателей «эффективность» (efficiency).

Группа  $R_1$ . Надежность определяется как возможность ПЛС исполнять производственные заказы на уровне идеального заказа Perfect Order Fulfillment (POF), при котором соблюдается правило «7R» семь условий: правильный продукт, правильное количество, правильное состояние, правильное место, правильное время, правильный клиент и правильная стоимость. Разложение стратегической метрики POF в вектор ее компонент выполняется через расчет доли заказов, имеющих ту или иную черту идеального заказа. Доля заказов каждой группы определяется как отношение числа заказов с указанным свойством к общему числу выполненных заказов.

Группа  $R_2$  «оперативное реагирование» определяется как возможность ПЛС исполнять производственные заказы за определенное время. Длительность цикла выполнения заказа (Order Fulfillment Cycle Time, OFCT) как отрезок времени между моментом размещения заказа клиентом до момента его выполнения включает в себя время процесса выполнения заказа (Order Fulfillment Process Time) (по блокам снабжения, производства, сбыта, возвратов) и время ожидания выполнения заказа (Order Fulfillment Dwell Time).

Группа  $R_3$  «гибкость / маневренность / динамичность» выражается через стратегические метрики адаптивности, которые определяются как возможность ПЛС выходить на повышенный или сниженный оперативный уровень за установленный период времени (например, 30 дней) без потери устойчивости и существенного изменения стоимости единицы продукта, без каких-либо ограничений по запасам или затратам. Верхний предел адаптивности цепочки поставок вверх (Upside Supply Chain Adaptability, USCA) определяется как максимальное устойчивое процентное увеличение метрики за установленный период времени (например, 30 дней) без существенного изменения: стоимости единицы продукта для количества сырья, которое может быть приобретено/получено; объема производства, которое может быть достигнуто при условии отсутствия ограничений по сырью; объема поставок, которое может быть достигнуто при условии неограниченного наличия готовой продукции хорошего качества; объема возврата сырья поставщикам, при котором сохраняется устойчивость; объема возвратов готовой продукции от покупателей, при котором сохраняется устойчивость.

Нижний предел адаптивности цепочки поставок (Downside Supply Chain Adaptability, DSCA) определяет, какой размер сокращения метрики (объемов поставок ресурсов, производства, поставок продукции, выраженный в процентах) может выдержать компания в течение 30 дней без каких-либо ограничений по запасам или затратам.

Общая стоимость риска (Overall Value at Risk, VaR) – это статистический показатель суммы денег, которую ПЛС могут потерять в течение определенного периода времени с заданной вероятностью (обычно 95 или 99 %). VaR рискованного события определяется как произведение вероятности его наступления (Probability of Risk Event, P) на эффект его действия, выраженный в деньгах (Monetized Impact of Risk Event). VaR характеризуется тремя параметрами: временной горизонт, доверительный уровень (confidence level) – уровень допустимого риска (обычно 95 или 99%), базовая валюта, в которой измеряется показатель.

Время до восстановления (Time to Recovery, TTR) – это совокупное время, которое потребовалось бы ПЛС, чтобы стать полностью работоспособной после сбоя. TTR будет включать в себя общее время восстановления с информацией о TTR поставщиков в сочетании с собственными данными организации для определения подверженности риску каждого из сетевых узлов.

Группа  $R_4$  «затраты» определяется как стоимостная оценка ресурсов, использованных для функционирования ПЛС, они могут быть обозначены как совокупные затраты цепи поставок (Total Cost to Serve, TCS), которые включают в себя затраты для управления цепью поставок (Total Supply Chain Management Cost) и себестоимость проданных товаров (Cost of Goods Sold).

Группа  $R_5$  «эффективность» представлена обобщающими показателями эффективности функционирования ПЛС: рентабельность основных средств, рентабельность оборотных средств и длительность денежного цикла (Cash-to-Cash Cycle Time). Последняя показывает время с момента оплаты поставщику до момента прихода денег от покупателей за проданную продукцию и состоит из частных коэффициентов оборачиваемости отдельных элементов запасов. На стоимость запасов влияет качество их формирования, что учитывается через метрики: процент дефектных запасов, процент избыточных запасов, процент непригодных к эксплуатации запасов, предназначенных для технического обслуживания, текущего и капитального ремонта (Percentage Unserviceable MRO Inventory).

Показатели по каждой из пяти групп рассчитываются на основе компьютерного математического моделирования исследуемых вариантов ПЛС.

Объединение результирующих показателей в интегральный критерий можно выполнить через показатель «добавленная стоимость» (value added), величина которой зависит от значений частных результирующих показателей:

$$TVA = f(\mathbf{R}),$$

где  $TVA$  – совокупная добавленная стоимость (total value added);  $\mathbf{R}$  – массив результирующих показателей.

Считаем необходимым в оценке эффекта цифровой трансформации стоимость ПЛС определять доходным подходом, т. е. как суммарную стоимость денежного потока, созданного ПЛС и оставшегося в ее распоряжении.

Совокупная добавленная стоимость ( $TVA$ ) как оценочная величина эффекта от функционирования ПЛС за прогнозный период определяется по формуле

$$TVA = \sum_{t=1}^n \frac{VA_t}{(1+d_t)^t} + \frac{VA_n(1+i)}{(d_n-i)(1+d_n)^{n+1}},$$

где  $TVA$  – совокупная добавленная стоимость как оценочная величина эффекта от функционирования процесса за весь его жизненный цикл;  $n$  – прогнозный период, лет;  $VA_t$  – добавленная стоимость в году  $t$  прогнозного периода;  $d_t$  – ставка дисконта в году  $t$  прогнозного периода;  $i$  – ожидаемые долгосрочные темпы роста добавленной стоимости.

Тогда отношение полученной суммы к потребительской (исторической или восстановительной) стоимости ПЛС отразит, сколько процентов сверх стоимости активов готов переоплатить покупатель за ценность ПЛС, ее деловую репутацию, престижность, выгодное место расположения, деловые связи, опыт работы сверх вложенных первоначально средств, т. е. за все то, что понимается под конкурентоспособностью предприятия и отражается понятием «гудвилл».

**Факторы, влияющие на получение эффектов.** Факторы, способствующие или препятствующие достижению определенного уровня прогресса, преодоления разрыва между результативностью действующей ПЛС и требуемым ее уровнем, могут быть сгруппированы по принадлежности к элементу ПЛС.

Так, элементы ПЛС раскладываются в иерархическую структуру исходя из того, что ПЛС-совокупность связанных между собой объектов включает в себя потоки (*Flows, FL*) и систему управления (*Control, C*).

Поток определяется его элементами ( $EFl_i$ ), процессами ( $P_i$ ) и информационной подсистемой ( $D_i$ ) и может быть выражен зависимостью  $Fl_i = f(EFl_i, P_i, D_i)$ . Поток представляет собой движение в пространстве элементов потоков ( $EFl_i$ ) с определенной скоростью, изменением состояния, формы, полезности и стоимости элемента. Движение потока происходит в результате выполнения ряда процессов, что может быть обозначено как  $P_i = f(O_i, M_i)$ , в свою очередь зависящих от характеристик операций ( $O_i$ ), компонентов механизма исполнения операций ( $M_i$ ), включающего в себя рабочую силу, оборудование, инструменты, энергию, инфраструктуру. Поток управляется через информационную подсистему ( $D_i$ ). Для потока устанавливаются характеристики состояния его элементов, процессов и механизма ( $ID_i$ ) как первичные показатели, которые подлежат анализу в системе управления, точки активации ( $AP_i$ ), точки сбора первичных данных ( $DP_i$ ).

Система управления ( $C$ ) генерирует управленческий поток ( $E_c$ ), выполняя функции управления ( $CF_i$ ), используя систему обработки данных ( $CD_i$ ), что можно выразить как  $C_i = f(E_c, CF_i, CD_i)$ . Для реализации функции необходимо иметь компоненты исполнительного механизма ( $CM_i$ ), включая рабочую силу, оборудование, ИТ-системы, энергию, инфраструктуру. Тогда функции управления выразим как  $CF_i = f(CO_i, CM_i)$ . Система обработки данных ( $CD_i$ ) включает в себя приемник первичных данных ( $RD_i$ ) как сигналов обратной связи от управляемых потоков, передатчик управленческого воздействия ( $TD_i$ ) и систему метрик потока ( $SM_i$ ). Так, подсистема может выражаться  $CD_i = f(RD_i, TD_i, SM_i)$ .

В модели эффектов ЦТ ПЛС нами выделены следующие группы факторов.

*Группа управленческих факторов* – отражает влияние методов и механизмов принятия управленческих решений, используемых алгоритмов обработки данных. Негативное влияние могут оказать невыполнение плановых заданий, запаздывания с принятием решений, отсутствие адекватных алгоритмов реагирования, отсутствие контрольных точек, точек сбора и валидации информации и иные причины. Путем осуществления некапиталоемких оптимальных управленческих воздействий в форме изменения алгоритмов управления (планирования, анализа, контроля, регулирования) движением производственных потоков будет обеспечиваться повышение эффекта функционирования ПЛС в пределах созданной ее структуры.

*Группа организационных факторов* включает в себя проектирование и создание производственных процессов и алгоритмы движения потоков в пространстве и во времени. Получению эффекта препятствуют отклонения от оптимальных алгоритмов движения потоков по ряду организационных причин из-за неоптимальной расстановки компонентов механизма исполнения операций производственных процессов в пространстве, планирования расписаний, запаздывания реагирования на сигналы обратной связи от управляемых потоков, а также некорректного функционирования передатчика управленческого воздействия. За счет воздействия на организационные факторы можно получать эффекты путем создания и внедрения оптимальных режимов работы ПЛС посредством оптимального планирования производственных звеньев, маршрутизации движения элементов потоков, создания и поддержания графиков и расписаний перемещения материальных объектов по точкам обработки, складирования и транспортировки, создания и поддержания требуемого уровня запасов.

*Группа материальных факторов*, к которым мы относим неправильный подбор элементов потока, неоптимальную комбинацию компонентов механизма исполнения операций, трудовых ресурсов, производственных и логистических активов. Если пропускная способность или параметры функционирования ресурсов отличаются или непропорциональны в одних операциях по сравнению с другими, то это влияет на загрузку активов ПЛС, эффективность их использования по мощности и по времени. Подбор правильных активов с нужными их техническими и эксплуатационными характеристиками, а также мероприятия по техническому обслуживанию и ремонтам способствуют повышению эффекта.

**Алгоритм оптимизация системы на базе интеллектуального цифрового двойника.** Пошаговая выработка мер ЦТ ПЛС к ее элементам исходя из трех блоков внутренних и совокупности внешних факторов, позволяет, начиная с наименее капиталоемких решений, выполнять реинжиниринг ПЛС и моделировать поведение системы в результате внедрения мер трансформации в виртуальном пространстве. Интеллектуальный цифровой двойник (ИЦД) – система с двухсторонней связью реального и виртуального объекта киберфизической системы, предназначенная управлять им с высокой степенью автономности на базе динамического моделирования и фиксации эталонного, исторического и текущего поведения физического объекта [4]. Алгоритм оптимизации системы (рис. 2) предполагает комплекс методов и решений по оптимизации ПЛС исходя из группы факторов, обуславливающих отклонение от целевого уровня эффективности. Комбинация решений и воздействий на факторы повышения результативности позволяет получить дополнительные синергетические эффекты. Оптимизация ПЛС за счет подбора комбинации мер целенаправленного закономерного изменения свойств, связей и внутренней упорядоченности элементов ПЛС обеспечит создание наилучшего варианта ее архитектуры. Такой вариант создаст условия для наименьшего разрыва между реальным и желаемым уровнем характеристик системы.

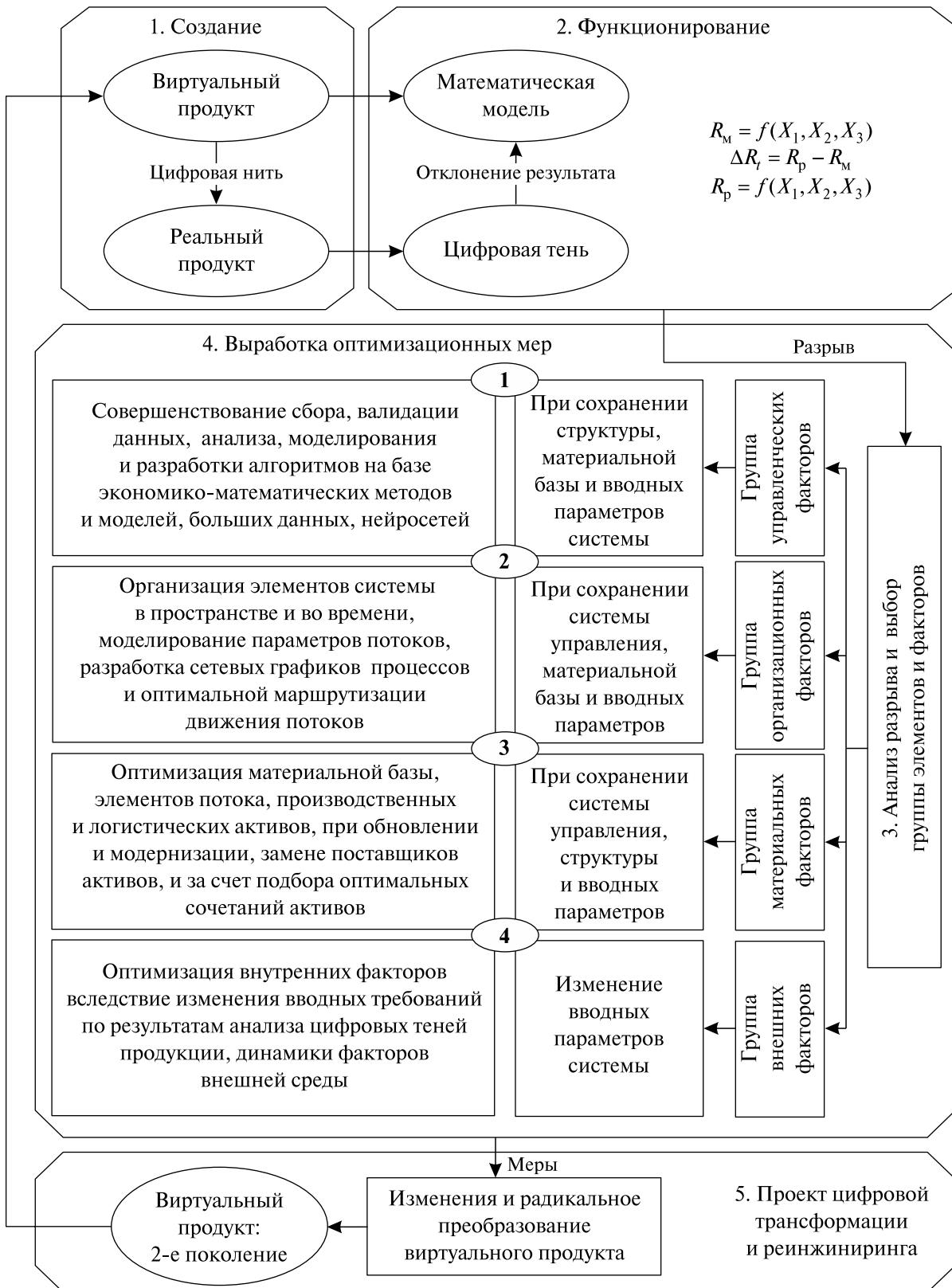


Рис. 2. Алгоритм оптимизации системы

Источник: разработано автором.

Fig. 2. System optimization algorithm

Source: author's developed.

Выделены четыре блока решений.

Блок 1. Повышение результативности за счет мер оптимизации управления при сохранении структуры, материальной базы и вводных параметров системы.

Блок 2. Повышение результативности с использованием мер оптимизации структуры при сохранении системы управления, материальной базы и вводных параметров системы.

Блок 3. Повышение результативности посредством мер оптимизации материальных факторов при сохранении системы управления, структуры и вводных параметров системы.

Блок 4. Повышение результативности путем применения мер оптимизации выше указанных факторов вследствие изменения вводных требований по итогам анализа цифровых теней продукции, динамики факторов внешней среды.

При формировании и ЦТ ПЛС предполагается, что требования потребителей продукции заранее определены и рассматриваются как лимитирующие составляющие получения эффекта на протяжении жизненного цикла, начиная от проектирования, функционирования, эксплуатации, технической поддержки и заканчивая ликвидацией продукта. Исходя из того, что факторы потребительских предпочтений, конкурентной ситуации (модель 5 сил М. Портера) и политических, экономических, социальных, технологических, юридических и экологических аспектов внешней среды (модели PESTLE) подвержены флуктуации, результативность и работоспособность созданной ПЛС находится под угрозой. Необходимо предусмотреть проверку изменения заложенных изначальных требований к продукции как результату функционированию ПЛС.

Модификация структуры выпускаемого изделия вследствие изменений предпочтений покупателей и результатов анализа цифровых теней, как правило, приводит к необходимости реструктуризации всей системы и выполнению процессов ее радикального преобразования.

Проект цифровой трансформации и реинжиниринга системы аккумулирует решения по оптимизации и радикальному преобразованию ПЛС. Меры оптимизации непосредственно изменяют совокупность взаимосвязанных и взаимообусловленных материальных, информационных, сервисных, финансовых потоков и активов в звеньях ПЛС в результате внедрения цифровых и инновационных технологий. Цифровая трансформация ПЛС может быть смоделирована через ИПД. Цифровая нить отражает поэтапное преобразование ПЛС и обеспечивает непрерывность цифровой среды между стадиями жизненного цикла ПЛС.

Цифровая нить используется как средство фиксации промежуточных состояний при смене и оптимизации элементов ПЛС в виртуальной модели. При эксплуатации ПЛС формируется цифровая тень, которая сопоставляется в ИЦД с целевыми данными о работе реального объекта, что дает возможность зафиксировать отклонение (разрыв) и произвести коррекцию и настройку математической модели по данным испытаний и работы в реальных условиях.

## Заключение

В результате проведенного исследования нами выделены и систематизированы эффекты цифровой трансформации ПЛС. Предложенная классификация эффектов цифровой трансформации ПЛС с выделением места проявления, способа обеспечения, формы проявления легла в основу разработки авторской методики моделирования эффектов цифровой трансформации производственно-логистических систем. В отличие от существующих, в методике реализован многокритериальный подход к моделированию: разработана совокупность частных показателей эффекта, предложен метод объединения результирующих показателей в интегральный критерий, описана система формализованных ограничений – факторов как внутренней, так и внешней среды функционирования ПЛС.

Методика предусматривает оценку эффекта по логистическим и экономическим показателям: надежность, оперативное реагирование, гибкость, затраты и эффективность. А их обобщение в интегральный критерий выполняется путем расчета совокупной добавленной стоимости (total value added) как суммарной стоимости денежного потока, созданного ПЛС и оставшегося в ее распоряжении, определенной посредством доходного подхода к оценке стоимости бизнеса.



Определение факторов, способствующих или препятствующих достижению определенного уровня эффекта, в отличие от существующих подходов, увязано с принадлежностью к элементу ПЛС, которые раскладываются в иерархическую структуру. Факторы сгруппированы исходя из их однородности, что позволило предложить алгоритм пошаговой выработки мер ЦТ ПЛС к ее элементам исходя из трех блоков внутренних и совокупности внешних факторов.

Сам процесс цифровой трансформации системы должен быть смоделирован и зафиксирован в виртуальном пространстве, а оптимальные решения реализованы в реальном. В этой связи интеллектуальный цифровой двойник процесса трансформации дает возможность реализовать предлагаемый алгоритм и моделировать различное сочетание оптимизационных мер для наиболее эффективного применения.

### Список использованных источников

1. Мясникова, О. В. Развитие производственно-логистических систем: теория, методология и механизмы цифровой трансформации / О. В. Мясникова. — Минск : Ин-т бизнеса БГУ, 2021. — 266 с.
2. Мясникова, О. В. Стратегия и тактика цифровой трансформации производственно-логистических систем / О. В. Мясникова // Соц. новации и соц. науки: [электронный журнал]. — 2022. — № 1. — С. 39–49. <https://doi.org/10.31249/snsn/2022.01.03>
3. Мясникова, О. В. Модель влияния технологий цифровой экономики на базовые элементы производственно-логистических систем / О. В. Мясникова // Экономика. Управление. Инновации. — 2021. — № 2 (10). — С. 53–59.
4. Мясникова, О. В. Интеллектуальный цифровой двойник производственно-логистической системы: методика построения и использования для оптимизации системы / О. В. Мясникова // Бизнес. Инновации. Экономика : сб. науч. ст. / Ин-т бизнеса БГУ. — Минск, 2023. — Вып. 7. — С. 103–116.
5. IDC FutureScape: Worldwide IT Industry 2020 Predictions [Electronic resource]. — Mode of access: <https://keyvatech.com/wp-content/uploads/2020/01/IDC-2020-Futures.pdf>. — Date of access: 07.09.2023.
6. ReportLinker Global Digital Transformation Spending in Logistics Industry [Electronic resource]. — 2023, September. — Mode of access: <https://www.reportlinker.com/p05960886/Global-Digital-Transformation-Spending-in-Logistics-Industry.html>. — Date of access: 27.09.2023.
7. Gurumurthy, R. Uncovering the connection between digital maturity and financial performance [Electronic resource] / R. Gurumurthy, D. Schatsky, J. Camhi // Deloitte Insights, 2020. — Mode of access: <https://www.snowdropsolution.com/pdf/Uncovering%20the%20connection%20between%20digital%20maturity%20and%20financial%20performance.pdf>. — Date of access: 07.09.2023.
8. Digital Transformation Survey Creating Products and Services in a Digital World [Electronic resource]. — Mode of access: [https://www.ptc.com/-/media/Files/PDFs/PLM/Digital\\_Transformation\\_Survey\\_Final\\_WEB\\_Single\\_Amend.pdf](https://www.ptc.com/-/media/Files/PDFs/PLM/Digital_Transformation_Survey_Final_WEB_Single_Amend.pdf). — Date of access: 07.09.2023.

### References

1. Miasnikova O.V. *Development of production and logistics systems: theory, methodology and mechanisms of digital transformation*. Minsk, 2021. 266 p. (in Russian).
2. Miasnikova O. V. Strategy and tactics of production-logistics systems digital transformation. *Social'nye novacii i social'nye nauki* [Social Novelties and Social Sciences], 2022, no. 1, pp. 39–49 (in Russian). <https://doi.org/10.31249/snsn/2022.01.03>
3. Miasnikova O. V. Model of digital economy technologies influence on the basic elements of production and logistics systems. *Ekonomika. Upravlenie. Innovatsii = Economics. Management. Innovations*, 2021, no. 2, pp. 53–59 (in Russian).
4. Miasnikova O. Intelligent digital twin of the production and logistics system: methodology of construction and use for system optimization. *Biznes. Innovatsii. Ekonomika = Business. Innovations. Economics*. Minsk, 2023, iss. 7, pp. 103–116 (in Russian).
5. IDC FutureScape: Worldwide IT Industry 2020 Predictions. Available at: <https://keyvatech.com/wp-content/uploads/2020/01/IDC-2020-Futures.pdf> (accessed 7 September 2023).
6. ReportLinker Global Digital Transformation Spending in Logistics Industry (2023). Available at: <https://www.reportlinker.com/p05960886/Global-Digital-Transformation-Spending-in-Logistics-Industry.html> (accessed 27 September 2023).

7. Gurusurthy R., Schatsky D., Camhi J. Uncovering the connection between digital maturity and financial performance. *Deloitte Insights*, 2020. Available at: <https://www.snowdropsolution.com/pdf/Uncovering%20the%20connection%20between%20digital%20maturity%20and%20financial%20performance.pdf> (accessed 7 September 2023).

8. Digital Transformation Survey Creating Products and Services in a Digital World. Available at: [https://www.ptc.com/-/media/Files/PDFs/PLM/Digital\\_Transformation\\_Survey\\_Final\\_WEB\\_Single\\_Amend.pdf](https://www.ptc.com/-/media/Files/PDFs/PLM/Digital_Transformation_Survey_Final_WEB_Single_Amend.pdf) (accessed 7 September 2023).

#### **Информация об авторе**

**Мясникова Ольга Вячеславовна** – кандидат экономических наук, доцент; доцент кафедры логистики, Институт бизнеса БГУ, e-mail: miasnikovaov1@gmail.com

#### **Information about the author**

**Miasnikova O.** – PhD in Economic sciences, Associate Professor; associate professor at the Department of logistics, School of Business of BSU, e-mail: miasnikovaov1@gmail.com

*Статья поступила в редколлегию 02.10.2023*

*Received by editorial board 02.10.2023*