

Научная статья / Research Article

УДК 338.242

DOI: 10.36718/2500-1825-2022-3-92-109

Татьяна Львовна Харламова<sup>1✉</sup>, Ирина Поняева<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup> Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия

<sup>1</sup> Kharlamova\_t@list.ru

<sup>2</sup> ponyaeva\_i@spbstu.ru

## ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПРИМЕНЕНИЯ ТЕОРИИ ГРАФОВ ПРИ РЕАЛИЗАЦИИ ИННОВАЦИОННОГО ПОДХОДА К РАЗВИТИЮ ПРЕДПРИЯТИЙ

Статья посвящена теоретическому обоснованию возможности и целесообразности применения теории графов при оптимизации инновационной деятельности, осуществляемой предприятиями реального сектора в процессе внедрения цифровых технологий. Цель исследования – доказательство целесообразности применения теории графов при оптимизации процесса реализации инновационного проекта по внедрению цифровых технологий на предприятиях реального сектора. Задачи исследования: систематизация опыта применения теории графов в решении экономических и управленческих задач; определение типов графов для моделирования процесса управления на предприятии реального сектора; определение применимости графов для моделирования процесса реализации инновационного проекта на основе выбора оптимального пути. Методы исследования: комплекс аналитических и системных методов и соответствующего инструментария, относящихся к теории графов, экспертной оценке и моделированию. На основе проведенного авторами анализа применения основных концепций и алгоритмов теории графов при моделировании, как различных производственных процессов, включая стадии проектирования и дизайна и управления производством, так и деятельности предприятия в целом, обосновывается возможность применения графов при внедрении цифровых технологий в рамках реализации инновационного проекта. В исследовании рассмотрен процесс построения графа, в котором вершинами выступают носители компетенций, а дугами – процесс действия, для выполнения которого необходим определенный набор ресурсов. Данное представление выражается как математический объект в виде совокупности двух множеств. Представленная интерпретация взвешенно-ориентированных графов может выступать подграфом более крупного графа, который представляет собой инновационную систему. По результатам исследования отмечается рациональность и целесообразность применения теории графов для моделирования управленческих решений в общем виде. При этом рассмотренная модель может быть применима для характеристики процесса внедрения цифровых технологий в деятельность предприятия реального сектора с учетом заданной целевой функции оптимизации.

**Ключевые слова:** теория графов, управление, инновации, цифровые технологии, инвестиции, инновационный проект, технологии, оптимизация

**Для цитирования:** Харламова Т.Л., Поняева И. Теоретические основы применения теории графов при реализации инновационного подхода к развитию пред-

приятый // Социально-экономический и гуманитарный журнал. 2022. № 3. С. 92–109. DOI: 10.36718/2500-1825-2022-3-92-109.

**Tatyana Lvovna Kharlamova<sup>1✉</sup>, Irina Ponyaeva<sup>2</sup>**

<sup>1,2</sup>Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia

<sup>1</sup> Kharlamova\_t@list.ru

<sup>2</sup> ponyaeva\_i@spbstu.ru

### THEORETICAL FOUNDATIONS TO APPLY GRAPH THEORY IN THE INNOVATIVE APPROACH IMPLEMENTATION TO ENTERPRISE DEVELOPMENT

*The paper is devoted to the theoretical substantiation of the possibility and expediency of applying graph theory in the optimization of innovation activities carried out by enterprises in the real sector in the process of introducing digital technologies. The purpose of the study is to prove the feasibility of using graph theory when optimizing the process of implementing an innovative project to introduce digital technologies at enterprises in the real sector. Research objectives: systematization of the experience of applying graph theory in solving economic and managerial problems; determining the types of graphs for modeling the management process at an enterprise in the real sector; determining the applicability of graphs for modeling the process of implementing an innovative project based on the choice of the optimal path. Research methods: a set of analytical and system methods and related tools related to graph theory, peer review and modeling. Based on the authors' analysis of the application of the basic concepts and algorithms of graph theory in modeling both various production processes, including the stages of design and design and production management, and the activities of the enterprise as a whole, the possibility of using graphs in the implementation of digital technologies as part of the implementation of an innovative project is substantiated. The study considers the process of constructing a graph, in which the vertices are the carriers of competencies, and the arcs are the process of action, which requires a certain set of resources to perform. This representation is expressed as a mathematical object in the form of a set of two sets. The presented interpretation of weighted directed graphs can be a subgraph of a larger graph, which is an innovation system. According to the results of the study, the rationality and expediency of using graph theory for modeling managerial decisions in general is noted. At the same time, the considered model can be applicable to characterize the process of introducing digital technologies into the activities of an enterprise in the real sector, taking into account the given optimization objective function.*

**Keywords:** graph theory, management, innovations, digital technologies, investments, innovative project, technologies, optimization

**For citation:** Kharlamova T.L., Ponyaeva I. Theoretical foundations to apply graph theory in the innovative approach implementation to enter-prise development // Socio-economic and humanitarian journal. 2022. № 3. S. 92–109. DOI: 10.36718/2500-1825-2022-3-92-109.



**Введение.** Внедрение новых технологий и высокотехнологичных разработок в современных условиях становится все более динамичным. Ускоряющиеся процессы неопределенности общественного развития

последнего десятилетия, обусловленные структурными политическими и экономическими сдвигами, усугубляются пандемией и стремительной цифровизацией [1, 2]. Последняя стала основной движущей силой современной экономики и общества и рассматривается как основной двигатель четвертой промышленной революции (Индустрия 4.0) [3]. В то время как изначально сфера действия цифровизации была достаточно ограниченной (например, использованием электронных версий документов), современные цифровые технологии могут быть развернуты в большинстве областей применения. Это имеет гораздо более широкое социально-экономическое воздействие и значимые последствия, определяемые созданием новых источников ценности [4].

К лидерам Индустрии 4.0 на сегодняшний день по-прежнему относятся промышленность, предприятия которой чаще и эффективнее интегрируют в свои процессы новые технологические инструменты. Интеллектуализация и автоматизация большинства процессов на предприятиях реального сектора способна повысить эффективность и качество выпускаемой продукции, что ведет к наиболее полному удовлетворению потребностей индивидуальных и коллективных потребителей. Наибольшая эффективность управления может быть достигнута в том случае, если предприятие в лице его управляющего звена проявляет интерес и заинтересованность к внедрению инноваций и обеспечению инновационного типа развития [5].

Переход к цифровому предприятию предполагает не только внедрение передовых производственных технологий и развитие информационных систем [6], но и изменения в самой экономике предприятия, модернизацию структуры проектной работы [7] и кадрового обеспечения [8], а также разработку современных стратегий управления (рис. 1).

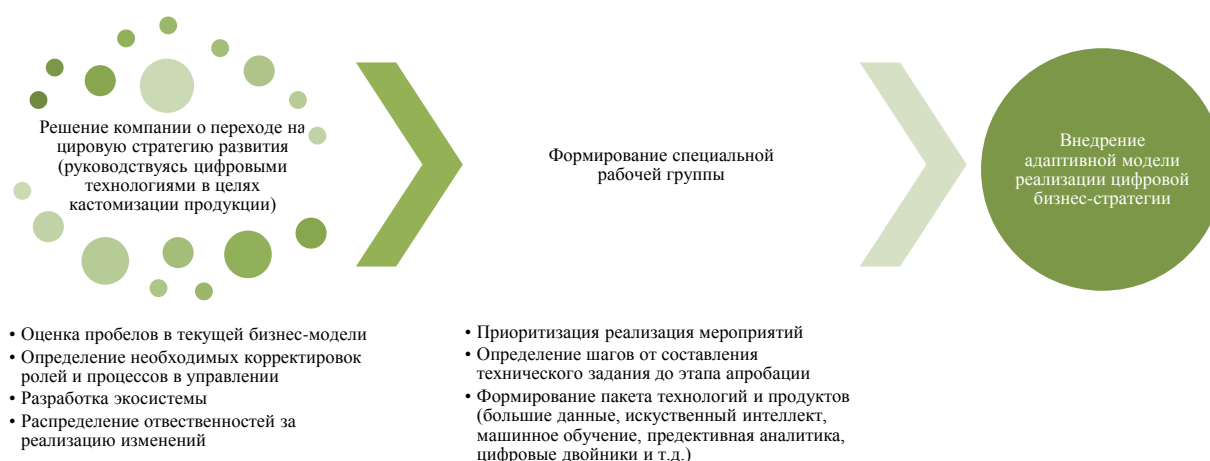


Рис. 1. Дорожная карта реализации мероприятий по переходу к цифровому предприятию [9]

Сегодня при разработке стратегии управления с использованием методов цифровизации [10, 11] необходимо учитывать особенности отечественной индустрии, что позволит ускорить инновационное развитие как национальной экономики в целом, так и каждой индивидуальной предпринимательской структуры. Применение технологических инноваций и требования функциональной организации являются основными составляющими производственного развития. В рамках этого цифровизация отечественной индустрии представляет собой единую систему, в которую интегрированы производственные машины, системы жизнеобеспечения и безопасности, датчики, обеспечивающие возможность объединения различных физических объектов в виртуальную сеть, в которой они могут взаимодействовать друг с другом без вмешательства человека.

Огромные потоки данных создали новую парадигму процессов бизнес-анализа, увеличивая потенциал передовых аналитических и когнитивных инструментов цифровой экономики. Большие массивы данных и новые технологии сформировали условия для организационных изменений и появления новых типов систем управления, которые требуют стратегического подхода к реализации бизнес-процессов. Для обобщения вышесказанного на рисунке 2 представлены особенности организации процесса управления предприятиями реального сектора в контексте реализации концепции цифровизации.



Рис. 2. Особенности организации процессов управления в условиях цифровизации [12, 13]

Разработка и анализ систем управления в условиях цифровизации экономики имеют особое значение в сфере совершенствования управленческой деятельности предприятий [14, 15]. При этом особое внимание следует уделить разработке методов оптимизации производствен-

ной деятельности предприятий в условиях внедрения цифровых технологий.

Оптимизация решений с использованием математического моделирования позволяет исключить вероятность допущения ошибок и неточностей. К числу математических инструментов, используемых при моделировании, можно отнести теорию множеств [16], теорию матриц [17], теорию вероятности [18] и т.д. Среди моделей, рассматриваемых в рамках данного исследования, наибольший интерес представляет теория графов, позволяющая наглядно изобразить и структурировать все многообразие рассматриваемых систем с целью выбора наиболее оптимального пути решения задачи.

Разделом дискретной математики, изучающей свойства графов и широко применяющейся при решении экономических задач, является теория графов. Она была создана как самостоятельная глава в операционных исследованиях, благодаря наличию многочисленных преимуществ для управленческой деятельности.

Центральным объектом данной теории является математическое понятие графа, состоящего из узлов и ребер, семантика которых может быть описана теми или иными метками. По сути, любую концептуальную модель можно описать в виде графа, в котором значения всех элементов моделирования (тип, описание и т. д.) инкапсулированы в метки. Таким образом, теория графов предлагает множество абстрактных задач на графах [19].

В то время как становление теории графов можно проследить вплоть до работ Л. Эйлера в XVIII веке, работа над алгоритмами графов всерьез началась в 1950-х годах прошлого столетия (сюда можно отнести, к примеру, алгоритм Беллмана-Форда-Мура и алгоритм Дейкстры для поиска кратчайших путей).

Математические модели этого класса, как правило, являются линейными, но, в отличие, например, от моделей линейного программирования, обладают структурными свойствами, позволяющими более полно отображать анализируемые явления, а также повышать уровень эффективности процесса оптимизации.

Внедрение вероятностных методов в теорию графов, особенно в исследованиях П. Эрдша и А. Реньи об асимптотической вероятности связности графов, послужило основанием еще для одного ответвления в данной научной области, известного как теория случайных графов. Здесь наглядное представление графов используется для демонстрации топологии экспоненциальных сетей и сетей меньшего масштаба.

При разработке производственных, инвестиционных, транспортных и маркетинговых программ на предприятиях с наиболее сложной бизнес-деятельностью использование графиков и соответствующих им математических моделей является практической необходимостью.

За прошедшие годы был разработан широкий спектр графовых вычислений и алгоритмов. Основные концепции и алгоритмы теории графов широко применяются при моделировании как различных производственных процессов [20], включая стадии проектирования и дизайна [21, 22], управления производством [23], так и деятельности предприятия в целом [24], с учетом его способности к внедрению цифровых технологий [25]. К примеру, был предложен принципиальный способ разработки генетического алгоритма, который может гарантировать строго доказанную верхнюю границу времени оптимизации [26]. Используется и алгоритм, способный немедленно отвечать на запросы и отчеты об ошибках работника с использованием цифровых технологий в ручном производстве. Он основан на теории графов для представления исходных данных планирования и набора правил, позволяющих принимать решения в режиме реального времени [27].

Используя теорию графов, исследователи решают большое количество прикладных оптимизационных задач, а также моделируют поведение элементов сети и их взаимодействие, в том числе объединение элементов в кластеры, или системы.

Наиболее актуальной в настоящее время, на наш взгляд, является проработка методик стратегического управления производственными мощностями для доведения их до практического использования на уровне отдельно взятых промышленных предприятий [28, 29]. В рамках деятельности по управлению бизнес-процессами многие организации создали большие коллекции концептуальных моделей [19]. Такие коллекции состоят в основном из моделей бизнес-процессов, однако могут также содержать модели данных, организационные диаграммы, или другие виды моделей.

Концептуальное конструирование позволяет получить инвариант организационной структуры реализации целей организации различного горизонта планирования. Сегодня предлагаются способы и методы использования графов с целью получения новых знаний на основе формализации основных характеристик и взаимосвязей организационной структуры, где используется система показателей сбалансированности, управляемости и устойчивости систем с интегральным критерием оценки эффективности системы управления [30]. Рядом исследователей также уделяется внимание реформе корпоративного управления в эпоху искусственного интеллекта в 2010–2020 гг. с помощью метода интеллектуального анализа графа знаний [31].

Наряду с этим современными исследователями были предприняты попытки рассмотрения инновационного механизма развития бизнеса через построение когнитивной карты ситуации. Предложенная гибридная модель поддержки принятия управленческого решения представляет собой взвешенно-ориентированный граф, содержащий причинно-следственные отношения между факторами системы инновационного

потенциала предприятия. В результате определено, что для достижения генеральной цели наилучшей альтернативной выступает усиление уровня технологического состояния, одной из главных составляющих которого выступает способность предприятия к внедрению инноваций в производственных процессах [32].

Анализ научной литературы показывает, что имеющиеся исследования в основном сосредоточены на организационных и социальных последствиях цифровизации, или на отношениях между цифровизацией и устойчивостью в организационном/управленческом плане. Несмотря на свою ценность, данные исследования не в полной мере ориентированы на специфику «промышленной цифровизации». Таким образом, производственный сектор все еще нуждается в глубоком исследовании по данному спектру вопросов, учитывая влияние цифровых технологий на способы и формы промышленного производства.

**Цель и задачи исследования.** В рамках исследования математических методов в решении управленческих задач в качестве цели данной работы можно сформулировать доказательство возможности и целесообразности применения теории графов при оптимизации процесса реализации инновационного проекта по внедрению цифровых технологий на предприятиях реального сектора. Таким образом, предполагается, что всеобщность интенции сформулированных ранее утверждений будет дополнена картиной возможностей математического инструментария.

Для достижения поставленной цели необходимо систематизировать опыт применения теории графов в решении экономических и управленческих задач, определить типы графов для моделирования процесса управления на предприятии реального сектора и рассмотреть возможность применения графов для моделирования реализации инновационного проекта, руководствуясь выбором оптимального пути.

**Методы исследования.** В работе находит применение комплекс методов аналитического и системного инструментария, теории графов, экспертной оценки и моделирования. Анализ научной литературы показал, что на сегодняшний день можно выделить большую классификацию в дефиниции моделей теории графов, в числе которых отмечаются пустые, ориентированные и неориентированные графы, а также ряд их вариаций в виде полных графов, мультиграфов, с петлями, графов сравнимости, циркулярных графов (циклическая фора симметрий) и т.д.

Анализ в части прикладных задач разработки и принятия управленческих решений позволяет установить несколько типов графов, наиболее часто применяющихся при моделировании управления предприятиями реального сектора (рис. 3).

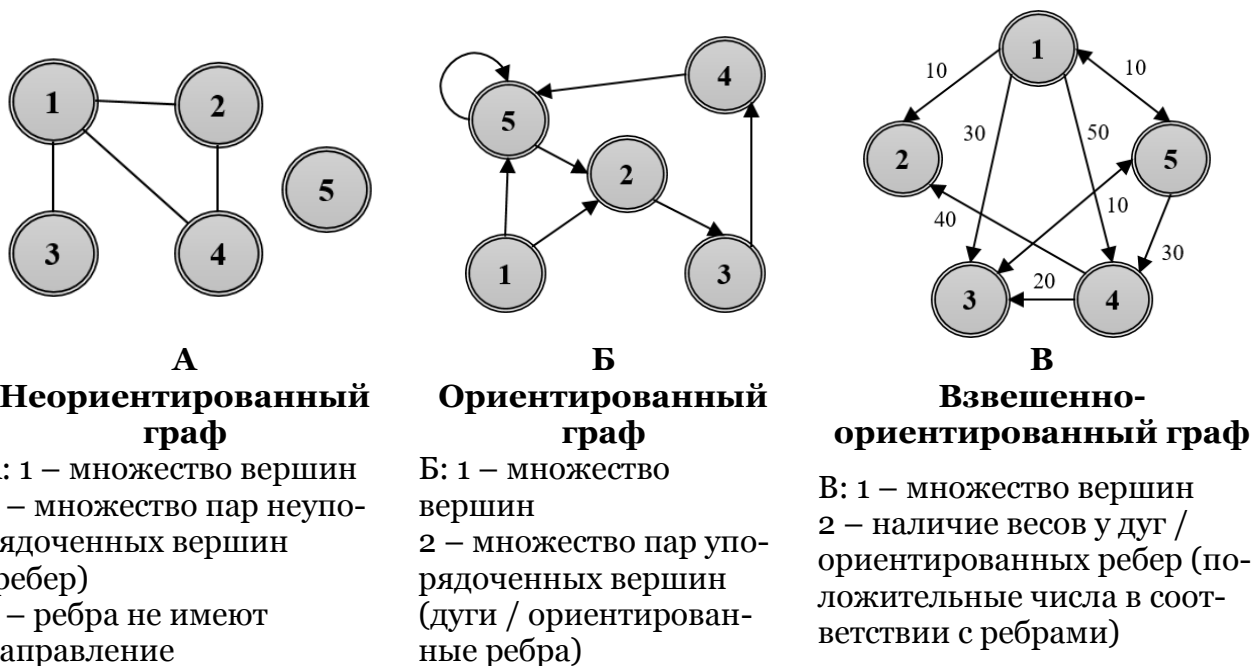


Рис. 3. Примеры типологии графов в процессах моделирования управления предприятием с описанием их характерных особенностей

Установлено, что для описания организационной структуры предприятия и моделирования процессов управления на предприятиях реального сектора преимущественно прибегают к взвешенно-ориентированным графам. Так, структура управления на предприятии обычно схематично представляется в виде «дерева», в котором подчинение лицам, или подразделениям, описывается посредством ориентированных ребер (дуг), а степени интенсивности взаимодействия соответствуют веса, изображенные у каждого из ребер.

В проектном менеджменте для целей графического моделирования комплекса выполняемых работ применяется метод сетевого планирования с преобразованием параметров в «сетевой граф», который, в свою очередь, имеет ориентированный вид. Такой подход позволяет отразить логическую последовательность и планируемую продолжительность реализации проекта.

Сформированная сеть позволяет решить задачу оптимизации, главная составляющая которой строится на рациональном использовании ресурсов (времени, финансов и т.д.). Реализуемость проекта зачастую носит вероятностный характер по причине возможной вариативности как ресурсной составляющей, так и временного пространства. Процесс реализации строится на следовании некоторому набору действий, реализуемых как в последовательном порядке, так и в рамках выстроенной приоритетности.



Процесс реализации инновационного проекта, особенно по внедрению технологий цифрового производства, требует наличия определенных компетенций, характеризующих осуществляемые действия. Компетенции выражаются в носителях (внешних и внутренних), затрачиваемом времени и ресурсах. Компетенции включают распределенную сеть знаний, в которой внутренними носителями могут выступать проектные группы, подразделения НИОКР, аналитические группы, а внешними – партнерская сеть, аутсорсинговые организации и т.п. В зависимости от носителей варьируются как сроки реализации проекта, так и задействованные ресурсы.

Ориентируясь на это обстоятельство, в рамках данного исследования рассматривается процесс построения графа, в котором вершинами выступают носители компетенций, дугами – процесс действия, для выполнения которого необходим определенный набор ресурсов. Их совокупность отражает инновационную систему, в которой реализуется проект.

Данное представление можно выразить как математический объект в виде совокупности двух множеств

$$G(V, E) = \langle V, E \rangle, V \neq \emptyset, E \subseteq V \times V, \{v, v\} \notin E, v \in V,$$

где  $V$  – множество вершин (непустое множество),  $v \in V(G)$ ;

$E$  – множество ребер (элемент множества ребер),  $e \in E(G)$ , или  $e = \{v_1, v_2\}$ , где  $v_1 \in V(G), v_2 \in V(G)$ .

Определим, что граф представляет собой некую последовательность вершин, таких, при которых  $P = (v_1, v_2, \dots, v_n) \in V \dots \times V$ , так что  $v_i$  смежна  $v_{i+1}$  для множества  $i$  от 1 до  $n$ .

В свою очередь, ребро  $e = \{v_i; v_j\}$  соединяет соответствующие вершины. Стоимость прохождения пути определяется установленной весовой категорией. Соответственно, путь будет оптимальным при наименьшей сумме ребер. Учитывая сущность инноваций, в рассматриваемом примере веса могут задаваться стоимостью, сроками и рисками.

Также возможен случай, при котором вершинами сети графа выступают точки принятия решений, а дугами – затрачиваемые для этого ресурсы. На рисунке 4 рассмотрен пример построения графа для поиска критического пути при реализации проекта, где вершинами обозначены этапы, а связями между ними выступают ресурсы, требуемые для перехода на следующий этап. Далее задается цель поиска оптимального распределения ресурсов через определение длины пути.

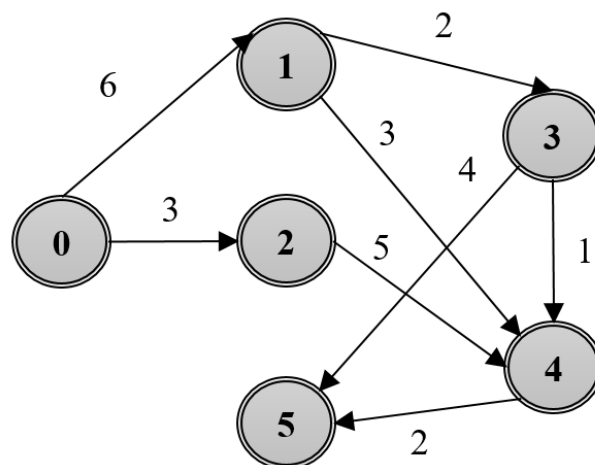


Рис. 4. Сетевой граф, отображающий затрачиваемые ресурсы в рамках этапов реализации проекта

Представленная интерпретация взвешенно-ориентированных графов может выступать подграфом более крупного графа, который представляет собой инновационную систему. Рассмотренная модель может быть применима для моделирования процесса внедрения цифровых технологий в деятельность предприятия реального сектора с учетом заданной целевой функции оптимизации.

**Заключение.** Инновационная деятельность характеризуется наличием множества индикаторов, отражающих сложную структуру и неопределенность многих взаимосвязанных производственных и технологических процессов, что предполагает некий набор моделей инновационного поведения. С этим тесно связано влияние инновационной деятельности на конкурентоспособность во многих отраслях, важным источником которой она выступает. Это особенно верно в отношении реального сектора, который зачастую связан с использованием высоких технологий, коротким жизненным циклом продукции, высокой степенью неопределенности и острой конкуренцией между новыми продуктами за долю рынка инновационной продукции.

Достижение заданного уровня результативности инновационной деятельности напрямую зависит от принятых управленческих решений. Именно поэтому разработку стратегии инновационного развития необходимо сопровождать экономико-математическим моделированием. Используемый при этом инструментарий позволяет выстраивать процесс исследования через построение образов анализируемых экономических элементов. Сетевые модели графов выступают неким мостом, соединяющим пути и правила принятия решений. Данный подход может быть полезен для изучения и выявления зависимостей правил принятия решений от возможных путей реализации. Это позволит менеджменту осуществлять исследования в области инноваций для составления и ве-

рификации прогнозов о комбинациях времени и ресурсов, наиболее выигрышных при реализации той или иной инновационной стратегии. Кроме того, теорию графового моделирования можно использовать для поиска закономерностей между исходными данными для последующей реализации инновационных проектов.

Таким образом, применение графового моделирования на разных этапах реализации проекта выступает как мощный инструмент генерирования информации о потоках и ресурсах, представленных набором решений для достижения заданной цели оптимизации. Это подтверждает и обосновывает сделанное нами предположение о целесообразности применения графов в качестве эффективного инструмента принятия управленческих решений в области внедрения цифровых технологий и инновационного развития предприятия. Данное исследование выявляет некоторые теоретические основы, которые могут позволить менеджменту предприятий реального сектора эффективно распределять ресурсы, выбирать доступные инновационные стратегии и прогнозировать потенциальные тенденции. В свете практического применения видится, что данный подход довольно надежен и прост, особенно если говорить о прогнозировании, поскольку не требует предварительной спецификации, особой функциональной формы или конкретных предположений о статистическом распределении переменных модели графа.

В целом проведенный анализ позволяет сделать заключение о рациональности применения теории графов для моделирования управленческих решений в общем виде, особенно при оптимизации процесса внедрения технологий цифрового производства.

### **Список источников**

1. Significance of digital technology in manufacturing sectors: Examination of key factors during Covid-19 / *B. Mohapatra, S. Tripathy, D. Singhal* [et al.] // *Research in Transportation Economics*. Significance of digital technology in manufacturing sectors. 2021. P. 101134.
2. COVID-19 and digitalization: The great acceleration / *J. Amankwah-Amoah, Z. Khan, G. Wood* [et al.] // *Journal of Business Research*. COVID-19 and digitalization. 2021. Vol. 136. P. 602–611.
3. Industrial digitalization. A systematic literature review and research agenda / *D.T. Matt, G. Pedrini, A. Bonfant* [et al.] // *European Management Journal*. 2022.
4. *Pupentsova S., Livintsova M.* The Enterprises Risk Management in the Context of Digital Transformation // *International Scientific Siberian Transport Forum TransSiberia – 2021: Lecture Notes in Networks and Systems* / eds. *A. Manakov, A. Edigarian*. Cham: Springer International Publishing, 2022. P. 1159–1167.

5. *Kharlamova T.L., Kharlamov A.V., Antokhina Y.A.* Effective management as a condition for Innovative development of the national economy // ISO LONDON LIMITED – European Publisher. 2021. P. 999–1012.
6. *Харламова Т.Л., Герасимов А.О.* Инновационные подходы к управлению развитием предприятий в период цифровой трансформации // *Фундаментальные и прикладные исследования в области управления, экономики и торговли.* 2021. С. 103–107.
7. *Кооп В.К., Дуболазов В.А.* Современные методы управления проектами промышленного строительства // *Фундаментальные и прикладные исследования в области управления, экономики и торговли: сб. трудов Всероссийской научной и учебно-практической конференции: в 3 ч. (Санкт-Петербург, 27–29 мая 2020 г.).* Санкт-Петербург, 2020. С. 204–210.
8. *Смолькин В.П., Светуных М.Г.* Условия инновационного развития организации как социально-экономической системы в обеспечении управления человеческим капиталом // *Вестник Самарского университета. Экономика и управление.* 2021. Т. 12. № 4. С. 136–144.
9. Руководство по цифровой трансформации производственных предприятий /*А. Боровков, Р. Бирбаер, П. Биленко* [и др.]. URL: [http://assets.fea.ru/uploads/nticenter/112019/Rukovodstvo\\_po\\_cifrovizacii\\_proizvodstvennyh\\_predpriyatij.pdf](http://assets.fea.ru/uploads/nticenter/112019/Rukovodstvo_po_cifrovizacii_proizvodstvennyh_predpriyatij.pdf) (дата обращения: 20.04.2022).
10. Основные тренды цифровой трансформации российского бизнеса /*И.В. Ильин, С.Г. Светуных, С.Е. Калязина* [и др.] // *Наука и бизнес: Пути развития.* 2019. № 7 (97). С. 137–143.
11. *Козлов А.В., Тесля А.Б., Иващенко А.А.* Формирование системы индикаторов для мониторинга процессов цифровизации национальной экономики // *Известия высших учебных заведений. Серия: Экономика, финансы и управление производством.* 2021. № 1 (47). С. 97–107.
12. *Petrushevskaya A., Aleshkin N.* Technique for optimizing the technological process of manufacturing electrical radio products in the context of digital transformation of production // *Journal of Physics: Conference Series.* 2021. Т. 1889. P. 022120.
13. *Силкина Г.Ю., Шевченко С.Ю.* Цифровые тренды инновационного развития моделей бизнеса // *Современный менеджмент: проблемы и перспективы: сб. статей по итогам XVI Международной научно-практической конференции/ Санкт-Петербургский государственный экономический университет.* Санкт-Петербург, 2021. С. 426–431.
14. Models of modern information economy conceptual contradictions and practical examples /*V.P. Kuznetsov, E.P. Garina, N.S. Andryashina* [et al.]. Bingley, 2018. 361 p.

15. *Силкина Г.Ю., Данилов А.А.* Принципы функционирования промышленного предприятия в условиях устойчивого развития // *л-Есопому*. 2020. Т. 85. № 5. С. 82–90.
16. *Поняева И.И., Пупенцова С.В.* Оценка рисков инновационного проекта, основанная на синтезе методов нечетких множеств и анализа иерархий // *л-Есопому*. 2020. Т. 86. № 6. С. 66–78.
17. *Демченко А.Г.* Прикладные аспекты высшей математики в менеджменте // *Информационные технологии в образовании: сб. статей научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых / Российский государственный гидрометеорологический университет*. Санкт-Петербург, 2021. С. 132–138.
18. *Рябкова А.М., Тычинский А.В.* Моделирование инновационной деятельности в условиях неопределенности // *Управление в экономических и социальных системах*. 2021. № 3 (9). С. 55–60.
19. Graph theory and model collection management: conceptual framework and runtime analysis of selected graph algorithms /*D. Breuker, P. Delfmann, H.-A. Dietrich* [et al.] // *Information Systems and e-Business Management*. Graph theory and model collection management. 2015. Vol. 13. № 1. P. 69–106.
20. A Graph Theory-Based Optimization Design for Complex Manufacturing Processes /*Z. Han, L. Cheng, L. Xing* [et al.] // *IEEE Access*. 2020. Т. 8. P. 95547–95558.
21. Toward the digital twin of additive manufacturing: Integrating thermal simulations, sensing, and analytics to detect process faults /*A. Gaikwad, R. Yavari, M. Montazeri* [et al.] // *IISE Transactions*. Toward the digital twin of additive manufacturing. 2020. Т. 52. № 11. P. 1204–1217.
22. Concurrent multi-process graph-based design component synthesis: Framework and algorithm /*B. Chen, J. Hu, J. Qi* [et al.] // *Engineering Applications of Artificial Intelligence*. Concurrent multi-process graph-based design component synthesis. 2021. Vol. 97. P. 104051.
23. *Марсавин В.В.* Применение теории графов для моделирования систем менеджмента (на примере модели метрологического обеспечения производства) // *Актуальные проблемы менеджмента качества, стандартизации и метрологии: сб. докл. VIII Всероссийской научно-практической интернет-конференции / Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова*. Белгород, 2021. С. 117–121.
24. *Blanc-Serrier S., Ducq Y., Vallespir B.* Organisational interoperability characterisation and evaluation using enterprise modelling and graph theory // *Computers in Industry*. 2018. Vol. 101. P. 67–80.
25. *Морозов Р.В., Белясов И.С.* Методический подход к оценке потенциала предприятий легкой промышленности как предпосылки внедрения конвергентных технологий // *Журнал исследований по управлению*. 2021. Т. 7. № 3. С. 56–69.

26. *Corus D., Lehre P.K.* Theory Driven Design of Efficient Genetic Algorithms for a Classical Graph Problem // Recent Developments in Metaheuristics: Operations Research / Computer Science Interfaces Series / eds. *L. Amodeo, E.-G. Talbi, F. Yalaoui*. Cham: Springer International Publishing, 2018. P. 125–140.
27. Industry 4.0 in manual assembly processes – a concept for real time production steering and decision making: 12th CIRP Conference on Intelligent Computation in Manufacturing Engineering, 18-20 July 2018, Gulf of Naples, Italy / *R. Larek, H. Grendel, J.C. Wagner* [et al.] // *Procedia CIRP*. 2019. Vol. 79. P. 165–169.
28. *Замбружцкая Е.С.* Применение графо-матричных моделей в стратегическом анализе оптимальности производственных мощностей предприятий черной металлургии // *Экономический анализ: теория и практика*. 2021. Т. 20. № 8 (515). С. 1495–1515.
29. *Замбружцкая Е.С.* Разработка и применение оптимизационных моделей в стратегии управления производственными мощностями // *Экономический анализ: теория и практика*. 2021. Т. 20. № 7 (514). С. 1368–1390.
30. Methodological Approach to Analysis of Management Systems Using the Graph Theory in the Digital Economy / *E.N. Letiagina, Y.V. Trifonov, E.Y. Trifonova* [et al.] // *The 21st Century from the Positions of Modern Science: Intellectual, Digital and Innovative Aspects: Lecture Notes in Networks and Systems* / eds. *E.G. Popkova, B.S. Sergi*. Cham: Springer International Publishing, 2020. P. 134–141.
31. *Lipai Z., Xiqiang X., Mengyuan L.* Corporate governance reform in the era of artificial intelligence: research overview and prospects based on knowledge graph // *Annals of Operations Research. Corporate governance reform in the era of artificial intelligence*. 2021. P. 1–16.
32. *Поняева И.И.* Когнитивные гибридные системы поддержки принятия решений на основе интеллектуальных технологий продвинутой бизнес-аналитики // *Системный анализ в проектировании и управлении: сб. научных трудов XXIV Международной научной и учебно-практической конференции* / ФГАОУ ВО СПбПУ. Санкт-Петербург, 2020. С. 79–89.

## References

1. Significance of digital technology in manufacturing sectors: Examination of key factors during Covid-19 / *B. Mohapatra, S. Tripathy, D. Singhal* [et al.] // *Research in Transportation Economics. Significance of digital technology in manufacturing sectors*. 2021. P. 101134.
2. COVID-19 and digitalization: The great acceleration / *J. Amankwah-Amoah, Z. Khan, G. Wood* [et al.] // *Journal of Business Research. COVID-19 and digitalization*. 2021. Vol. 136. P. 602–611.

3. Industrial digitalization. A systematic literature review and research agenda / *D.T. Matt, G. Pedrini, A. Bonfant* [et al.] // *European Management Journal*. 2022.
4. *Pupentsova S., Livintsova M.* The Enterprises Risk Management in the Context of Digital Transformation // *International Scientific Siberian Transport Forum TransSiberia – 2021: Lecture Notes in Networks and Systems* / eds. *A. Manakov, A. Edigarian*. Cham: Springer International Publishing, 2022. P. 1159–1167.
5. *Kharlamova T.L., Kharlamov A.V., Antokhina Y.A.* Effective management as a condition for Innovative development of the national economy // *ISO LONDON LIMITED – European Publisher*. 2021. P. 999–1012.
6. *Kharlamova T.L., Gerasimov A.O.* Innovatsionnye podkhody k upravleniyu razvitiem predpriyatii v period tsifrovoi transformatsii // *Fundamental'nye i prikladnye issledovaniya v oblasti upravleniya, ehkonomiki i trgovli*. 2021. С. 103–107.
7. *Koop V.K., Dubolazov V.A.* Sovremennye metody upravleniya proektami promyshlennogo stroitel'stva // *Fundamental'nye i prikladnye issledovaniya v oblasti upravleniya, ehkonomiki i trgovli: sb. trudov Vserossiiskoi nauchnoi i uchebno-prakticheskoi konferentsii: v 3 ch. (Sankt-Peterburg, 27–29 maya 2020 g.)*. Sankt-Peterburg, 2020. С. 204–210.
8. *Smol'kin V.P., Svetun'kov M.G.* Usloviya innovatsionnogo razvitiya organizatsii kak sotsial'no-ehkonomicheskoi sistemy v obespechenii upravleniya chelovecheskim kapitalom // *Vestnik Samarskogo universiteta. Ehkonomika i upravlenie*. 2021. T. 12. № 4. С. 136–144.
9. Rukovodstvo po tsifrovoi transformatsii proizvodstvennykh predpriyatii / *A. Boroukov, R. Birbaer, P. Bilenko* [i dr.]. URL: [http://assets.fea.ru/uploads/nticenter/112019/Rukovodstvo\\_po\\_cifrovizacii\\_proizvodstvennyh\\_predpriyatij.pdf](http://assets.fea.ru/uploads/nticenter/112019/Rukovodstvo_po_cifrovizacii_proizvodstvennyh_predpriyatij.pdf) (data obrashcheniya: 20.04.2022).
10. Osnovnye trendy tsifrovoi transformatsii rossiiskogo biznesa / *I.V. Il'in, S.G. Svetun'kov, S.E. Kalyazina* [i dr.] // *Nauka i biznes: Puti razvitiya*. 2019. № 7 (97). С. 137–143.
11. *Kozlov A.V., Teslya A.B., Ivashchenko A.A.* Formirovanie sistemy indikatorov dlya monitoringa protsessov tsifrovizatsii natsional'noi ehkonomiki // *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Seriya: Ehkonomika, finansy i upravlenie proizvodstvom*. 2021. № 1 (47). С. 97–107.
12. *Petrushevskaya A., Aleshkin N.* Technique for optimizing the technological process of manufacturing electrical radio products in the context of

- digital transformation of production // Journal of Physics: Conference Series. 2021. T. 1889. P. 022120.
13. *Silkina G.YU., Shevchenko S.YU.* Tsifrovye trendy innovatsionnogo razvitiya modelei biznesa // *Sovremennyi menedzhment: problemy i perspektivy: sb. statei po itogam XVI Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii/ Sankt-Peterburgskii gosudarstvennyi ekonomicheskii universitet. Sankt-Peterburg, 2021. C. 426–431.*
  14. Models of modern information economy conceptual contradictions and practical examples /*V.P. Kuznetsov, E.P. Garina, N.S. Andryashina [et al.]. Bingley, 2018. 361 p.*
  15. *Silkina G.YU., Danilov A.A.* Printsipy funktsionirovaniya promyshlennogo predpriyatiya v usloviyakh ustoichivogo razvitiya // *π-Economy. 2020. T. 85. № 5. C. 82–90.*
  16. *Ponyaeva I.I., Pupentsova S.V.* Otsenka riskov innovatsionnogo proekta, osnovannaya na sinteze metodov nechetkikh mnozhestv i analiza ierarkhii // *π-Economy. 2020. T. 86. № 6. C. 66–78.*
  17. *Demchenko A.G.* Prikladnye aspekty vysshei matematiki v menedzhmente // *Informatsionnye tekhnologii v obrazovanii: sb. statei nauchno-prakticheskoi konferentsii studentov, aspirantov i molodykh uchenykh / Rossiiskii gosudarstvennyi gidrometeorologicheskii universitet. Sankt-Peterburg, 2021. C. 132–138.*
  18. *Ryabkova A.M., Tychinskii A.V.* Modelirovanie innovatsionnoi deyatel'nosti v usloviyakh neopredelennosti // *Upravlenie v ekonomicheskikh i sotsial'nykh sistemakh. 2021. № 3 (9). C. 55–60.*
  19. Graph theory and model collection management: conceptual framework and runtime analysis of selected graph algorithms /*D. Breuker, P. Delfmann, H.-A. Dietrich [et al.] // Information Systems and e-Business Management. Graph theory and model collection management. 2015. Vol. 13. № 1. P. 69–106.*
  20. A Graph Theory-Based Optimization Design for Complex Manufacturing Processes /*Z. Han, L. Cheng, L. Xing [et al.] // IEEE Access. 2020. T. 8. P. 95547–95558.*
  21. Toward the digital twin of additive manufacturing: Integrating thermal simulations, sensing, and analytics to detect process faults /*A. Gaikwad, R. Yavari, M. Montazeri [et al.] // IISE Transactions. Toward the digital twin of additive manufacturing. 2020. T. 52. № 11. P. 1204–1217.*
  22. Concurrent multi-process graph-based design component synthesis: Framework and algorithm /*B. Chen, J. Hu, J. Qi [et al.] // Engineering Applications of Artificial Intelligence. Concurrent multi-process graph-based design component synthesis. 2021. Vol. 97. P. 104051.*



23. *Marsavin V.V.* Primenenie teorii grafov dlya modelirovaniya sistem menedzhmenta (na primere modeli metrologicheskogo obespecheniya proizvodstva) // Aktual'nye problemy menedzhmenta kachestva, standartizatsii i metrologii: sb. dokl. VIII Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi internet-konferentsii / Belgorodskii gosudarstvennyi tekhnologicheskii universitet im. V.G. Shukhova. Belgorod, 2021. С. 117–121.
24. *Blanc-Serrier S., Ducq Y., Vallespir B.* Organisational interoperability characterisation and evaluation using enterprise modelling and graph theory // Computers in Industry. 2018. Vol. 101. P. 67–80.
25. *Morozov R.V., Belyasov I.S.* Metodicheskii podkhod k otsenke potentsiala predpriyatii legkoi promyshlennosti kak predposylki vnedreniya konvergentykh tekhnologii // Zhurnal issledovaniy po upravleniyu. 2021. T. 7. № 3. S. 56–69.
26. *Corus D., Lehre P.K.* Theory Driven Design of Efficient Genetic Algorithms for a Classical Graph Problem // Recent Developments in Metaheuristics: Operations Research / Computer Science Interfaces Series / eds. *L. Amodeo, E.-G. Talbi, F. Yalaoui*. Cham: Springer International Publishing, 2018. P. 125–140.
27. Industry 4.0 in manual assembly processes – a concept for real time production steering and decision making: 12th CIRP Conference on Intelligent Computation in Manufacturing Engineering, 18-20 July 2018, Gulf of Naples, Italy / *R. Larek, H. Grendel, J.C. Wagner* [et al.] // Procedia CIRP. 2019. Vol. 79. P. 165–169.
28. *Zambrzhitskaya E.S.* Primenenie grafo-matrichnykh modelei v strategicheskom analize optimal'nosti proizvodstvennykh moshchnostei predpriyatii chernoi metallurgii // Ehkonomicheskii analiz: teoriya i praktika. 2021. T. 20. № 8 (515). С. 1495–1515.
29. *Zambrzhitskaya E.S.* Razrabotka i primeneniye optimizatsionnykh modelei v strategii upravleniya proizvodstvennymi moshchnostyami // Ehkonomicheskii analiz: teoriya i praktika. 2021. T. 20. № 7 (514). С. 1368–1390.
30. Methodological Approach to Analysis of Management Systems Using the Graph Theory in the Digital Economy /*E.N. Letiagina, Y.V. Trifonov, E.Y. Trifonova* [et al.] // The 21st Century from the Positions of Modern Science: Intellectual, Digital and Innovative Aspects: Lecture Notes in Networks and Systems / eds. *E.G. Popkova, B.S. Sergi*. Cham: Springer International Publishing, 2020. P. 134–141.
31. *Lipai Z., Xiqiang X., Mengyuan L.* Corporate governance reform in the era of artificial intelligence: research overview and prospects based on

knowledge graph //Annals of Operations Research. Corporate governance reform in the era of artificial intelligence. 2021. P. 1–16.

32. *Ponyaeva I.I.* Kognitivnye gibridnye sistemy podderzhki prinyatiya reshenii na osnove intellektual'nykh tekhnologii prodvинутой бизнес-аналитики // Sistemnyi analiz v proektirovanii i upravlenii: sb. nauchnykh trudov XXIV Mezhdunarodnoi nauchnoi i uchebno-prakticheskoi konferentsii / FGAOU VO SPBPU. Sankt-Peterburg, 2020. С. 79–89.

Статья принята к публикации 25.05.2022/  
The article has been accepted for publication 25.05.2022.

Информация об авторах:

**Татьяна Львовна Харламова**, профессор Высшей школы производственного менеджмента, доктор экономических наук, профессор

**Ирина Поняева**, аспирант Высшей школы производственного менеджмента

Information about the authors:

**Tatyana Lvovna Kharlamova**, Professor at the Higher School of Production Management, Doctor of Economic Sciences, Professor

**Irina Ponyaeva**, Postgraduate Student at the Higher School of Production Management

