

МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ФОРМИРОВАНИЯ ДОРОЖНОЙ КАРТЫ ПРИКЛАДНЫХ РЕШЕНИЙ ЦИФРОВОЙ ТРАНСФОРМАЦИИ ПРОИЗВОДСТВЕННО-ЛОГИСТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

О.В. Мясникова

*Институт бизнеса Белорусского государственного университета
Республика Беларусь, 220004, г. Минск, ул. Обойная, д. 7*

Введение. В контексте новой индустриализации экономики критическим фактором является наличие четкой методологии создания дорожной карты прикладных решений для цифровой трансформации производственно-логистических систем. Актуальность установления принципов и выстраивания алгоритма отбора решений в дорожную карту определяется необходимостью устойчивого развития системы на единой методологической основе исходя из онтологической сущности характеристик трансформируемого объекта.

Данные и методы. Исследование построено на изучении актуальной научной литературы, эмпирического опыта цифровизации отечественных и зарубежных предприятий. Решение поставленных задач ведется с использованием общенаучных методов (анализ и синтез, обобщение и аналогия) и специальных методов теории системного инжиниринга (методы онтологического анализа и инжиниринга, морфологического ящика, системного синтеза, цифрового моделирования).

Полученные результаты. Разработана методика формирования дорожной карты прикладных решений, включающая онтологическую модель формирования производственно-логистической системы, алгоритм подбора инновационных, логистических и цифровых технологий. Для доказательного использования методики рассмотрены ключевые вопросы концептуального моделирования архитектуры системы на основе онтологического инжиниринга. Новизна предлагаемых методологических решений заключается в установлении принципов оптимальности, системности, предиктивности и интегральности создания дорожной карты и в решении задачи взаимообусловленного подбора трансформирующих технологий в зависимости от характеристик элементов и слоев системы.

Заключение. Настоящее исследование является развитием теории и методологии управления развитием сложных социально-технических систем; служит элементом методологии управления трансформацией с применением интеллектуального цифрового двойника производственно-логистической системы. Предпосылки включения методики в процедуру разработки комплексной программы цифровой трансформации определяются удовлетворением требований эффективного использования ресурсов и экономического роста в сочетании с безопасностью и устойчивостью развития. В перспективе разработанная онтология может служить основой для формирования баз данных реализованных проектов трансформации, что позволит выйти на уровень цифрового бизнеса и работать по модели «база данных как услуга» (DataBase as a Service).

Ключевые слова: производственно-логистическая система, цифровая трансформация, методология, интеллектуальный цифровой двойник, моделирование, онтология, инжиниринг

Для цитирования:

Сведения об авторах:

Мясникова Ольга Вячеславовна (*miasnikovaov1@gmail.com*), канд. экон. наук, доцент, доцент кафедры логистики

On authors:

Myasnikova Olga Vyacheslavovna (*miasnikovaov1@gmail.com*), Ph.D. in Economics, Associate Professor, Associate Professor of the Logistics Department

METHODOLOGICAL FOUNDATIONS OF FORMING A ROADMAP OF APPLIED SOLUTIONS FOR DIGITAL TRANSFORMATION OF PRODUCTION AND LOGISTICS SYSTEMS

O.V. Myasnikova

*Institute of Business of the Belarusian State University
7, Oboynaya str., Minsk, 220004, Republic of Belarus.*

Introduction. In the context of the new industrialization of the economy, a critical factor is the availability of a clear methodology for creating a roadmap of applied solutions for digital transformation of production and logistics systems. The relevance of establishing principles and building an algorithm for selecting solutions in the roadmap is determined by the need for sustainable development of the system on a unified methodological basis based on the ontological essence of the characteristics of the transformed object.

Data and methods. The research is based on the study of current scientific literature, empirical experience of digitalization of domestic and foreign enterprises. The solution of the set tasks is carried out with the use of general scientific methods (analysis and synthesis, generalization and analogy) and special methods of the theory of system engineering (methods of ontological analysis and engineering, morphological box, system synthesis, digital modeling).

Obtained results. The methodology of formation of the roadmap of applied solutions including ontological model of formation of production-logistic system, algorithm of selection of innovative, logistic and digital technologies is developed. The key issues of conceptual modeling of the system architecture on the basis of ontological engineering are considered to prove the use of the methodology. The novelty of the proposed methodological solutions lies in the establishment of the principles of optimality, systematicity, predictability and integrality of the roadmap creation and in the solution of the problem of mutually agreed selection of transforming technologies depending on the characteristics of elements and layers of the system.

Conclusion. The present study is a development of the theory and methodology of management of development of complex socio-technical systems; it serves as an element of the methodology of transformation management with the use of an intelligent digital twin of the production and logistics system. The prerequisites for including the methodology in the procedure of developing a comprehensive program of digital transformation are determined by meeting the requirements of efficient resource use and economic growth in combination with security and sustainability of development. In the future, the developed ontology can serve as a basis for the formation of databases of realized transformation projects, which will allow to reach the level of digital business and work on the model "DataBase as a Service" (DataBase as a Service).

Keywords: production and logistics system, digital transformation, methodology, intellectual digital twin, modeling, ontology, engineering.

For Citation:

Myasnikova O.V. Methodological bases of forming a roadmap of applied solutions of digital transformation of production-logistic systems // Production Organizer. 2024. Vol.32. No.1. Pp. 107-120. DOI: 10.36622/1810-4894.2024.54.75.009

Введение

Производственно-логистическая система (ПЛС) – относительно устойчивая совокупность звеньев цепи создания ценности, взаимосвязанных в пределах цикла производства в едином

процессе управления материальными, сервисными и сопутствующими им потоками.

В контексте новой индустриализации экономики формирование ПЛС претерпевает существенные изменения. Проведенные ранее ис-

следования позволили развить теорию и методологию и сформулировать комплексный целостный подход к цифровой трансформации ПЛС (ЦТ ПЛС), включая ее концепцию, принципы, модели, стратегии, тактику и сценарии [1, 2]. Ограниченный объем публикации не позволяет отдельно рассматривать каждый элемент теоретико-методологических положений, концепций, моделей и их взаимосвязи. Поэтому содержание и особенности их применения представлены в статье соответствующими ссылками на литературу.

В качестве объекта нами рассматривается ПЛС как сложная открытая адаптивная социально-техническая система. Предметом рассмотрения являются методические основания для планирования и освоения технологий при ЦТ ПЛС. Нами доказано, что в условиях цифровой трансформации экономики и становление V–VI технологических укладов развитие производства происходит через реализацию стратегий построения социо-киберфизических систем, виртуализации производства, формирования сетевого производства и стратегии цифрового бизнеса [2]. Устойчивое развитие ПЛС обеспечивается освоением ряда инновационных, логистических и цифровых технологий, методов интеллектуализации управления и организации производства, в комплексе способных придать новые и повысить уровень существующих свойств и характеристик системы, ее оптимальность, гибкость, адаптируемость, эффективность, устойчивость, безопасность [1]. На этой основе система генерирует научно-технический, организационно-производственный, социальный, экономический и кибернетический эффекты, которые определяются по разработанной методике моделирования эффектов ЦТ ПЛС и с использованием алгоритма оптимизация системы на базе интеллектуального цифрового двойника [3].

Осуществление процессов ЦТ ПЛС в соответствии с комплексной программой [4], что приводит нас к необходимости рассмотрения проблемы определения состава внедряемых технологий и методов их отбора и комбинации для включения в программу. В развитии данной проблематики в настоящей статье поставлена цель исследования – разработать методику формирования дорожной карты прикладных решений цифровой трансформации производственно-логистических систем. Задачи исследования: раскрыть сущность и предложить онтологиче-

скую модель формирования ПЛС, определить содержание и принципы создания дорожной карты; разработать алгоритм подбора инновационных, логистических и цифровых технологий при формировании дорожной карты прикладных решений трансформации системы.

Решение указанных задач связано с развитием выделенных ранее методологических подходов к осуществлению ЦТ ПЛС, таких как методика построения интеллектуального цифрового двойника ПЛС на базе создания и интеграции цифровых двойников продуктов, производственных процессов, потоков и систем управления [5], а также стратегией создания цифрового бизнеса по модели «база данных как услуга» (DataBase as a Service).

Теория.

Последние годы возрос интерес к практическому внедрению подхода системного инжиниринга (СИ), который продвигает организацию, ориентированную на процессы в соответствии со стандартом ISO 15288:2015 [6], и пропагандирует роль и важность моделирования и дает представление о подходе к разработке систем на основе моделей (Model-based systems engineering, MBSE). Согласно руководству по СИ (2015): «СИ появился как эффективный способ управлять сложностью и изменениями. Поскольку как сложность, так и изменения в продуктах, услугах и обществе продолжают расти, снижение рисков, связанных с новыми системами или модификациями сложных систем, продолжает оставаться основной целью системного инженера» [7].

Исходя из того, что СИ рассматривается нами основным подходом к формированию ПЛС, то применение MBSE в решении ключевых вопросов ее создания и изменения является наиболее актуальным. Следует отметить работу Гаричева С.Н. и др. (2022), в которой показана связь моделей системного инжиниринга от более простых представлений к более детальным: онтологические модели – архитектурные модели – параметризованные архитектурные модели – тематические модели – компьютерные модели [8].

Архитектура системы выстраивается в ходе ее концептуального моделирования, что логично приводит нас к рассмотрению моделей, основанных на онтологиях (Ontology-based model) и онтологическому инжинирингу как методу их создания. Онтологический инжиниринг (ОИ) изучает методы и методологии проектирования он-

тологий (Ontology Engineering Methodologie, OEM) и поддержки их эволюции на протяжении всего жизненного цикла.

Онтология – это формальная и явная спецификация общей концептуализации предметной области знаний, которая может эффективно поддерживать общее понимание концепций и отношений, составляющих эту предметную область (Гуарино и др., 2009) [9]. Онтология – это концептуальное представление сущностей, событий и существующих отношений, которые описывают конкретную предметную область.

Основные компоненты онтологий – это концепты (классы, и сущности), свойства концептов (слоты, атрибуты, роли), отношения между концептами, некоторые ограничения (фацеты ограничения ролей). Представление набора понятий и их отношений, основными из которых являются абстракция (подчинение) и композиция (отношение целое - часть), в спецификации и затем в базе знаний осуществляется в иерархической форме в виде схем или концептуальных карт [10].

Создается онтология как формализованная математическая модель некоторой области знаний с использованием принципов технологии ODA (Ontology Driven Architectures) [11] на основе описания требуемых компонентов – графических схем, расчетных модулей, списка решаемых задач, числовых данных, подготовленных на основе информационного обследования объекта.

Основное назначение онтологии заключается в определении формальной семантики некоторого знания, в сочетании с удобными формами хранения и представления для восприятия. Идея состоит в том, чтобы использовать онтологии для улучшения понимания запроса и рассматриваемых/искомых информационных объектов, чтобы генерировать более точный и релевантный результат поиска (El Alaoui M. et al., 2023) [12].

Процесс создания онтологии в краткой форме определен в работе [13] следующим образом:

1. Определите предметную область и область охвата онтологии (например, с учетом вопросов о компетентности и общих критериев).

2. Рассмотрите возможность повторного использования существующих онтологий.

3. Определите ключевую терминологию, которая будет использоваться в планируемой онтологии

4. Определите классы и иерархию классов ('концепции' также используются как синоним

классов. Обычно классы могут быть коллекциями объектов или экземплярами).

5. Определите свойства классов (также называемых слотами).

6. Определите допустимые значения для свойств (или фасетов, например, фасетов слотов).

7. Заполните классы экземплярами.

Вопросы использования онтологий в СИ рассматривались в частности в работе (Yang et al., 2019) [14], в которой сравнивались области применения, ключевые концепции и ключевые свойства существующих онтологий СИ и был сделан вывод о том, что в областях СИ и MBSE было предпринято много попыток разработать функциональную общую и взаимообусловленную онтологию для использования в СИ, однако эти онтологии неполны (ни одна из них на самом деле не охватывает все концепции и аспекты СИ) и не согласованы семантически.

При создании онтология относительно предметной области «проектирование» заслуживает внимания работа (Green, St et al. 2014) [15], в которой описаны шаги по созданию онтологии процесса проектирования. Так, выделены предметная область проектирования, его классы и подклассы в разрезе представления проектирования через процессный подход в форме «вход – процесс – выход» (*Input-Process-Output*). В классе «процесс» определены подклассы *Motivation* мотивация (мотивы и потребности как движущие силы проекта), *Scale* масштаб (содержание, временные рамки, сложность проектируемых задач), *Path* путь (факторы определяющие выбор методологии), *Design Process Structure* структура или методология процесса проектирования, которая включает *Methods* методы и *Activity Behaviour* поведение в процессе деятельности.

Опираясь на литературные обзоры ряда исследователей [16, 17, 18] и сравнительный анализ OEM, позволил нам утверждать, что большинство методологий придерживаются единого подхода к созданию онтологий, а именно обеспечивают анализ предметной области, концептуализацию, реализацию, оценку, создание экземпляров и предоставляют пример онтологии предметной области.

Бухаров, М. Н. в работе [19] выделяет в рамках онтологического моделирования *спецификацию* (построение глоссария терминов), *концептуализацию* (определение объектов предметной области и их иерархии, связи между ними),

формализацию (определение мегаобъектов и связи между ними, которые соответствуют объектам и связям между объектами) и *актуализацию* (определение параметров объектов предметной области и их значения, классы, подклассы и экземпляры классов).

Массель Л. В. и Ворожцова Т. Н. в работе [20] указывает, что онтологическое моделирование состоит из следующих этапов: 1) декомпозиция моделируемого фрагмента реальности на отдельные элементы (объекты), которые являются базовыми элементами модели; 2) идентификация объектов, результатом которой является их однозначное обозначение; 3) классификация, которая зависит от целей моделирования и области применения; классы, как правило, образуют таксономию, иерархию; 4) выделение свойств объектов, их типов и ограничений; 5) дополнение онтологии набором правил для получения логических выводов.

В работе [21] исследователи (D. Spoladore и др., 2023) выделили несколько типов методологий:

- каскадное проектирование, которое предусматривают жестко упорядоченную последовательность шагов, которые должны быть выполнены для достижения разработки онтологии;

- подход жизненного цикла онтологии, который рассматривает ее как развивающийся продукт обычно в сочетании с итеративным процессом проектирования;

- Agile-подход, который предусматривает быстрое прототипирование и разработку моделей в итеративном цикле при коллаборации с заинтересованными в разработке сторонами.

В последнее десятилетие гибкие методологии в области системной инженерии также проникли в разработку систем управления знаниями на основе онтологий (Moge et al., 2022) [22]. В работе [23] (Kotis K. I., и др. 2020) отмечается, что методология проектирования онтологий (Ontology Engineering Methodologie, OEM) должна поддерживать все вовлеченные заинтересованные стороны на этапах спецификации, разработки, эксплуатации и оценки онтологий. А в связи с большими объемами создаваемых данных, акцент ОИ был смещен на поддержку data-driven подхода к разработке онтологий через установления связей спецификаций со экспертными знаниями для понимания данных, оценки их качества, а также преодоление неоднородности между источниками данных.

Таким образом, OEM смещается в сторону Agile и кастомизированных методологий, в частности, гибких, упрощенных и коллаборативных разработок, чтобы лучше отвечать конкретным потребностям.

Методика формирования дорожной карты прикладных решений ЦТ ПЛС.

Цель разработки методики формирования дорожной карты прикладных решений ЦТ ПЛС заключается в обоснованном включении цифровых, логистических и инновационных решений в план осуществления ЦТ ПЛС.

Основная идея подхода заключается в том, что содержание дорожной карты основывается на целевых установках изменения компонентов и связей в ПЛС и оперативно модифицируются при их изменениях. Исходная информация для планирования дорожной карты формируется на основании стратегических решений освоения новых бизнес-моделей работы ПЛС.

Скорость появления и стоимость освоения цифровых, инновационных и логистических технологий позволяет повысить степень их доступности, что влечет за собой реальность обновление всех элементов, в которых используется данные технологии. Поддержка и обновления элементов ПЛС, несомненно, дорога, что требует подбора таких решений, реализация которых наиболее эффективным образом изменит систему исходя из индивидуальные потребности и параметров системы.

В дорожной карте ЦТ находит отражение набор мероприятий, которые должны быть согласованы по последовательности и времени осуществления, ресурсам и инфраструктурному обеспечению.

Создания дорожной карты должно быть основано на следующих принципах:

- **оптимальности**, который требует включение прикладных решений, обеспечивающих вариант ЦТ ПЛС, приближающий ее структуру к желаемому образу-модели. Минимальный разрыв (gap) между фактически достигнутым (моделируемым) и целевым уровнем результирующих показателей, которые образуют показатель эффекта ЦТ ПЛС, предлагается оценивать для каждого набора решений.

- **системности**, который требует оценку совокупного влияния прикладных решений на компоненты и связи в ПЛС;

- **предиктивности**, который требует включение в план прикладного решения с ориентаци-

ей на будущее, решающих перспективные задачи и проблемы;

- **интегральности**, который требует оценку сочетания различных решений с выделением совокупного влияния на эффект и учета создаваемых угроз.

Методика формирования дорожной карты прикладных решений ЦТ ПЛС включает в себя последовательное осуществление следующих шагов:

- 1) установление целей ЦТ ПЛС;
- 2) анализа элементов, подсистем (слоев) ПЛС и создание базы знаний о их свойствах и характеристиках;
- 3) формирование пула цифровых, логистических и инновационных решений;
- 4) проведение онтологического анализа применимости прикладных решений к условиям и характеристикам конкретной ПЛС исходя из целей развития;
- 5) подбор приемлемых решений из пула для включения в дорожную карту.

При создании дорожной карты прикладных решений трансформации системы основным процессом становится инжиниринг онтологической модели формирования ПЛС.

Онтологическая модель формирования ПЛС.

Потребность в разработке онтологии формирования ПЛС возникает в связи с необходимостью:

- совместного использования общего понимания структуры ПЛС;
- моделирования элементов ПЛС, что требует проведения анализа соответствия между объектом и его свойствами и для восприятия объекта в качестве варианта понятия;
- проектирования системных изменений, планов формирования и развития ПЛС на основе свойств общности и изменчивости;
- повторного использования знаний при моделировании ПЛС.

Применение онтологий позволяет использовать терминологию системно и наглядно представить взаимосвязи между элементами ПЛС и их характеристиками, факторами влияния, а также позволяет выстроить алгоритм проведения анализ и оценки воздействия технологий на деятельность ПЛС.

Решение задач модельно-ориентированного синтеза системы мы базируем на подходах, рас-

крытых в работе [8]. Так, на первом шаге формируется онтологическая модель, в семантической форме отражающих термины и понятия сущностей и их связанностей, используемые при представлении предметной области (в нашем случае формирования ПЛС). На втором шаге архитектурная модель в табличной или графической форме раскрывает состав и онтологии учитываемых сущностей, их декомпозицию и связанности. В ходе разработки онтологических структур были определены классы онтологии; создана иерархия классов (определены базовых классов, подклассов); описаны свойства классов (свойства-литералы для характеристик объекта и свойства-связи между ними), их допустимых значений (ограничения: тип принимаемого значения; диапазон возможных значений; количество возможных значений; обязательность). В свою очередь создание конкретного экземпляра фреймворка архитектурных моделей ПЛС осуществляется путем: задания задач и границ моделирования; требований и политик моделирования; идентификации, гармонизации и занесения записей о системе в шаблоны используемых фреймворков.

В ходе создания онтологии и архитектурной модели ПЛС нами определены агрегаты модели, разделяющую модель по сферам назначения:

- 1) состав элементов ПЛС – содержательная часть системы;
- 2) прикладные решения – ресурсно-технологическая часть системы;
- 3) проектирования системных изменений – управленческая часть системы.

Трансформация ПЛС как деятельность по переходу из изначального состояния ПЛС в новое в соответствии с требованиями описывается следующей моделью. На рис. 1 показан фрагмент разработанной онтологии и архитектурной модели формирования ПЛС, где отражены связи-литералы (сплошные линии) и связи отношения (пунктирные линии).

Относительно предметной области «состав элементов ПЛС» в онтологию включены следующие сущности: элементы ПЛС - совокупность связанных между собой потоков и системы управления. Расширение концептов онтологии путем детализации иерархической древовидной структуры ПЛС позволяет выделить выделением ее элементов, подсистем (слоев), компонентов.

Классы потока представлены элементами потока, процессами и информационной подси-

стемой, а системы управления - управленческим потоком, функциями управления и системой обработки данных. Выделены подклассы операции, компоненты механизма исполнения операций

(для класса процессы и класса функции управления), первичные данные о потоке (в разрезе элементов потока, процессов и компонентов

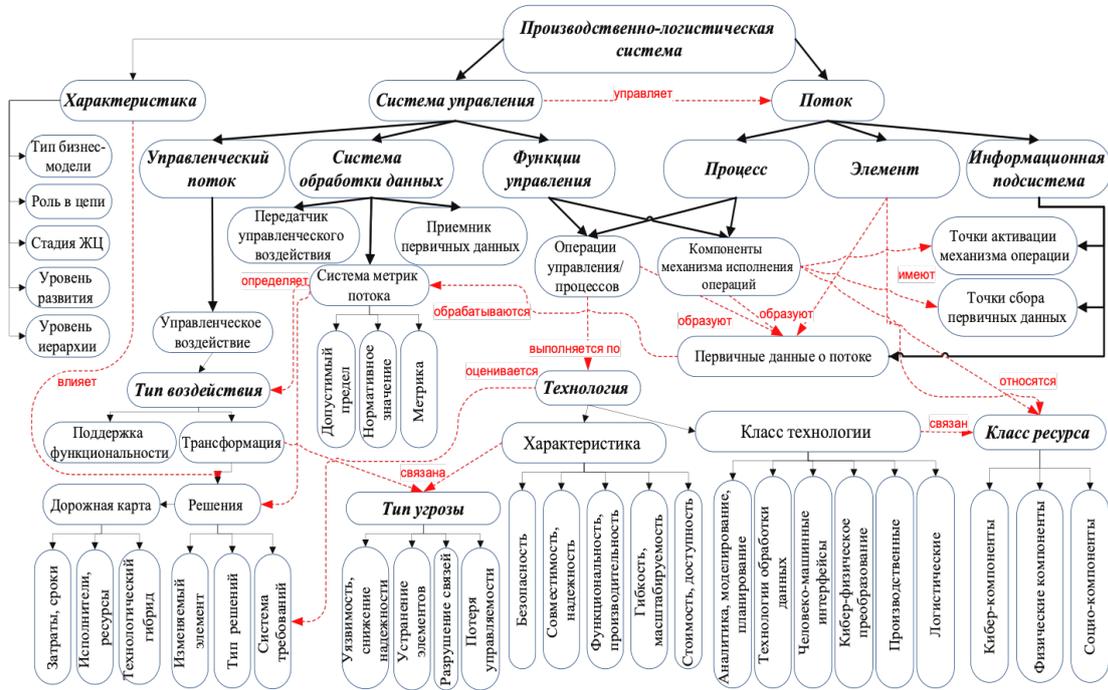


Рис. 1. Фрагмент онтологии и архитектурной модели формирования производственно-логистической системы

Fig. 1. The ontology and architectural model fragment of the formation of the production and logistics system

механизма исполнения), точки активации механизма операции, точки сбора первичных данных (для информационной подсистемы), приемник первичных данных, передатчик управленческого воздействия, система метрик потока (для системы обработки данных).

Относительно предметной области «прикладные решения» в онтологию включены классы ресурсы и технологии. Для последних определены подклассы технологий и их характеристики, которые оказывают влияние на их отбор в дорожную карту. Технологии являются определяющим фактором для осуществления операций и использования ресурсов.

Проектирование системных изменений как предметную область онтологии отражает управленческая часть системы.

Система метрик потока определяет отклонение первичных данных о потоке (прежде всего скорость, затраты, потери) от нормативных значений, причины и места возникновения отклонений и устанавливает тип воздействия.

Она определяет и содержание решений трансформации дорожной карты в части изменяемых элементов системы (сущности, класс и подклассы) и тип решений, а также устанавливает требования к инструментам трансформации.

Характеристики ПЛС (тип бизнес-модели, роль в цепи, стадия жизненного цикла (ЖЦ), уровень развития, уровень иерархии) отвечают за определение целей и внешних ограничений управленческого воздействия и отражение их в стратегии и планах трансформации. Цели и ограничений, определяемые характеристиками ПЛС, влияют на решения в рамках трансформации. Технологии как инструменты трансформации ПЛС в пул возможных решений включаются по результатам сопоставления характеристик технологии с требованиями развития согласно разработанному алгоритму.

Построенная онтологическая модель в методике используется для решения ряда задач:

1) описательная задача – классификация элементов ПЛС, создание базы данных по цифровым технологиям, бизнес-моделям и связанным с ними угрозами.

2) проектная – для интеллектуальной поддержки принятия решений по синтезу архитектуры ПЛС;

3) плановая – взаимообусловленный подбор трансформирующих технологий в зависимости

от характеристик элементов и слоев системы и формирования прикладной программы ЦТ ПЛС.

4) контрольная – на базе модели фиксируется достигнутый уровень развития ПЛС и ее цифровой зрелости.

5) обучающая – на базе модели происходит передача знаний пользователям и исполнителям.

Отбор конкретных инструментов трансформации ПЛС в дорожную карту будет производиться на базе разработанного алгоритма в методике формирования дорожной карты прикладных решений.

Алгоритм подбора инновационных, логистических и цифровых технологий при формировании дорожной карты прикладных решений трансформации системы.

Дорожная карта цифровой трансформации является документом, отражающим комплекс решений, согласованных по последовательности и времени осуществления, ресурсам и инфраструктурному обеспечению, который позволяет планировать и осуществлять освоения технологий при цифровой трансформации системы. Важнейший элемент дорожной карты – технологический гибрид инноваций, который за счет агрегирования различных технологий в модуль совместного использования, позволяет получить дополнительные эффекты от объединения решений по трансформации.

На рис. 2 показано место методики формирования дорожной карты в алгоритме оптимизации системы на базе интеллектуального цифрового двойника (ИЦД) [5]. Функционирование системы зафиксировано в ИЦД в системе первичных параметров потока. Выполняется формирование метрик, сопоставление реальных (Rp) и моделируемых (Rm) результатов работы ПЛС и проверка соответствия их отклонения заданными лимитами (в блоке «Система метрик потока»). В случае выхода отклонения за допустимые лимиты необходимо внести изменение в систему. Алгоритм предусматривает выбор комплекса методов и решений оптимизации – технологий трансформации.

Состав решений в дорожной карте реформирования ПЛС определяется совокупностью требований к ожидаемым результатам синтеза системы выбранными инструментами трансформации. Структура алгоритма выбора технологии трансформации с учетом требования гибкости и адаптивности может выглядеть следующим образом:

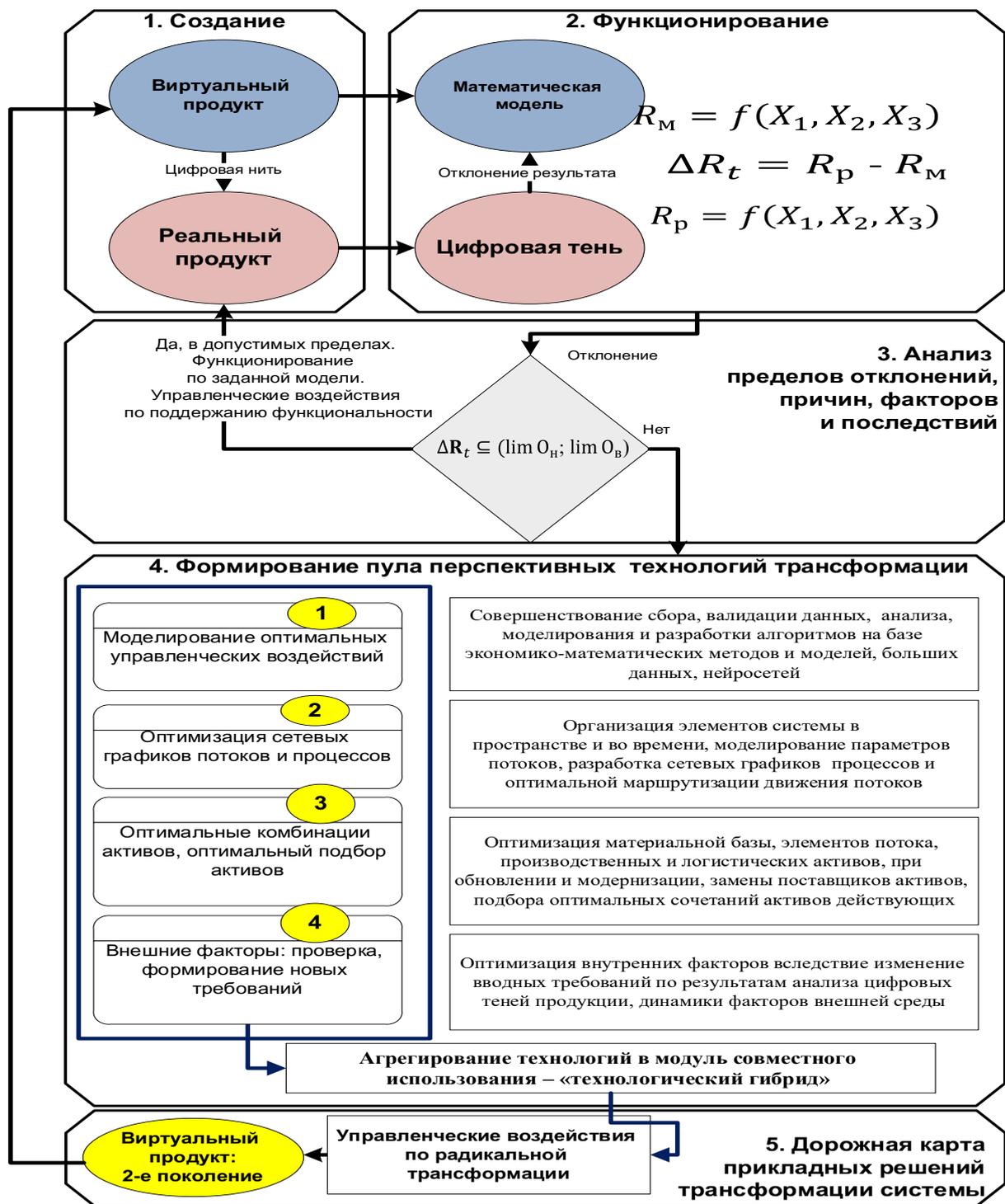


Рис. 1. Методика формирования дорожной карты в алгоритме оптимизации системы на базе интеллектуального цифрового двойника

Fig. 1. The roadmap forming methodology in the system optimization algorithm based on an intelligent digital twin

1. Определение целей трансформации, требований к ПЛС. Основные требования к назначению ПЛС (скорость продвижения потока; качество движения потока (частота ошибок, надежность); стоимость продвижения потока), к качеству системы (надежность; оперативное реагирование; управляемость; затраты; эффективность; безопасность; бездефектность; удобство технического обслуживания), к возможности развития системы (адаптивность; гибкость; модульность; расширяемость; устойчивость).

2. Оценка существующей инфраструктуры и технологического стека. Определение изменяемых элементов как «узких мест» системы через оценку уровня удовлетворения требований по шкале (0, 1, 2, 3), что соответствует характеристикам: не проявляется, низкий, средний и высокий уровень проявления требования. Необходимо повысить уровень удовлетворенности в ПЛС посредством целенаправленного воздействия на один из элементов, классов или подклассов ПЛС, последовательно реализуя решения по трансформации.

3. Исследование доступных технологий: цифровых, логистических и инновационных технологий [1, 3, 4]. Характеристика различных технологий, их особенности, возможности, ограничения использования для трансформации. Проведение пробного тестирования (Proof of Concept, PoC). Разработка и проведение тестового кейса или концепции для оценки работоспособности и гибкости выбранных технологий. Анализ результатов PoC с точки зрения соответствия требованиям адаптивности и гибкости.

4. Установка критериев подбора технологий. Определение ключевых критериев, на основе которых будут приниматься решения: 1) Эффективность и скорость работы технологии, особенно при обработке больших объемов данных. 2) Возможность интеграции с другими системами и платформами. 3) Гибкость и масштабируемость для поддержки изменяющихся потребностей. 4) Безопасность и возможности шифрования и защиты данных, контроля доступа и аутентификации пользователей. 5) Надежность, стабильность работы технологии, включая отказоустойчивость и восстановление после сбоев. 6) Инструменты и возможности для разработки, отладки и тестирования процессов трансформации данных. 7) Стоимость внедрения, обслуживания и обновления технологии. 8) Поддержка пользовательского опыта и удобства использования для конечных

пользователей. 9) Учет факторов-ограничений: доступность ресурсов, опыт внедрения, сроки и бюджет проекта.

5. Формирование пула перспективных цифровых, логистических и инновационных технологий трансформации. Разработка и отражение в формате морфологической модели пула альтернатив технологий, а также совместимости альтернатив технологий между собой. На базе морфологической модели анализ сочетания различных технологий и определение наилучших из них исходя из целей и требований к эффективности ПЛС. Определение совместимости текущей инфраструктуры и технологического стека с потенциальными технологиями. Принятие решения на основе анализа и сравнения технологий, с учетом их гибкости и адаптивности. Учет потенциала технологий в поддержке будущих изменений и потребностей бизнеса.

6. Комбинаторный синтез альтернативных конфигураций технологий. Создание альтернативных конфигураций решений, сочетающих различные технологии, инструменты, фреймворки и платформы для удовлетворения требований онтологии ПЛС. Исследование комбинаций технологий с целью оптимизации решения задачи цифровой трансформации. Выполнение подробного анализа различных комбинаций технологий на основе определенных критериев. Применение методов сравнительного анализа для выбора наилучшей конфигурации технологий.

7. Подготовка решений по трансформации компонентов ПЛС с выделением их характеристик – тип решений (изменение / улучшение, исключение, добавление, объединение, стандартизация), изменяемый элемент, стоимость осуществления (затраты, сроки, исполнители, ресурсы), требуемый ресурс (единичная технология или гибриды), получаемый эффект. Отражение решений в дорожной карте прикладных решений трансформации системы.

Решения по трансформации можно объединить в блоки (X_i): 1) управленческие решения, включая внедрение новых эффективных алгоритмов обработки данных, принятия управленческих решений; 2) организационные, включая оптимизацию производственных процессов, алгоритмов движения потоков; 3) изменения материальных компонентов механизмов осуществления процессов, включая элементы потока, производственные и логистические активы, компоненты информационной системы.

Пошаговое применение мер оптимизации позволяет, начиная с наименее капиталоемких решений, выполнять обратный инжиниринг ПЛС и моделировать поведения системы в результате внедрения мер оптимизации в виртуальном пространстве ИЦД.

В отличие от существующих, в модели основным элементом предусмотрено агрегирование технологий в модуль совместного использования – «технологический гибрид». Это позволяет получить дополнительные эффекты от объединения технологий, изменяющих организацию потоков в пространстве и во времени (оптимизация параметров потоков, сетевых графиков планирования и маршрутизации движения потоков); материальную базу системы (подбор и комбинация компонентов исполнительных механизмов); управление системой (улучшение сбора, валидации данных, моделирования, больших данных, нейросетей). По итогам моделирования освоения технологий в новых условиях создается виртуальный продукт и на его базе новый реальный объект – ПЛС 2-ого и последующих поколений, а в дальнейшем цикл совершенствования повторяется. Накопленная база данных о внедрениях позволит не только оптимально подбирать технологии под решение проблем, но и работать по модели «база данных как услуга» (DataBase as a Service), тем самым реализовать стратегию цифровой трансформации ПЛС - построение цифрового бизнеса.

Полученные результаты.

Разработана методика формирования дорожной карты прикладных решений, включающая онтологическую модель формирования производственно-логистической системы, алгоритм подбора инновационных, логистических и цифровых технологий. Для доказательного использования методики рассмотрены ключевые вопросы концептуального моделирования архитектуры системы на основе онтологического инжиниринга. На основе анализа ключевых компонентов системы нами сформулирована онтологическая модель процесса формирования ПЛС, которая обеспечивает компоновку цифровых инструментов для процессов и ресурсных элементов ПЛС.

Таким образом подбор технологий в дорожную карту прикладных решений трансформации системы проводится путем последовательного применения математических моделей иерархического моделирования системы, морфологиче-

ской модели и решения задач многокритериального анализа, комбинаторного синтеза оптимальных решений. Применение цифровых двойников при моделировании конфигурации системы нового поколения позволит иметь виртуальный прототип системы с оптимальными значениями параметров потоковых процессов в ПЛС, а непрерывную фиксацию изменений системы по результатам анализа цифровых теней ПЛС.

Новизна предлагаемых методологических решений заключается в установлении принципов оптимальности, системности, предиктивности и интегральности создания дорожной карты и в решении задачи взаимообусловленного подбора трансформирующих технологий в зависимости от характеристик элементов и слоев системы.

Заключение.

Уточнено понятие «дорожная карта цифровой трансформации» как документ планирования освоения технологий при цифровой трансформации системы, отражающий комплекс мероприятий, согласованных по последовательности и времени осуществления, ресурсам и инфраструктурному обеспечению.

Разработана методология формирования дорожной карты прикладных решений, включающая онтологическую модель формирования производственно-логистической системы, алгоритм подбора инновационных, логистических и цифровых технологий в дорожную карту.

Подбор эффективных единичных и гибридных решений из пула технологий осуществляется путем проведения морфологического анализа применимости и комбинации прикладных решений к условиям и характеристикам конкретной ПЛС исходя из целей развития и требований к ее составу. Решения по созданию технологического гибрида принимаются на основе комбинаторной оптимизации и обеспечивают эмерджентный эффект. Оценка решений с учетом целевой функции и ресурсных ограничений проводится исходя из уровня удовлетворенности требованиям и стоимости решений. Предложенный метод используется для планирования поэтапного осуществления процессов трансформации ПЛС на базе цифровых двойников и обеспечивает повышение получаемого эффекта и качества системы, генерацию новых поколений системы с требуемыми свойствами при оптимальных затратах.

Выводы, онтологическая модель и алгоритм будут полезны в ходе тактического планирова-

ния цифровой трансформации производственно-логистических систем.

Библиографический список

1. Мясникова, О.В. Развитие производственно-логистических систем: теория, методология и механизмы цифровой трансформации. Минск, Институт бизнеса БГУ, 2021. 266 с.

2. Мясникова, О.В. Стратегия и тактика цифровой трансформации производственно-логистических систем // Социальные новации и социальные науки. 2022. № 1. С. 39–49. DOI: 10.31249/snsn/2022.01.03.

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

4. Мясникова О.В. Программа цифровой трансформации производственно-логистических систем: методические аспекты разработки. Цифровая трансформация. 2022. №28(4). С.18-27. <https://doi.org/10.35596/1729-7648-2022-28-4-18-27>

5. 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.

6. ISO/IEC/IEEE 15288:2015 Systems engineering—System life cycle processes International Organization for Standardization (2015)

7. INCOSE Systems Engineering Handbook: A Guide for System Life Cycle Processes and Activities, 4th Edition. Edited by D. D. Walden, G. J. Roedler, K. J. Forsberg, R. D. Hamelin, and T. M. Shortell. Hoboken, US-NJ: Wiley.

8. Гаричев С.Н., Горбачев Р.А., Давыденко Е.В., Джапаров Б.А., Кондратьев В.В. Модельно-ориентированный инжиниринг физико-технических, информационных и интеллектуальных систем // Труды МФТИ. 2022. №2 (54). С.149–161.

9. Guarino, N., Oberle, D., Staab, S. (2009). What is an ontology? Handbook on Ontologies.

Springer,, Berlin, Heidelberg, pp. 1–17. DOI: 10.1007/978-3-540-92673-3_0.

10. Rousseau, D., Billingham, J., & Calvo-Amodio, J. (2018). Systemic semantics: A systems approach to building ontologies and concept maps. *Systems*, 6(3), 32.

11. Ontology Driven Architectures and Potential Uses of the Semantic Web in Systems and Software Engineering. URL: <https://www.w3.org/2001/sw/BestPractices/SE/OD A/>.

12. El Alaoui, M., Chapurlat, V., Rabah, S., Richet, V., & Plana, R. (2023). An approach for ontology-based research and recommendation on systems engineering projects. *Procedia Computer Science*, 225, 1350-1359.

13. Noy, N. F. and McGuinness, D. L. (2001). *Ontology Development 101: A Guide to Creating Your First Ontology*. Stanford, CA:Stanford University. Available at: https://protege.stanford.edu/publications/ontology_development/ontology101.pdf [accessed 10 October 2023].

14. Yang, L., Cormican, K., & Yu, M. (2019). Ontology-based systems engineering: A state-of-the-art review. *Computers in Industry*, 111, 148-171.

15. Stephen Green, Darren Southee & John Boulton (2014) Towards a Design Process Ontology, *The Design Journal*, 17:4, 515-537, DOI: 10.2752/175630614X14056185480032

16. Alfaifi, Y. (2022, January). Ontology development methodology: a systematic review and case study. In 2022 2nd International Conference on Computing and Information Technology (ICCIIT). IEEE. 446-450.

17. Aminu, E.F., Oyefolahan, I.O., Abdullahi, M.B., & Salaudeen, M.T. (2020). A Review on Ontology Development Methodologies for Developing Ontological Knowledge Representation Systems for various Domains. *International Journal of Information Engineering and Electronic Business*. DOI:10.5815/ijieeb.2020.02.05.

18. Abdul Sattar, Ely Salwana Mat Surin, Mohammad Nazir Ahmad, Mazida Ahmad and Ahmad Kamil Mahmood (2020). Comparative Analysis of Methodologies for Domain Ontology Development: A Systematic Review. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications (IJACSA)*, 11(5). <http://dx.doi.org/10.14569/IJACSA.2020.0110515>.

19. Бухаров, М. Н. Информационная система для онтологического моделирования предметных областей // Информатика. 2022. Т. 19, № 2. С. 85–99. <https://doi.org/10.37661/1816-0301-2022-19-2-85-99>

20. Массель Л. В., Ворожцова Т. Н. Онтологический подход к построению цифровых двойников объектов и систем энергетики // Онтология проектирования. 2020. Т. 10, № 3(37). С. 327-337. <https://doi.org/10.18287/2223-9537-2020-10-3-327-337>

21. Daniele Spoladore, Elena Pessot, Alberto Trombetta, (2023). A novel agile ontology engineering methodology for supporting organizations in collaborative ontology development. *Computers in Industry*, 151,103979, <https://doi.org/10.1016/j.compind.2023.103979>.

22. Mora, M., Wang, F., Gomez, J.M., Phillips-Wren, G. (2022). Development methodologies for ontology-based knowledge management systems: a review. *Expert Syst.* 39(2), e12851.

Поступила в редакцию – 17 февраля 2024 г.

Принята в печать – 10 марта 2024 г.

References

1. Miasnikova O.V. (2021). Development of production and logistics systems: theory, methodology and mechanisms of digital transformation. Minsk: School of business BSU, 266 p.

2. Miasnikova O.V. (2022). Strategy and tactics of production-logistics systems digital transformation. *Social'nye novacii i social'nye nauki [Social Novelties and Social Sciences]*, 1, 39-49. DOI: 10.31249/snsn/2022.01.03

3. Miasnikova O. (2023). Modeling the effects of digital transformation of production and logistics systems. *Biznes. Innovatsii. Ekonomika [Business. Innovations. Economics]*, 8, 114–128.

4. Miasnikova O.V. (2022). Digital Transformation Program of Production and Logistics Systems: Methodological Aspects of Creating. *Digital Transformation [Tsifrovaya transformatsiya]*, 28(4):18-27. <https://doi.org/10.35596/1729-7648-2022-28-4-18-27>

5. Miasnikova O.V. Intelligent digital twin of the production and logistics system: methodology of construction and use for system optimization. *Biznes. Innovatsii. Ekonomika [Business. Innovations. Economics]*, 7, 103–116.

6. ISO/IEC/IEEE 15288:2015 Systems engineering—System life cycle processes International Organization for Standardization (2015)

7. INCOSE Systems Engineering Handbook: A Guide for System Life Cycle Processes and Activities, 4th Edition. Edited by D. D. Walden, G. J. Roedler, K. J. Forsberg, R. D. Hamelin, and T. M. Shortell. Hoboken, US-NJ: Wiley.

8. Garichev, S. N. Gorbachev, R. A. Davydenko, E. V. Japarov, B. A. Kondratiev. V. V. (2022). Model-oriented engineering of physics and technology, information and intelligence systems. *Proceedings of Moscow Institute of Physics and Technology (State University) [Trudy MFTI]*. 2(54):149–161.

9. Guarino, N., Oberle, D., Staab, S. (2009). What is an ontology? *Handbook on Ontologies*. Springer, Berlin, Heidelberg, pp. 1–17. DOI: 10.1007/978-3-540-92673-3_0.

10. Rousseau, D., Billingham, J., & Calvo-Amodio, J. (2018). Systemic semantics: A systems approach to building ontologies and concept maps. *Systems*, 6(3), 32.

11. *Ontology Driven Architectures and Potential Uses of the Semantic Web in Systems and Software Engineering*. URL: <https://www.w3.org/2001/sw/BestPractices/SE/ODA/>.

12. El Alaoui, M., Chapurlat, V., Rabah, S., Richet, V., & Plana, R. (2023). An approach for ontology-based research and recommendation on systems engineering projects. *Procedia Computer Science*, 225, 1350-1359.

13. Noy, N. F. and McGuinness, D. L. (2001). *Ontology Development 101: A Guide to Creating Your First Ontology*. Stanford, CA:Stanford University. Available at: https://protege.stanford.edu/publications/ontology_development/ontology101.pdf [accessed 10 October 2023].

-
14. Yang, L., Cormican, K., & Yu, M. (2019). Ontology-based systems engineering: A state-of-the-art review. *Computers in Industry*, 111, 148-171.
 15. Stephen Green, Darren Southee & John Boulton (2014) Towards a Design Process Ontology, *The Design Journal*, 17:4, 515-537, DOI: 10.2752/175630614X14056185480032.
 16. Alfaifi, Y. (2022, January). Ontology development methodology: a systematic review and case study. In 2022 2nd International Conference on Computing and Information Technology (ICCIIT). IEEE. 446-450.
 17. Aminu, E.F., Oyefolahan, I.O., Abdullahi, M.B., & Salaudeen, M.T. (2020). A Review on Ontology Development Methodologies for Developing Ontological Knowledge Representation Systems for various Domains. *International Journal of Information Engineering and Electronic Business*. DOI:10.5815/ijieeb.2020.02.05.
 18. Abdul Sattar, Ely Salwana Mat Surin, Mohammad Nazir Ahmad, Mazida Ahmad and Ahmad Kamil Mahmood (2020). Comparative Analysis of Methodologies for Domain Ontology Development: A Systematic Review. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications(IJACSA)*, 11(5). <http://dx.doi.org/10.14569/IJACSA.2020.0110515>.
 19. Bukharov M. N. (2022). Information system for ontological modelling the subject areas. *Informatika [Informatics]*, 19(2):85-99. <https://doi.org/10.37661/1816-0301-2022-19-2-85->
 20. Massel LV, Vorozhtsova TN. (2020). Ontological approach to the creation of digital twins of energy objects and systems. *Ontology of designing. [Ontologiya proektirovaniya]*. 10(3): 327-337. DOI: 10.18287/2223-9537-2020-10-3-327-337.
 21. Daniele Spoladore, Elena Pessot, Alberto Trombetta, (2023). A novel agile ontology engineering methodology for supporting organizations in collaborative ontology development. *Computers in Industry*, 151,103979, <https://doi.org/10.1016/j.compind.2023.103979>.
 22. Mora, M., Wang, F., Gomez, ' J.M., Phillips-Wren, G. (2022). Development methodologies for ontology-based knowledge management systems: a review. *Expert Syst.* 39(2), e12851.
 23. Kotis K. I., Vouros G. A., Spiliotopoulos D. (2020). Ontology engineering methodologies for the evolution of living and reused ontologies: status, trends, findings and recommendations. *The Knowledge Engineering Review*. 35, e4. DOI:10.1017/S0269888920000065.

Received for publication - February 17, 2024

Accepted for publication – March 10, 2024