

УПРАВЛЕНИЕ В СОЦИАЛЬНЫХ И ЭКОНОМИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

SOCIAL AND ECONOMIC SYSTEMS MANAGEMENT

Научная статья

УДК 004.942

<https://doi.org/10.24143/2072-9502-2022-1-60-71>

Концептуальная структура системы управления транспортно-логистическим проектом на основе имитационного моделирования

Алексей Игоревич Рожко¹, Анна Алексеевна Ханова²

^{1,2}Астраханский государственный технический университет,
Астрахань, Россия, akhanova@mail.ru

Аннотация. Выделены ключевые факторы развития транспортно-логистической отрасли в условиях цифровой трансформации общества. Показано, что имитационная модель может быть рассмотрена как цифровой двойник транспортно-логистической системы. Дано определение транспортно-логистического проекта, а также выделены его основные (производство/доставка грузовых мест на склад/терминал, погрузо-разгрузочные работы с грузовыми местами, хранение грузовых мест, транспортировка грузовых мест) и дополнительные (переработка/реконструкция грузовых мест, движение денежных средств) процессы. Детально рассмотрен технологический процесс планирования и реализации транспортно-логистического проекта. Отмечены специфические особенности транспортно-логистического проекта, включающего множество стохастических факторов, обуславливающие необходимость применения методов имитационного моделирования. С точки зрения теории организационных систем предложена структура системы управления транспортно-логистическим проектом. Детально описаны и структурированы управляемые субъекты – процессы транспортно-логистического проекта. Выделены управляющие воздействия, параметры внешней среды и состояния транспортно-логистического проекта. Построена модель принятия решения управляемыми субъектами. Отмечено, что величина эффективности управления определяется выбранной стратегией развития транспортно-логистического проекта. На основе системного анализа процессов рассмотрен пример имитационной модели транспортно-логистического проекта по доставке оборудования для ветроэнергостановки. Приведено описание субмоделей имитационной модели в соответствии с разработанной обобщенной структурой управления транспортно-логистическим проектом. Проведены эксперименты, выявлены оптимальные интенсивности производства для транспортно-логистического проекта по доставке оборудования для ветроэнергостановки.

Ключевые слова: транспортно-логистический проект, грузовое место, процессы транспортировки, управление, имитационная модель, интенсивность производства

Для цитирования: Рожко А. И., Ханова А. А. Концептуальная структура системы управления транспортно-логистическим проектом на основе имитационного моделирования // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика. 2022. № 1. С. 60–71. <https://doi.org/10.24143/2072-9502-2022-1-60-71>.

Conceptual structure of transport and logistics project management system based on simulation modeling

Alexey I. Rozhko¹, Anna A. Khanova²✉

^{1,2}Astrakhan State Technical University,
Astrakhan, Russia, akhanova@mail.ru✉

Abstract. The paper highlights the key factors for the development of the transport and logistics industry in the context of the digital transformation of society. The simulation model is shown as a digital twin of the transport and logistics system. A definition of a transport and logistics project is given, and its main (production / delivery of packages to a warehouse / terminal, loading and unloading operations with packages, storage of packages, transportation of packages) and additional (processing/reconstruction of packages; money movement) processes are separated. The technological process of planning and realizing the transport and logistics operations is considered in detail. There have been singled out the specific features of the transport and logistics process, including many stochastic factors, necessitating the use of simulation modeling methods. In terms of the theory of organizational systems, the structure of the management system for a transport and logistics project is proposed. The managed entities - the processes of the transport and logistics project - are described and structured in detail. The control actions, parameters of the external environment and the state of the transport and logistics process are highlighted. A model of decision-making by controlled subjects has been built. It is noted that the value of management efficiency is determined by the chosen strategy for the development of the transport and logistics process. A simulation model of a transport and logistics project for the delivery of equipment for a wind power plant is considered using the system analysis of processes. The description of the submodels of the simulation model is given in accordance with the developed generalized structure of the transport and logistics process management. The experiments have been carried out, the optimal production rates have been identified for a transport and logistics project of delivery of equipment for a wind power plant.

Keywords: transport and logistics project, cargo package, transportation processes, management, simulation model, production rate

For citation: Rozhko A. I., Khanova A. A. Conceptual structure of transport and logistics project management system based on simulation modeling. *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Management, Computer Science and Informatics.* 2022; 1:60-71. (In Russ.) <https://doi.org/10.24143/2072-9502-2022-1-60-71>.

Введение

Согласно исследованиям компании PricewaterhouseCoopers (PwC) на транспортно-логистическую отрасль существенное влияние оказывают пять ключевых факторов: цифровизация, изменения в международной торговле, изменения в основных процессах в связи с внедрением нового

программного обеспечения, изменение динамики внутренних рынков, изменения в основных процессах в связи с внедрением новой техники [1]. По данным опроса руководителей транспортно-логистических компаний, 54 % из них рассчитывают на увеличение выручки за счет цифровизации (рис. 1).



Рис. 1. Выгоды от инвестиций в цифровые технологии: процент респондентов в рамках исследования Digital IQ за 2017 г. (транспортно-логистическая отрасль) [1]

Fig. 1. Benefits of investing into digital technologies: percentage of respondents in Digital IQ survey in 2017 (transport and logistics industry) [1]

В основе цифровой трансформации транспортно-логистических компаний прежде всего должны быть инновационные средства бизнес-моделирования и программное обеспечение имитационного моделирования [2]. Имитационная модель по сути является «цифровым двойником» реальной транспортно-логистической системы, она направлена на улучшение управляемости, получение дополнительной информации, позволяет получить достаточно точный прогноз будущего состояния системы, совершенствовать цифровые решения и взаимодействия с партнерами на всей цепочке создания стоимости [3, 4].

Анализ работ зарубежных и российских авторов [5, 6] демонстрирует отсутствие эффективного инструментария управления крупными транспортно-логистическими проектами (ТЛП) и технологическими процессами их жизненного цикла в условиях нестабильности внешней социально-экономической среды, масштабного фактора и высокой цены ошибки и риска. Актуальной становится задача повышения эффективности управления транспортно-логистическими проектами на основе имитационного моделирования.

Особенности процессов реализации транспортно-логистических проектов

В транспортно-логистических системах проектом называют совокупность процессов, связанных с планированием и оптимизацией перевозок грузов, проектированием цепей поставок, проектированием и оптимизацией работы склада и т. д. Подготовка и планирование транспортно-логистического проекта требуют сбора информации о времени начала проекта, датах изготовления/интенсивности изготовления грузовых мест; проведения анализа различных маршрутов транспортировки, технических характеристик терминалов, транспортных средств и грузовых мест; обследования маршрутов/терминалов с привлечением экспертов (разработка специальных проектов, обследование мостов/причалов и т. д.). При организации перевозок выделяют следующие основные процессы и операции:

- производство/доставка грузовых мест на склад/терминал (ПД);
- погрузо-разгрузочные работы с грузовыми местами (ПРР);
- хранение грузовых мест (ХГМ);
- транспортировка грузовых мест (ТГМ);
- переработка/реконструкция грузовых мест (ПР);
- движение денежных средств (ДДС).

Типичной задачей ТЛП является организация процесса перевозки комплектующих от места производства до места монтажа. Комплектующие могут быть как стандартными, так и нестандартными, например негабаритным грузом (т. е. размеры груза превышают допустимые при транспортировке

размеры). Организация транспортировки такого рода грузов требует проведения подготовительных мероприятий: обследования маршрутов; выбора терминалов, мест хранения, грузоподъемных механизмов; разработки схемы (проекта) размещения грузов на транспортных средствах, технологических схем по организации погрузо-разгрузочных работ и т. д. В логистике нестандартные перевозки называют проектными [7].

Обычно заказчик предоставляет следующие данные: габариты и вес груза, место отгрузки, место доставки, сроки перевозки, могут быть заданы параметры интенсивности производства. Специалист транспортной компании должен определить оптимальные маршруты перевозки, транспортные средства для перевозки грузов, промежуточные терминалы, рассчитать бюджет проекта. Несмотря на существование стандартных схем расчета [8] в ТЛП, как правило, остается много неизвестных.

Комплектуемые производятся в разных городах и странах, с разной интенсивностью. Для монтажа установки необходимо, чтобы все комплектующие прибыли в одно место и в одно время. Но на практике очень часто возникают отклонения в ТЛП, связанные с изменениями в интенсивности производства, доступностью транспортных средств, транспортировкой грузов и т. д. Такие отклонения могут повлиять на поведение системы в целом, в большинстве случаев это становится причиной увеличения бюджета проекта. Бюджет обычно рассчитывается аналитически в электронных таблицах, на усредненных данных и известных зависимостях (линейных) и не учитывает нелинейные/неочевидные зависимости, причинно-следственные связи.

Специфические особенности реализации ТЛП определяют понятийную сложность и неопределенность объекта исследования (как узла взаимодействия различных элементов: водного, автомобильного и железнодорожного транспорта, грузов, перегрузочной техники и обслуживающего персонала, стохастически реагирующих на управляющие воздействия [9]), высокую размерность задачи анализа. Необходима формализация задачи повышения эффективности процесса управления ТЛП с учетом невозможности использования однообразного математического аппарата и затрудненности математического описания формальными моделями, поскольку многие процессы носят стохастический характер. Использование имитационного моделирования позволит детально проработать ТЛП на этапе планирования, а также исследовать изменения поведения системы в связи с изменением входных данных, проигрыванием различных сценариев на каждом этапе проекта. Модель необходимо разрабатывать с учетом движения грузов и финансовых потоков.

Системный анализ структуры управления транспортно-логистическим проектом

В терминологии теории управления организационными системами [10] структуру системы управления ТЛП представим в виде совокупности:

- управляющего органа (центра);
- управляемого объекта (ТЛП), на входе которого имеются управляющие воздействия $y \in A$

и внешние воздействия $\theta \in \Theta$, на выходе – результат деятельности объекта (состояние ТЛП) $z \in A_0$, который зависит от действия $y \in A$ и обстановки $\theta \in \Theta$ следующим образом: $z = \omega(y, \theta)$. Обратная связь обеспечивает процессы транспортировки грузов и центр информацией о состоянии ТЛП (рис. 2).

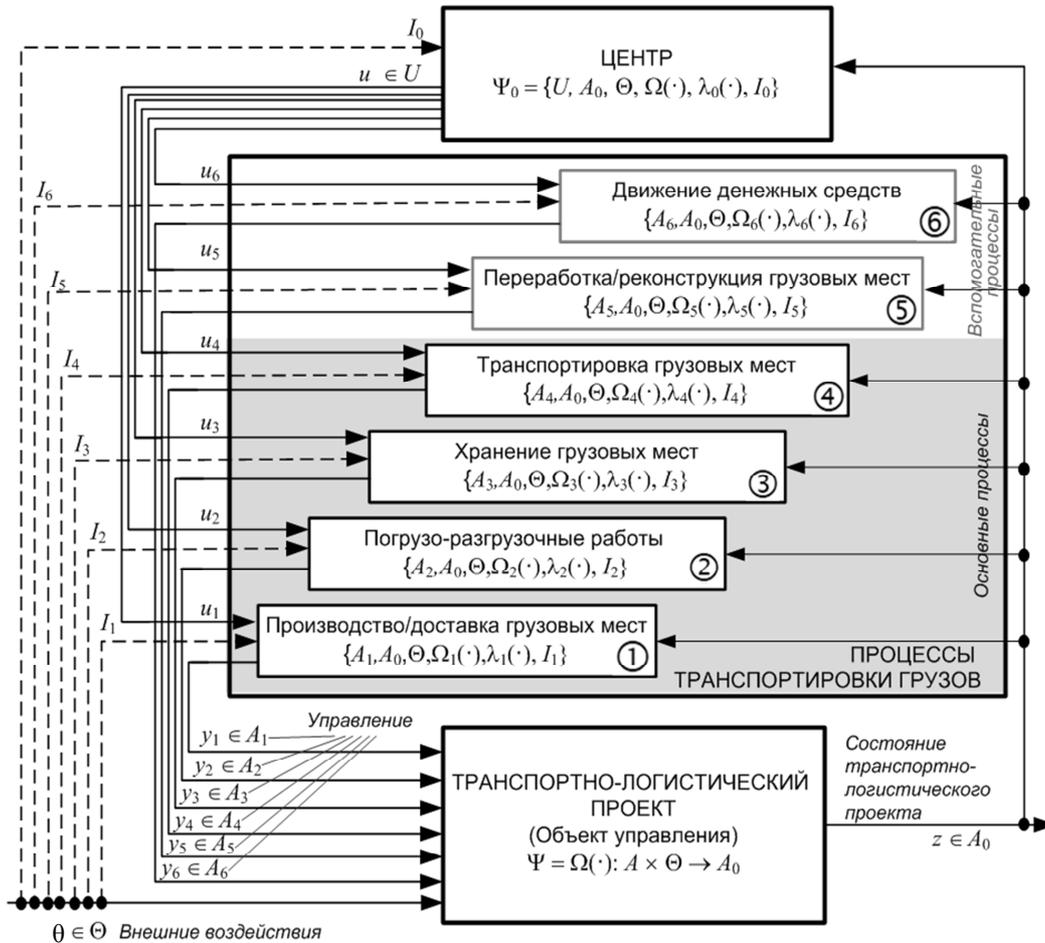


Рис. 2. Концептуальная структура системы управления транспортно-логистическим проектом:
 I – информация; u – управление; y – управляющие воздействия; A – допустимые действия; z – результат деятельности;
 Ψ – модель принятия решений; Θ – параметры внешней среды; Ω – зависимость результата деятельности от действия и обстановки; λ – функция полезности

Fig. 2. Conceptual structure of the transport and logistics project management system:
 I – information; u – control; y – control actions; A – permissible actions; z – result of activity; Ψ – decision-making model;
 Θ – parameters of the external environment; Ω – dependence of the result of activity on the action and the situation;
 λ – usefulness function

Множество управляющих воздействий $y \in A$ для управляемого объекта (ТЛП) определяется выходной информацией управляемых субъектов (процессов ПД, ПРР, ХГМ, ТГМ, ПР, ДДС) $y = (y_1, y_2, y_3, y_4, y_5, y_6) = \{y^{ICD}, y^{TCEPn}, y^{TCPn}, y^{TPB}, y^{TFF}\}$ и включает:

- $y^{ICD} = \{y_1^{ICD}, y_2^{ICD}, y_3^{ICD}, y_5^{ICD}\}$ – интенсивность убытия грузовых мест после каждого процесса ПД, ПРР, ХГМ, ТГМ (Intensity Cargo Departure);
- $y^{TCEPn} = \{y_2^{TCEPn}, y_3^{TCEPn}, y_4^{TCEPn}, y_5^{TCEPn}\}$ – плановую стоимость каждого процесса ПРР, ХГМ, ТГМ, ПР с единицей/партией грузовых мест (Total Cost Each Process);

Kozhko A. I., Khapova A. A. Conceptual structure of transport and logistics project management system based on simulation modeling

– $y^{TCPn} = y_6^{TCPn}$ – плановую стоимость операции/операций (Total Cost Processes);
 – $y^{TPBn} = y_6^{TPBn}$ – плановый бюджет ТЛП (Total Project Budget);
 – $y^{TFF} = y_6^{TFF}$ – время на «заморозку» денежных средств за каждую/все операции (определение финансовой устойчивости компании, займа денежных средств у банка/материнской компании и т. д.) (Freeze of Funds Time).

Параметры обстановки внешней среды $\theta \in \Theta$ для ТЛП в целом представляют собой совокупность

$$\theta = \left\{ \begin{array}{l} \theta^{DCC}, \theta^{TWS}, \theta^{ES}, \theta^F, \theta^{AT/AS}, \theta^{FT}, \theta^{RTE}, \theta^R, \\ \theta^{DRR}, \theta^{TP}, \theta^P, \theta^{GIS} \end{array} \right\} \text{ и включают:}$$

– $\theta^{DCC} = \theta_1^{DCC}$ – условия поставки грузовых мест (расчет финансовых затрат) (Delivery Conditions Cargo);
 – $\theta^{TWS} = \theta_3^{TWS}$ – технические характеристики (площадь/объем/допустимые нагрузки) и тип склада/терминала (Terminal/Warehouse Specifications);
 – $\theta^{ES} = \{\theta_2^{ES}, \theta_4^{ES}\}$ – технические характеристики и тип грузоподъемных машин/транспортных средств (Equipment Specifications);
 – $\theta^F = \{\theta_2^F, \theta_4^F\}$ – наличие грузоподъемных машин/транспортных средств, необходимость в мобилизации/демобилизации грузоподъемных машин/транспортных средств (Free);
 – $\theta^{AT/AS} = \{\theta_2^{AT/AS}, \theta_4^{AT/AS}, \theta_5^{AT/AS}\}$ – среднее время/скорость на проведение одной операции с единицей грузового места/партией грузовых мест (Average Time/Average Speed);
 – $\theta^{FT} = \{\theta_3^{FT}, \theta_4^{FT}\}$ – льготное время (время без оплаты операции) на проведение одной операции (простой транспортных средств под погрузо-разгрузочными операциями, хранение на складе и т. д.) (Free Time);
 – $\theta^{RTE} = \theta_4^{RTE}$ – возможность возврата транспортных средств за новой единицей/партией грузовых мест (Return Transport Equipment);
 – $\theta^R = \{\theta_2^R, \theta_3^R, \theta_4^R, \theta_5^R\}$ – стоимость операции единицы/партии грузовых мест (если необходимо учитывать условия оплаты: предоплата, постоплата и т. д.) (Rates);
 – $\theta^{DRR} = \{\theta_2^{DRR}, \theta_3^{DRR}, \theta_4^{DRR}\}$ – стоимость простоя оборудования/аренды склада (Demurrage/Rent Rate);
 – $\theta^{TP} = \theta_6^{TP}$ – условия оплаты (предоплата, постоплата и т. д.) (Terms of Payment);
 – $\theta^P = \theta_4^P$ – условия взаиморасчетов с заказчиком (время между датой оплаты за услугу подрядной организации и датой оплаты (возврата денежных средств, включая агентское вознаграждение)

заказчиком (зависит от условий договора) (Payment);

– $\theta^{GIS} = \{\theta_1^{GIS}, \theta_2^{GIS}, \theta_3^{GIS}, \theta_4^{GIS}, \theta_5^{GIS}\}$ – местоположение.

Результат деятельности или состояние ТЛП $z \in A_0$ определяется совокупностью $z = \{z^{TTEP}, z^{TTP}, z^{TCEP\phi}, z^{TCP\phi}, z^{TPB\phi}, z^{BN}, z^{OD}\}$,

включая:

– $z^{TTEP} = \{z_1^{TTEP}, z_2^{TTEP}, z_3^{TTEP}, z_4^{TTEP}, z_5^{TTEP}\}$ – время на осуществление каждого процесса с одной единицей/партией грузовых мест или всех процессов вместе (Total Time Each Process);
 – z^{TTP} – общее затраченное время на реализацию проекта (Total Time Project);
 – $z^{TCEP\phi} = \{z_2^{TCEP\phi}, z_3^{TCEP\phi}, z_4^{TCEP\phi}, z_5^{TCEP\phi}\}$ – фактическую стоимость операции/операций ТЛП на перевалку грузовых мест (Total Cost Each Process);
 – $z^{TCP\phi} = z_6^{TCP\phi}$ – фактическую стоимость всех процессов (Total Cost Processes);
 – $z^{TPB\phi} = z_6^{TPB\phi}$ – общий бюджет ТЛП фактический (Total Project Budget);
 – z^{BN} – выявление узких мест проекта (BottleNecks);
 – z^{OD} – другие данные, необходимые для анализа и указанные в техническом задании (Other Data).

Интересы и предпочтения участников системы «ТЛП» – центра и управляемых субъектов – выражаются их целевыми функциями (функциями полезности). Так как предпочтения центра $\lambda_0(\cdot)$ определены, в том числе, на множестве A_0 возможных результатов деятельности управляемых субъектов, а последние зависят от действий управляемых субъектов (процессов ТЛП) и обстановки, то качественное управление заключается в побуждении центром управляемых субъектов к выбору определенных действий [11]. Модель принятия решений управляемыми субъектами ПД, ПРР, ХГМ, ТГМ, ПР, ДДС описывается следующим кортежем [12]:

$$\Psi_i = \{A_i, A_0, \Theta, \Omega_i(\cdot), \lambda(\cdot), I_i\},$$

где $i \in N = \{1, \dots, 6\}$, т. е. множествами допустимых действий $A = (A_1, A_2, A_3, A_4, A_5, A_6)$, допустимых результатов деятельности A_0 , возможных значений обстановок (неопределенности) Θ ; функциями полезности $\lambda_1(\cdot), \lambda_2(\cdot), \dots, \lambda_6(\cdot)$ для управляемых субъектов ПД, ПРР, ХГМ, ТГМ, ПР, ДДС и связи между действиями, обстановкой и результатом деятельности $\Omega_1(\cdot), \Omega_2(\cdot), \dots, \Omega_6(\cdot)$ для ПД, ПРР, ХГМ, ТГМ, ПР, ДДС; информацией $I = (I_1, I_2, I_3, I_4, I_5, I_6)$, которой обладают управляемые субъекты ПД, ПРР, ХГМ, ТГМ, ПР, ДДС на момент принятия решений.

Законы $\Omega_1(\cdot), \Omega_2(\cdot), \dots, \Omega_6(\cdot)$ известны всем участникам системы и не могут быть изменены. Это предположение соответствует фиксированной

технологии функционирования управляемых объектов (причалы, склады, грузовые фронты, основная подъемно-транспортная техника и т. д.). Также можно считать, что множество возможных обстановок Θ в функционировании ТЛП известно всем участникам системы и фиксировано (для выполнения этого предположения всегда можно выбрать это множество достаточно широким, ограничивая в каждом конкретном случае возможные значения обстановок имеющейся у управляемых субъектов информацией) [10]. Выделим три группы переменных (элементов кортежей Ψ , которые могут изменяться) – допустимые множества A и A_0 , функции полезности $\lambda_1(\cdot), \lambda_2(\cdot), \dots, \lambda_6(\cdot)$ и информация $I = (I_1, I_2, I_3, I_4, I_5, I_6)$ [12].

Модель принятия решений центром описывается кортежем

$$\Psi_0 = \{U, A_0, \Theta, \Omega(\cdot), \lambda_0(\cdot), I_0\},$$

где U – управление; A_0 – множество допустимых результатов деятельности управляемых субъектов; Θ – множество обстановок; $\Omega(\cdot)$ – зависимость результата деятельности от действия и обстановки; $\lambda_0(\cdot)$ – функция полезности; I_0 – информация, имеющаяся у центра для принятия решения. «Действиями» центра (выбираемыми им стратегиями) являются управления $u = (u_1, u_2, u_3, u_4, u_5, u_6) = \{u^{IMDC}, u^{IAP}, u^{MoS}, u^Q\}$, где:

$$-u^{IMDC} = \{u_1^{IMDC}, u_2^{IMDC}, u_3^{IMDC}, u_4^{IMDC}, u_5^{IMDC}\} - \text{интенсивность производства/прибытия грузовых мест и их массогабаритные характеристики (Intensity Manufacturing Delivery Cargoes);}$$

$-u^{IAP} = u_6^{IAP}$ – интенсивность поступления заявок на оплату (зависит от интенсивности движения/хранения грузовых мест и т. д.) (Intensity Applications for the Payment);

$-u^{MoS} = \{u_2^{MoS}, u_4^{MoS}, u_5^{MoS}\}$ – метод погрузки/перевозки/хранения единицы/партии грузовых мест (Method of Statement);

$-u^Q = \{u_1^Q, u_2^Q, u_4^Q, u_5^Q\}$ – количество грузоподъемных машин/транспортных средств/складов/терминалов/комплексов для переработки/реконструкции (Quantity).

«Действия» управляемых субъектов ПД, ПРР, ХГМ, ТГМ, ПР, ДДС называют стратегиями:

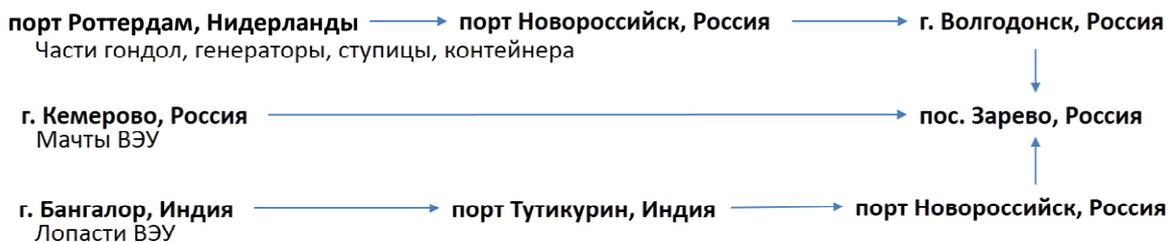


Рис. 3. Схема транспортно-логистического проекта

Fig. 3. Chart of the transport and logistics project

$y_i \in A_i$. Совокупность стратегий $y_{-i} = (y_1, \dots, y_{i+1}, y_{i-1}, \dots, y_6) \in A_{-i} = \prod_{j \neq i} A_j$ называется

обстановкой для i -го управляемого субъекта (ПД, ПРР, ХГМ, ТГМ, ПР, ДДС). Задача управления ТЛП как организационной системой формально может быть сформулирована следующим образом: найти допустимое управление, имеющее приемлемую эффективность [12], т. е. $E(u) \rightarrow \max_{u \in U}$. Величина $E(u)$, $u \in U$ называется эффективностью управления и определяется выбранной стратегией [10]. Рассмотрение ТЛП с точки зрения теории организационных систем позволило выявить некоторые особенности [13]:

1. Сбор и интегрирование разнородной информации (в едином пространственно-временном поле) полученной от различных источников с перекрестным уточнением и добавлением.

2. Необходимость формирования единого пространственно-временного поля (привязка к нему всех элементов системы, информационных агентов, событий и собственно данных) и среды поддержки принятия решений.

3. Анализ и предсказание развития обстановки.

Представленная структура системы управления ТЛП (см. рис. 2) позволяет рассматривать каждый процесс в отдельности и в дальнейшем из этих блоков строить имитационную модель с необходимыми параметрами, вносить корректировки для каждого блока в зависимости от условий задачи [14–16].

В реальном ТЛП каждый процесс (ПД, ПРР, ХГМ, ТГМ, ПР, ДДС) декомпозируется на несколько подпроцессов в зависимости от типов грузов, участвующих в данном проекте.

Имитационная модель транспортно-логистического процесса

Рассмотрим представленные подходы при управлении конкретным ТЛП по доставке оборудования для ветроэнергостановки (ВЭУ). Необходимо доставить лопасти, изготавливаемые на предприятии в г. Бангалор (Индия), части мачты ВЭУ из г. Кемерово (Россия), оборудование (части гондолы, генератор, ступица, контейнера) из порта г. Роттердам (Нидерланды) на площадку строительства в пос. Зарево (Россия) (рис. 3).

Часть оборудования необходимо доставить для доукомплектования в г. Волгодонск (Россия). В рассматриваемом ТЛП параллельно идут до 27 процессов перевозки грузов, обрабатываются 30 финансовых потоков, происходит монтаж до 60 ВЭУ. Известны вес и размеры оборудования, даты готовности оборудования, интенсивность производства оборудования, места доставки оборудования.

Имитационная модель ТЛП по доставке оборудования для ВЭУ реализована с использованием платформы имитационного моделирования (ПИМ) Anylogic и представлена следующими субмоделями в соответствии с декомпозицией процессов:

1. *Производство/доставка грузовых мест на склад/терминал.* Процесс ПД характеризуется интенсивностью производства/прибытия грузовых мест u_1^{IDMC} и зависит от типа, характеристик вместимости, скорости перемещения и количества транспортных средств u_1^O , характеристик грузовых мест (например, времени на осуществление ПД с одной единицей/партией грузовых мест z_1^{TEP}), а также условий их поставки θ^{DCC} и т. д. Интенсив-

ность производства грузовых мест также зависит от мощности предприятия и задается индивидуально для каждого типа грузового места. В имитационной модели ПД инициализируется [17]:

– для генерации заявок (грузовых мест). В ТЛП ПД – это изготовление предприятием материалов и оборудования, а в рассматриваемом случае это изготовление лопастей на предприятии в районе г. Бангалор. В агенте *Bengaluru* (место производства) блок *source_11* генерирует поток заявок *Goods* (грузовых мест – лопастей ВЭУ) (рис. 4, контур 1);

– при прибытии заявок (грузовых мест) на склад/терминал. В ТЛП ПД также это доставка материалов и оборудования на терминал/порт. В рассматриваемой имитационной модели это прибытие грузовых мест в порт г. Антверпен (Бельгия), г. Туттикурин (Индия), г. Новороссийск (Россия). Например, в агенте *Rotterdam* (поставка оборудования в порт Роттердам, Нидерланды) блоки *source_11–14* генерируют поток заявок *Goods* (грузовых мест – гондол, генераторов, ступиц, контейнеров) (рис. 4, контур 2).

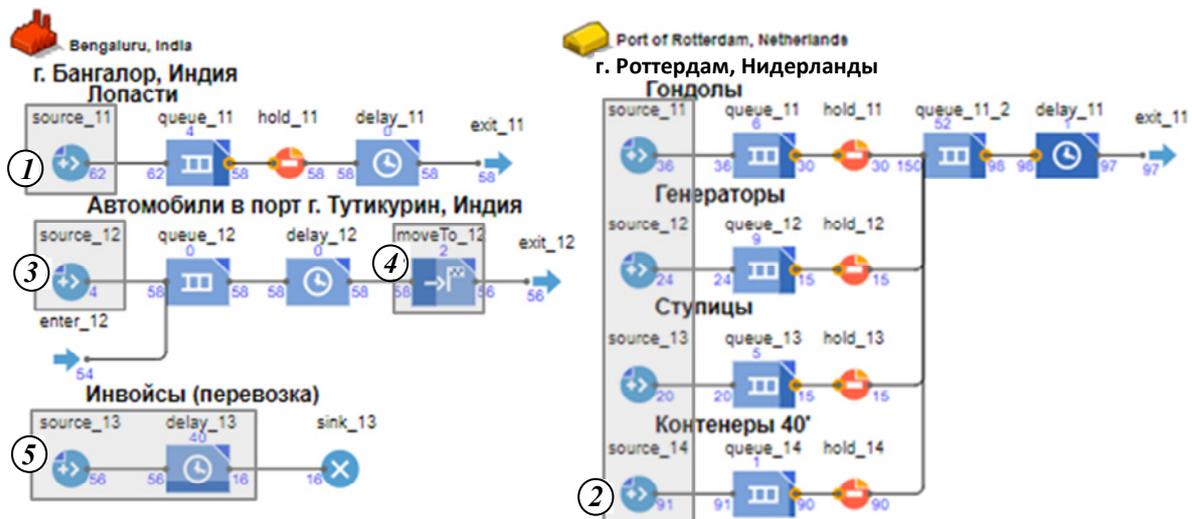


Рис. 4. Фрагмент имитационной модели ТЛП г. Бангалор и г. Роттердам (выполнено в ПИМ Anylogic)

Fig. 4. Fragment of the simulation model of TLP in Bangalore and Rotterdam (made in Anylogic PIM)

2. *Погрузо-разгрузочные работы.* В частном случае ПРР представляют собой прямую перегрузку грузовых мест с одного транспортного средства на другое, а также внутрискладское перемещение грузовых мест (например, перемещение грузовых мест с фронтальной в тыловую зону склада) [18]. Данный процесс будет характеризоваться количеством используемой техники для осуществления ПРР (кранов, погрузчиков и т. д.) u_2^O , ее техническими характеристиками, интенсивностью прибытия грузовых мест u_2^{IDMC} и пр. В имитационной модели ПРР инициализируется до или после процесса транспортировки грузовых мест. В рассматриваемом ТЛП это:

– погрузка грузовых мест со склада (после процесса хранения грузовых мест) на транспортное средство (далее следует процесс транспортировки грузовых мест);

– выгрузка грузовых мест с транспортного средства на склад с использованием грузоподъемных кранов.

В качестве примера рассмотрим модели агентов *Thoothukudi* (место перегрузки и хранения грузовых мест лопастей ВЭУ и смены вида транспорта с автомобильного на водный) и *Novorossiysk* (место перегрузки и хранения грузовых мест лопастей ВЭУ, гондол и смены вида транспорта с автомобильного на водный). В агенте *Thoothukudi* блок *delay_11* моделирует погрузку лопастей на судно (рис. 5, контур 1).



Рис. 5. Фрагмент имитационной модели порта Тутикурин (выполнено в ПИМ Anylogic)

Fig. 5. A fragment of the simulation model of the port Tutukurin (made in Anylogic PIM)

В агенте *Novorossiysk* блок *delay_11*, *delay_21*– генераторов, контейнеров на автомобиль (рис. 6, контуры 1, 2).
24 моделирует погрузку лопастей, гондол, ступиц,



Рис. 6. Фрагмент имитационной модели порта Новороссийск (выполнено в ПИМ Anylogic)

Fig. 6. Fragment of a simulation model of the port Novorossiysk (made in Anylogic PIM)

3. *Хранение грузовых мест*. В имитационной модели данный процесс инициализируется после процесса выгрузки грузовых мест с транспортного средства или до погрузки грузовых мест на транспортное средство [19]. В рассматриваемом примере процесс применяется при прибытии на склад в порт/терминал (Туттикурин, Новороссийск) для временного хранения грузовых мест (накопления судовой партии, ожидания вывоза, таможенного оформления и т. д.). Процесс ХГМ инициализируется в имитационной модели при изготовлении грузовых мест в месте производства для временного хранения в ожидании вывоза транспортными средствами (изготовление лопастей на предприятии в районе г. Бангалор). Частным случаем при процессе хранения грузовых мест может быть процесс внут-

рискладского перемещения грузовых мест, включающий в себя процессы ПРР и ТГМ. Процесс ХГМ характеризуется типом склада, полезной площадью или объемом хранения и пр.

В качестве примера процессов ХГМ в имитационной модели рассмотрим модели агентов *Thoothukudi* (порт Туттикурин – место перегрузки и хранения грузовых мест лопастей и смены вида транспорта с автомобильного на водный) и *Novorossiysk* (порт Новороссийск – место перегрузки и хранения грузовых мест лопастей, гондол, и смены вида транспорта с автомобильного на водный). В агенте *Thoothukudi* блок *queue_11* моделирует хранение грузовых мест – лопастей ВЭУ – на складе порта в ожидании погрузки на автомобиль и вывоза с территории порта (см. рис. 5, контур 2).

Kozhko A. I., Khamova A. A. Conceptual structure of transport and logistics project management system based on simulation modeling

В агенте *Novorossiysk* блоки *queue_11_2*, *queue_21_2*, *queue_22*, *queue_23*, *queue_24* моделируют хранение грузовых мест (см. рис. 6, контур 3). В данном случае это хранение лопастей, гондол, ступиц, генераторов, контейнеров в ожидании погрузки на автомобиль и вывоза с территории порта.

4. *Транспортировка грузовых мест*. В имитационной модели данный процесс применяется при фактическом перемещении грузовых мест на транспортных средствах из места погрузки в место выгрузки. В имитационной модели процесс ТГМ симулирует фактическое перемещение грузовых мест на транспортных средствах из места погрузки в место выгрузки. В рассматриваемом ТЛП это перевозка грузовых мест из места производства г. Бангалор в порт Туттикурин, из порта Туттикурин в порт г. Новороссийск и далее до места доставки пос. Зарево. Данный процесс может характеризоваться следующими параметрами: типом θ_4^{ES} и количеством транспортных средств u_4^O , вместимостью и скоростью перемещения θ_4^F и др. В качестве примера рассмотрим в модели агентов *Bengaluru* (Бангалор – место производства) и *Truck* (транспортное средство – автомобиль). В агенте *Bengaluru* блок *Source_12* (см. рис. 4, контур 3) генерирует поток агентов *Truck* (автомобиль). Автомобиль должен доставить

лопасти до порта Туттикурин. Все процессы в имитационной модели задаются явно, т. е. время на погрузо-разгрузочные работы, количество единиц грузовых мест, погруженных на транспортное средство, средняя скорость и т. д. Блок *moveTo_12* (см. рис. 4, контур 4) моделирует фактическое перемещение автомобиля с грузом от предприятия-изготовителя в г. Бангалор в порт Туттикурин.

5. *Переработка/реконструкция грузовых мест* (вспомогательный процесс). В имитационной модели данный процесс применяется при доработке грузовых мест (оборудования) или установке дополнительного оборудования, настройке и т. д. В рассматриваемом ТЛП эти процессы происходят на предприятии в г. Волгодонск, грузовые места прибывают из порта Новороссийск. После проведения работ грузовые места грузятся на транспортные средства и перевозятся до конечного места доставки – пос. Зарево. Данный процесс может характеризоваться следующими параметрами: количеством одновременно перерабатываемых/реконструируемых грузовых мест u_5^{MDC} , временем на осуществление данных операций $\theta_5^{AT/AS}$ и др. Блок *delay_11_P* и *delay_21_P* (рис. 7) моделируют ПР грузовых мест (характеристика процесса – среднее время на проведение операций).

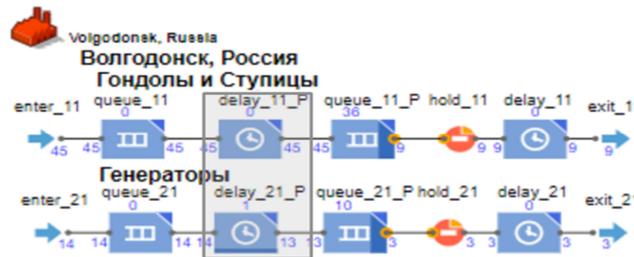


Рис. 7. Фрагмент имитационной модели г. Волгодонск (выполнено в ПИМ Anylogic)

Fig. 7. Fragment of a simulation model of the city of Volgogradsk (made in Anylogic PIM)

6. *Движение денежных средств* (вспомогательный процесс). Данный процесс применяется при оплате услуг подрядных организаций и возмещении понесенных затрат от заказчика в виде как предоплаты, так и постоплаты за предоставленные услуги и материалы. В большинстве случаев предоплата (в некоторых случаях частичную) требуют подрядные организации, постоплата осуществляется заказчиком после предоставления подтверждающих документов в течение определенного периода (обычно от 30 до 60 дней). В рассматриваемом ТЛП процесс ДДС выступает как вспомогательный при выполнении всех вышеуказанных процессов (1–5). Данный процесс может характеризоваться следующими параметрами: интенсивность поступления заявок на оплату u^{IAP} , тип оплаты за оказание услуг (предоплата, постоплата) θ^R , период на возмещение за-

трат заказчиком θ^P и пр. В качестве примера мы можем рассмотреть в модели агента *Bengaluru* оплату услуг. Генерирует заявки на оплату блок *source_13* (см. рис. 4, контур 5). Генерация заявки происходит при использовании функции *inject* (). Период задержки (заморозки) при возмещении затрат заказчиком выполняет блок *delay_13*.

Планирование экспериментов имитационной модели транспортно-логистического процесса

В ходе экспериментов с имитационной моделью ТЛП в ПИМ Anylogic были выполнены следующие прогоны:

– Run 0 – первоначальные параметры (интенсивность производства части мачты в собранном виде в г. Кемерово – 2 единицы в месяц; интенсивность производства лопастей в г. Бангалор – 7 единиц в неделю);

– Run 1 – увеличена интенсивность производства части мачты до 3 единиц в месяц;

– Run 2, 3, 4 – уменьшена интенсивность производства лопастей до 4, 3, 2 единиц в неделю соответственно (рис. 8).

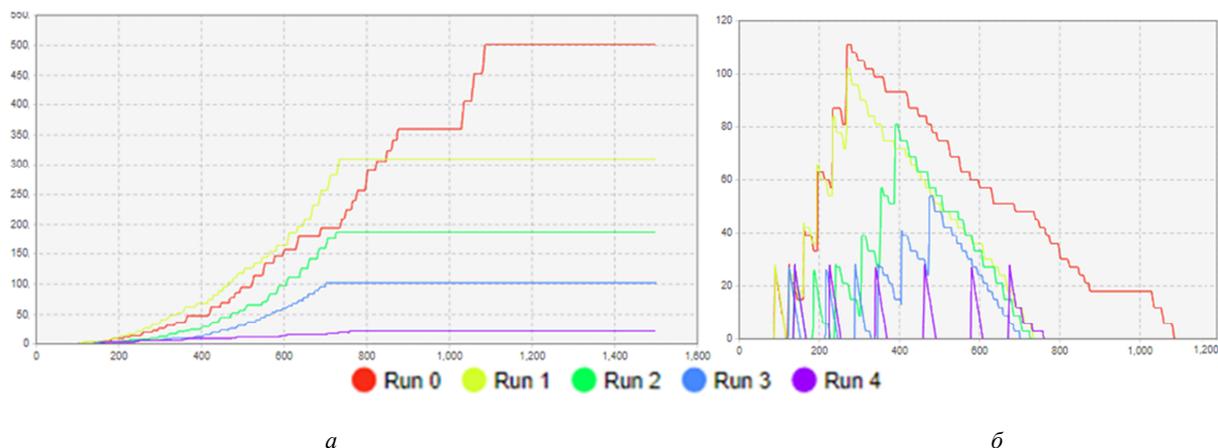


Рис. 8. Результаты моделирования: *a* – полная стоимость хранения лопастей на терминале г. Новороссийск (тыс. USD);
б – количество лопастей, находящихся на хранении на терминале г. Новороссийск (единиц)

Fig. 8. Simulation results: *a* – total cost of storing blades at the terminal in Novorossiysk (thousand USD);
b – the number of blades stored at the terminal in Novorossiysk (units)

В результате прогонов определена оптимальная интенсивность производства лопастей и мачт в сборе (Run 3), при которой количество одновременно хранящихся лопастей в порту Новороссийск не будет превышать 60 единиц. Как следствие, уменьшается прогнозируемый бюджет по расходам хранения в порту с 500 до 100 тыс. USD.

Построение имитационной модели транспортировки оборудования позволит решить следующие управленческие задачи:

- определить на этапе планирования ТЛП оптимальные маршруты транспортировки грузов;
- выявить и проанализировать на этапе планирования ТЛП узкие места при транспортно-логистическом обеспечении доставки оборудования;
- провести анализ различных сценариев при транспортно-логистическом обеспечении доставки оборудования;
- оценить потребность в ресурсах на этапе планирования ТЛП (в автомобилях, судах и пр.);
- оценить полную стоимость проекта перевозки;
- подготовить прогноз по срокам доставки оборудования.

Современные пакеты имитационного моделирования поддерживают GIS, что позволяет указать

на карте место производства и место выгрузки грузов, а также маршрут движения [20].

Заключение

Разработана концептуальная структура управления транспортно-логистическим проектом. С точки зрения организационных систем структурированы управляемые субъекты транспортно-логистического проекта: производство/доставка грузовых мест на склад/терминал, погрузо-разгрузочные работы с грузовыми местами, хранение грузовых мест, транспортировка грузовых мест, переработка/реконструкция грузовых мест; движение денежных средств. Выделены специфические особенности и детально рассмотрены управляющие воздействия, параметры внешней среды и состояния транспортно-логистического процесса. Подробно описана имитационная модель по доставке оборудования для ветроэнергоустановки. Описаны субмодели имитационной модели, приведены фрагменты ее схем. Экспериментально показана целесообразность планирования транспортно-логистических проектов на основе технологии имитационного моделирования.

Список источников

1. Как будут развиваться транспорт и логистика в ближайшем будущем? Обзор тенденций и факторов развития отрасли на основе ежегодного опроса топ-менеджеров зарубежных компаний, проведенного PwC. URL: <https://glonassgps.com/kak-budut-razvivatsa-transport-i-logistika-v-blizajsem-budusem> (дата обращения: 20.04.2021).

2. Цифровая трансформация. URL: <https://www.sap.com/cis/insights/digital-transformation.html> (дата обращения: 20.04.2021).

3. Петров А. В. Имитация как основа технологии цифровых двойников // Вестн. Иркут. гос. техн. ун-та. 2018. Т. 22. № 10 (141). С. 56–66.

4. Левитин И. Е., Майборода В. П. Цифровая экономика в задачах управления и экспертной оценки транс-

портно-логистических проектов и процессов их жизненного цикла // Качество. Инновации. Образование. 2017. № 7 (146). С. 71–76.

5. Hermann M., Pentek T., Otto B. Design principles for industrie 4.0 scenarios // 2016 49th Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS) (5-8 Jan. 2016). Article 7427673. P. 3928–3937. DOI: 10.1109/HICSS.2016.488.

6. Serrano-Hernandez A., Faulin J., Hirsch P., Fikar C. Agent-based simulation for horizontal cooperation in logistics and transportation: From the individual to the grand coalition // Simulation Modelling Practice and Theory. 2018. V. 85. P. 47–59.

7. Кулаков А. Д., Дмитриев В. А., Салогубова Е. В. Существующие подходы к оценке социально-экономических эффектов от реализации транспортно-логистических проектов // Экономика и управление: проблемы, решения. 2021. Т. 1. № 1 (109). С. 63–70.

8. Пятаев М. В. Оценка ожидаемой эффективности проектов создания транспортно-логистических центров // Регион: экономика и социология. 2009. № 3. С. 198–211.

9. Нырков А. П. Автоматизированное управление и оптимизация технологических процессов в транспортных узлах: дис. ... д-ра техн. наук. СПб., 2003. 304 с.

10. Бурков В. Н., Губко М. В., Коргин Н. А., Новиков Д. А. Теория управления организационными системами и другие науки об управлении организациями // Проблемы управления. 2012. № 4. С. 2–10.

11. Burkov V. N., Korgin N. A., Novikov D. A. Control mechanisms for organizational-technical systems: problems of integration and decomposition // IFAC-PapersOnLine. 2016. V. 49–32, P. 001–006. DOI.org/10.1016/j.ifacol.2016.12.180.

12. Новиков Д. А. Теория управления организационными системами. М.: Изд-во МПСИ, 2005. 584 с.

13. Макаренко А. Введение в сетцентрические информационно-управляющие системы. URL: <http://www.rdcn.ru/estimation/2010/03042010.shtml> (дата обращения: 20.04.2021).

14. Ханова А. А. Принятие управленческих решений на основе мультиаспектного интегрированного моделирования сложных систем // Вестн. Астрахан. гос. техн. ун-та. Сер.: Управление, вычислительная техника и информатика. 2016. № 4. С. 99–108.

15. Protalinskiy O., Khanova A., Shcherbatov I. Simulation of Power Assets Management Process // Studies in Systems, Decision and Control. 2019. V. 199. P. 88–501.

16. Bondareva I. O., Shendo M. V., Luneva T. V., Khanova A. A. Logical-probabilistic and simulation modeling as a toolkit for complex analysis and risk management of a cargo port // E3S Web of Conferences. TPACEE-2020. 2020. V. 224. P. 02027. DOI.org/10.1051/e3sconf/202022402027.

17. Hartmann S. Generating scenarios for simulation and optimization of container terminal logistics // OR Spectrum. 2004. V. 26. P. 171–192. DOI.org/10.1007/s00291-003-0150-6.

18. Silva V. M. D., Novaes A. G. Analysis and simulation of collaboration policies among manufacturing industries and its effects on the maritime transportation cost // Marine Systems & Ocean Technology. 2017. V. 12. P. 65–79. DOI.org/10.1007/s40868-017-0024-4.

19. Durán J. M. What is a Simulation Model? // Minds & Machines. 2020. V. 30. P. 301–323. DOI.org/10.1007/s11023-020-09520-z.

20. Mazza R. M. Simulation-based optimization in port logistics // 4OR-Q J. Oper. Res. 2012. V. 10. P. 313–314. DOI.org/10.1007/s10288-011-0184-6.

References

1. *Kak budut razvivat'sia transport i logistika v blizhaishej budushchem? Obzor tendentsii i faktorov razvitiia otrasli na osnove ezhegodnogo oprosa top-menedzherov zarubezhnykh kompanii, provedennogo PwC* [How will transport and logistics develop in the near future? Overview of industrial trends and factors based on annual survey of top managers from foreign companies conducted by PwC]. Available at: <https://glonassgps.com/kak-budut-razvivatsya-transport-i-logistika-v-blizajsem-budusem> (accessed: 20.04.2021).

2. *Tsifrovaia transformatsiia* [Digital transformation]. Available at: <https://www.sap.com/cis/insights/digital-transformation.html> (accessed: 20.04.2021).

3. Petrov A. V. Imitatsiia kak osnova tekhnologii tsifrovyykh dvoynikov [Imitation as basis for digital twin technology]. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2018, vol. 22, no. 10 (141), pp. 56–66.

4. Levitin I. E., Maiboroda V. P. Tsifrovaia ekonomika v zadachakh upravleniia i ekspertnoi otsenki transportno-logisticheskikh projektov i protsessov ikh zhiznennogo tsikla [Digital economy in problems of management and expert evaluation of transport and logistics projects and processes of their life cycle]. *Kachestvo. Innovatsii. Obrazovanie*, 2017, no. 7 (146), pp. 71–76.

5. Hermann M., Pentek T., Otto B. Design principles for industrie 4.0 scenarios. *2016 49th Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS)* (5-8 Jan. 2016). Article 7427673. Pp. 3928–3937. DOI: 10.1109/HICSS.2016.488.

6. Serrano-Hernandez A., Faulin J., Hirsch P., Fikar C. Agent-based simulation for horizontal cooperation in logistics and transportation: From the individual to the grand

coalition. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 2018, vol. 85, pp. 47–59.

7. Kulakov A. D., Dmitriev V. A., Salogubova E. V. Sushchestvuiushchie podkhody k otsenke sotsial'no-ekonomicheskikh effektivnostei ot realizatsii transportno-logisticheskikh projektov [Existing approaches to assessing socio-economic effects from implementation of transport and logistics projects]. *Ekonomika i upravlenie: problemy, resheniia*, 2021, vol. 1, no. 1 (109), pp. 63–70.

8. Piatayev M. V. Otsenka ozhidaemoi effektivnosti projektov sozdaniia transportno-logisticheskikh tsentrov [Evaluation of expected efficiency of projects for creating transport and logistics centers]. *Region: ekonomika i sotsiologiya*, 2009, no. 3, pp. 198–211.

9. Nyrkov A. P. *Avtomatizirovanoe upravlenie i optimizatsiia tekhnologicheskikh protsessov v transportnykh uzлах. Dissertatsiia ... d-ra tekhn. nauk* [Automated control and optimization of technological processes in transport hubs. Diss. ... Dr. Tech.Sci.]. Saint-Petersburg, 2003. 304 p.

10. Burkov V. N., Gubko M. V., Korgin N. A., Novikov D. A. Teoriia upravleniia organizatsionnymi sistemami i drugie nauki ob upravlenii organizatsionnymi sistemami [Theory of management of organizational systems and other sciences about management of organizations]. *Problemy upravleniia*, 2012, no. 4, pp. 2–10.

11. Burkov V. N., Korgin N. A., Novikov D. A. Control mechanisms for organizational-technical systems: problems of integration and decomposition. *IFAC-PapersOnLine*, 2016, vol. 49–32, pp. 001–006. DOI.org/10.1016/j.ifacol.2016.12.180.

12. Novikov D. A. *Teoriia upravleniia organizatsionnymi sistemami* [Theory of management of organizational systems]. Moscow, Izd-vo MPSI, 2005. 584 p.

13. Makarenko A. *Vvedenie v setentsricheskie informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Introduction to network-centric information and control systems]. Available at: <http://www.rden.ru/estimation/2010/03042010.shtml> (accessed: 20.04.2021).

14. Khanova A. A. Priniatie upravlencheskikh reshenii na osnove mul'tiaspektного integrirovannogo modelirovaniia slozhnykh sistem [Management decision-making based on multi-aspect integrated modeling of complex systems]. *Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naia tekhnika i informatika*, 2016, no. 4, pp. 99-108.

15. Protalinskiy O., Khanova A., Shcherbatov I. Simulation of Power Assets Management Process. *Studies in Systems, Decision and Control*, 2019, vol. 199, pp. 88-501.

16. Bondareva I. O., Shendo M. V., Luneva T. V., Khanova A. A. Logical-probabilistic and simulation modeling as

a toolkit for complex analysis and risk management of a cargo port. E3S Web of Conferences. *TPACEE-2020*, 2020, vol. 224, p. 02027. DOI.org/10.1051/e3sconf/202022402027.

17. Hartmann S. Generating scenarios for simulation and optimization of container terminal logistics. *OR Spectrum*, 2004, vol. 26, pp. 171-192. DOI.org/10.1007/s00291-003-0150-6.

18. Silva V. M. D., Novaes A. G. Analysis and simulation of collaboration policies among manufacturing industries and its effects on the maritime transportation cost. *Marine Systems & Ocean Technology*, 2017, vol. 12, pp. 65-79. DOI.org/10.1007/s40868-017-0024-4.

19. Durán J. M. What is a Simulation Model? *Minds & Machines*, 2020, vol. 30, pp. 301-323. DOI.org/10.1007/s11023-020-09520-z.

20. Mazza R. M. Simulation-based optimization in port logistics. *4OR-Q J. Oper. Res.*, 2012, vol. 10, pp. 313-314. DOI.org/10.1007/s10288-011-0184-6.

Статья поступила в редакцию 20.12.2021; одобрена после рецензирования 28.12.2021; принята к публикации 17.01.2022
The article is submitted 20.12.2021; approved after reviewing 28.12.2021; accepted for publication 17.01.2022

Информация об авторах / Information about the authors

Алексей Игоревич Рожко – доцент кафедры эксплуатации водного транспорта; Астраханский государственный технический университет; Астрахань, ул. Татищева, 16; rozhkoai@gmail.com

Alexey I. Rozhko – Assistant Professor of the Department of Water Transport Operation; Astrakhan State Technical University; Astrakhan, Tatishcheva street, 16; rozhkoai@gmail.com

Анна Алексеевна Ханова – доктор технических наук, доцент; профессор кафедры прикладной информатики; Астраханский государственный технический университет; Астрахань, ул. Татищева, 16; akhanova@mail.ru

Anna A. Khanova – Doctor of Technical Sciences, Assistant Professor; Professor of the Department of Applied Informatics; Astrakhan State Technical University; Astrakhan, Tatishcheva street, 16; akhanova@mail.ru

