

УДК 681.3

DOI: [10.26102/2310-6018/2021.34.3.021](https://doi.org/10.26102/2310-6018/2021.34.3.021)

Особенности построения системы принятия решений при многовариантной оптимизации структуры цифрового управления логистическим процессом в организационной системе на основе имитационного моделирования

А.С. Борзова¹, В.В. Муха²

¹Московский государственный технический университет гражданской авиации,
Москва, Российская Федерация

²Воронежский государственный технический университет,
Воронеж, Российская Федерация

Резюме. В статье рассматриваются особенности построения системы принятия решений при многовариантной оптимизации структуры цифрового управления логистическим процессом. Ключевой особенностью является интеграция процесса перемещения результатов деятельности объектов организационной системы, участвующих в логистическом процессе, и информационного обмена между цифровыми платформами управляющего центра и объектов. Разнообразие структурных взаимосвязей между уровнями цифрового управления определяет необходимость выбора оптимального варианта по двум множествам показателей, характеризующих, с одной стороны, эффективность перемещения материальных потоков, а с другой – эффективность информационного обмена между цифровыми платформами. Исходя из этих особенностей, можно обосновать компоненты системы принятия решений, позволяющей на основе требований, которые определены управляющим центром, выбрать оптимальное структурное решение. Поскольку процесс выбора осуществляется на множестве показателей эффективности, его формализованное описание представляется в форме задач многокритериальной оптимизации. В этом случае для алгоритмизации принятия решений предложено использование имитационной модели многофазной системы массового обслуживания, адекватной цифровому управлению перемещением материальных потоков между объектами организационной системы.

Ключевые слова: логистический процесс, цифровое управление, система принятия решений, многовариантная оптимизация, имитационное моделирование

Для цитирования: Борзова А.С., Муха В.В. Особенности построения системы принятия решений при многовариантной оптимизации структуры цифрового управления логистическим процессом в организационной системе на основе имитационного моделирования.

Моделирование, оптимизация и информационные технологии. 2021;9(3). Доступно по: <https://moitvvt.ru/ru/journal/pdf?id=1048> DOI: 10.26102/2310-6018/2021.34.3.021

Features of building a decision-making system with multivariate optimization of the logistics process digital control structure in a simulation-based organizational system

A.S. Borzova¹, V.V. Mukha²

¹Moscow State Technical University of Civil Aviation,
Moscow, Russian Federation

²Voronezh State Technical University,
Voronezh, Russian Federation

Abstract: The article discusses the features of building a decision-making system with multivariate optimization of the logistics process digital control structure. The key feature is integrating the transfer

of organizational system objects' activities results, participating in the logistics process, with information exchange between the digital platforms of the control center and objects. The variety of structural relationships between the levels of digital control determines the need to choose the optimal option for two sets of indicators that characterize, on the one hand, the material flows movement efficiency, and on the other, the efficiency of information exchange between digital platforms. Taking these features into consideration, the components of the decision-making system have been substantiated, which allows, on the basis of the requirements determined by the management center, to choose the optimal structural solution. Since the selection process is carried out on a set of performance indicators, its formalized description is presented in the form of multicriteria optimization problems. In this case, it is proposed to use a simulation model of a multiphase queuing system, adequate to digital control of the material flows movement between objects of the organizational system with a view to algorithmization of decision-making.

Keywords: logistics process, digital control, decision-making system, multivariate optimization, simulation

For citation: Borzova A.S., Mukha V.V. Features of building a decision-making system with multivariate optimization of the structure of digital control of the logistics process in an organizational system based on simulation. *Modeling, Optimization and Information Technology*. 2021;9(3). Available from: <https://moitvvt.ru/ru/journal/pdf?id=1048> DOI: 10.26102/2310-6018/2021.34.3.021 (In Russ).

Введение

В настоящее время происходит ускорение трансформации процессов функционирования в организационных системах разнообразных сфер деятельности за счет интенсификации применения цифровых технологий. Основные тенденции такого ускорения в значительной мере проявляются при управлении логистическим процессом, что существенным образом влияет на эффективность системы в целом [1-3]. Управляемое перемещение результатов деятельности объектов организационной системы между собой и к потребителям с использованием цифровых средств требует синхронного управления материальными и информационными потоками на основе оптимизационного подхода.

Логистический процесс в организационной системе будем рассматривать как последовательную совокупность действий, осуществляемых центром при внутреннем движении результатов деятельности объектов организационной системы $O_i, i = \overline{1, I}$, участвующих в логистических цепочках, и доставки этих результатов потребителям. Таким образом, логистический процесс является управляемым и характеризуется, с одной стороны, внутрисистемными связями, а с другой – связями с внешней средой. Локальные действия управляющего центра по перемещению результатов деятельности i -го объекта, представляют собой элементы $r = \overline{1, R}$ логистического процесса.

Оптимизационный подход к выбору структуры взаимодействия цифровых средств управляющего центра и объектов организационной системы, участвующих в логистическом процессе, опирается на метод имитационного моделирования материальных и информационных потоков [4] и связан с алгоритмизацией принятия решений с использованием адаптивного подхода к многокритериальной оптимизации [5].

Целью настоящей работы является построение системы принятия решений при многовариантной оптимизации структуры цифрового управления логистическим процессом.

Для достижения поставленной цели решаются следующие задачи:

- 1) формирование структуры системы принятия решений с учетом особенностей оптимизации цифрового управления логистическим процессом;
- 2) алгоритмизация принятия решений с использованием имитационного моделирования преобразования материальных и информационных потоков.

Формирование структуры системы принятия решений с учетом особенностей оптимизации цифрового управления логистическим процессом

Охарактеризуем основную особенность оптимизации цифрового управления логистическим процессом [6-8] – интегрированность цифрового управления материальными и информационными потоками логистического процесса в единой цифровизированной среде организационной системы.

С учетом интегрированности цифрового управления материальными и информационными потоками как на уровне управляющего центра, так и на уровне объектов организационной системы, участвующих в логистических действиях, цифровизированный логистический процесс в целом представим структурной схемой, приведенной на Рисунке 1.

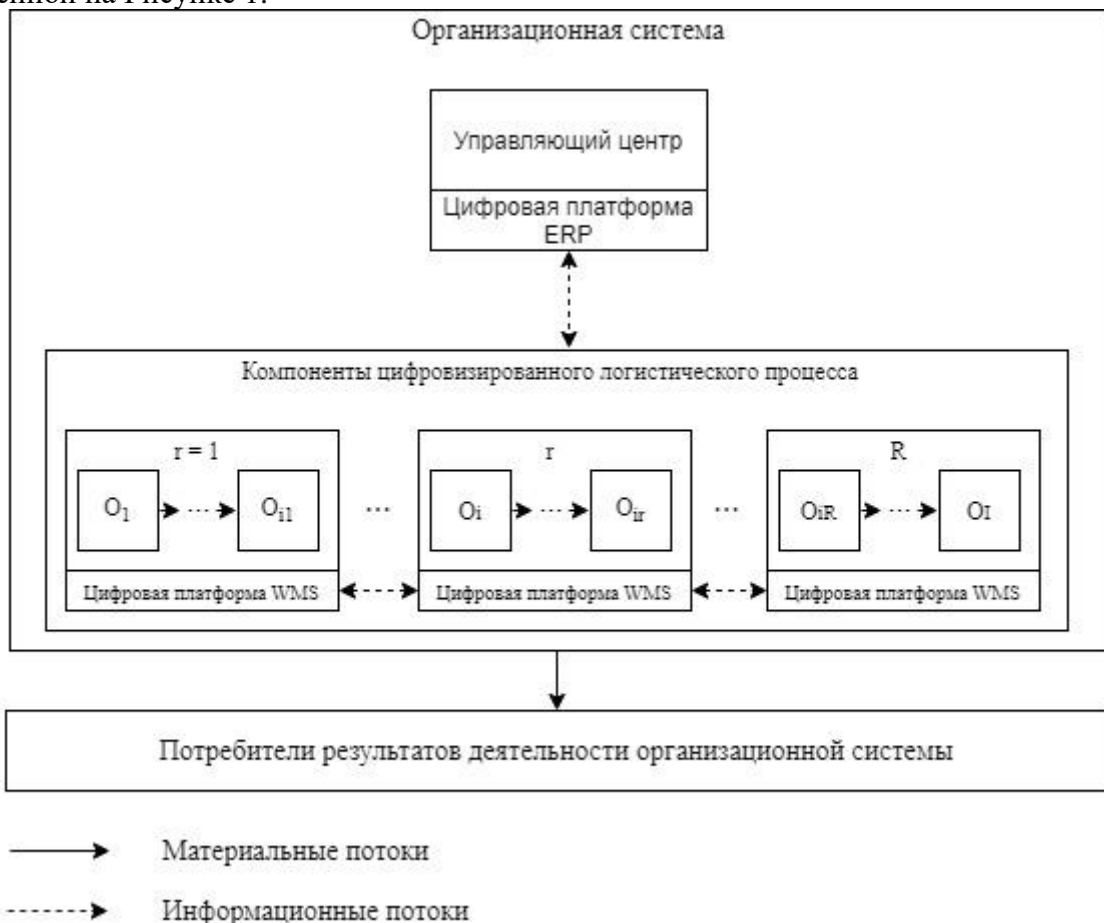


Рисунок 1 – Структурная схема цифровизированного логистического процесса в организационной системе

Figure 1 – Block diagram of the digitalized logistics process in the organizational system

Эффективность структурных решений оценивается, с одной стороны, показателями, характеризующими перемещение результатов деятельности объектов

организационной системы: $\Psi_j, j = \overline{1, J}$, а с другой – показателями информационного обмена между цифровыми средствами управления $\Psi_{j,j'}, j' = \overline{1, J'}$.

Рассмотрим еще ряд особенностей.

Возможность многовариантного моделирования оценочных показателей с использованием результатов мониторинга.

В [3] показано, что средства цифрового управления логистическим процессом выполняют функцию автоматизации контроля показателей, характеризующих их текущее состояние и возможность их мониторинга с определенной периодичностью.

Статистическая обработка результатов мониторинга позволяет получить информацию о характеристиках материальных и информационных потоков, определяющих перемещение результатов деятельности объектов организационной системы. Эту информацию целесообразно использовать для вычисления показателей $\Psi_j, j = \overline{1, J}$ на основе имитационного моделирования потоков в зависимости от структурных решений взаимодействия цифровых платформ управляющего центра и объектов, участвующих в логистических действиях [4]. Такая возможность создает предпосылки для учета при многовариантном моделировании показателей эффективности управления материальными и информационными потоками логистического процесса, представленного на Рисунке 1.

Необходима верификация структурных решений по показателям эффективности обмена данными между цифровыми платформами.

Многовариантное моделирование при оптимальном выборе структурных решений позволяет выделить несколько доминирующих вариантов взаимодействия цифровых платформ. Каждая структура цифрового управления логистическим процессом трансформируется в определенные программные средства, обеспечивающие обмен данными между цифровыми платформами. При этом способ реализации обмена данными характеризуется своим множеством показателей эффективности $\Psi_{j,j'}, j' = \overline{1, J'}$. Поэтому требуется трансформировать структурное решение в соответствующий способ реализации обмена данными и перевести ее верификацию по показателям $\Psi_{j,j'}, j' = \overline{1, J'}$.

В большинстве случаев перечисленные особенности учитываются управляющим центром путем принятия ряда административных решений по переходу к цифровому управлению логистическим процессом в организационной системе:

- формирование требований к показателям эффективности преобразования материальных потоков $\Psi_j^o, j = \overline{1, J}$ и информационных потоков $\Psi_{j,j'}^o, j' = \overline{1, J'}$;
- выбор цифровой платформы на уровне управляющего центра и на уровне объектов организационной системы и структуры их взаимодействия в соответствии с требованиями к показателям $\Psi_j^o, j = \overline{1, J}$;
- трансформация структурного решения в способ управления обмена данными между цифровыми платформами в соответствии с требованиями $\Psi_{j,j'}^o, j' = \overline{1, J'}$.

Однако эти решения принимаются только на основе экспертного оценивания, что не всегда приводит к оптимальному результату. Поэтому предлагается организовать поддержку административных решений с использованием формализованных методов моделирования и оптимизации, объединяющих в подсистему поддержки принятия решений ряд модулей:

- многовариантное моделирование при оптимизации цифрового управления на фиксированном множестве структурных решений в соответствии с требованиями $\Psi_j^o, j = \overline{1, J}$;

— многовариантное моделирование при оптимизации цифрового управления на варьируемом множестве структурных решений в соответствии с требованиями $\Psi_{j',j'}^o = \overline{1, J'}$;

— верификация структурных решений по показателям эффективности обмена данными между цифровыми платформами и выбор окончательного варианта в соответствии с $\Psi_{j',j'}^o = \overline{1, J'}$.

Функционирование перечисленных модулей требует привлечения следующей информации:

— мониторинговых данных показателей эффективности цифровизированного логистического процесса с применением пакета статистической обработки;

— экспертных оценок соответствия показателей эффективности цифрового управления логистическим процессом требованиям.

Перечисленные модули предлагается объединить в единую систему принятия решений при оптимизации цифрового управления логистическим процессом в организационной системе, структурная схема которой представлена на Рисунке 2.

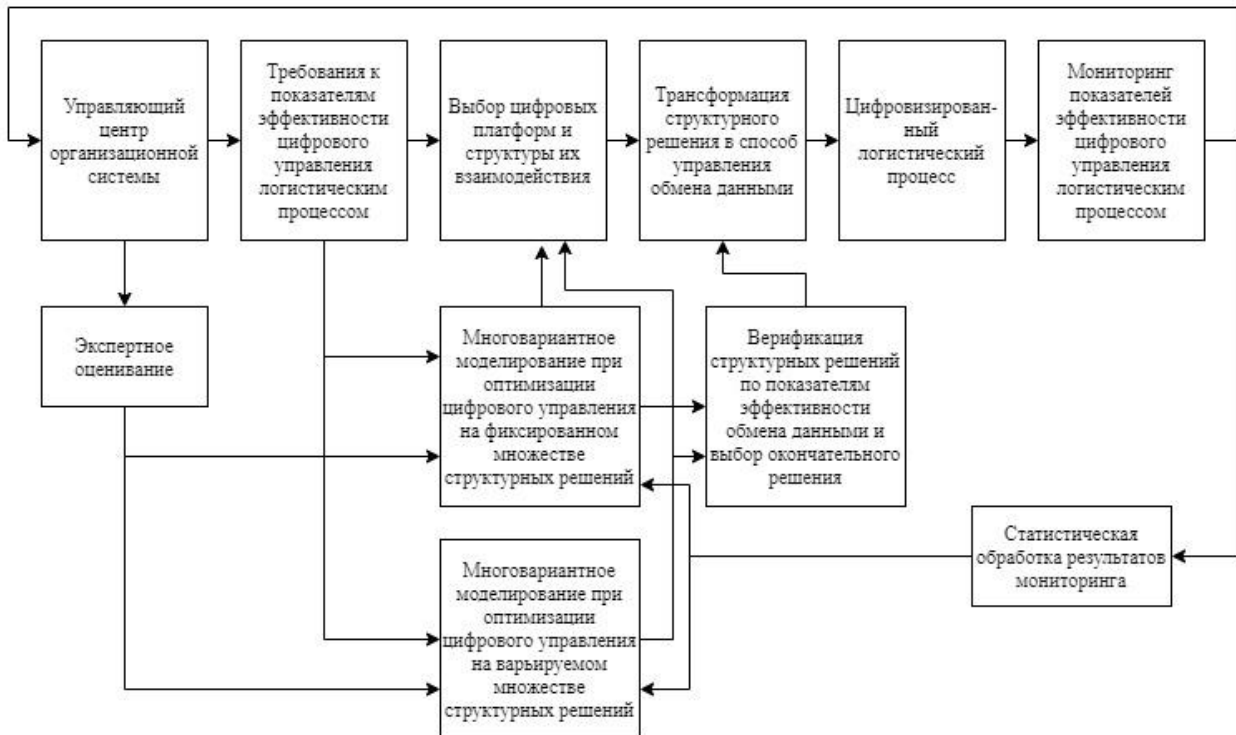


Рисунок 2 – Структурная схема системы принятия решений при оптимизации цифрового управления логистическим процессом в организационной системе

Figure 2 – Block diagram of the decision-making system when optimizing digital control of the logistics process in the organizational system

Алгоритмизация принятия решений с использованием имитационного моделирования преобразования материальных и информационных потоков

Алгоритмизация принятия решений при оптимальном выборе на множестве фиксированных или варьируемых вариантов структуры цифрового управления логистическим процессом в организационной системе требует при формировании итерационных процессов адаптивного поиска вычисления показателей эффективности [9, 10].

В случае вычисления показателей эффективности преобразования материального потока предлагается использовать имитационное моделирование R -фазной системы массового обслуживания [4].

Для формирования имитационной модели r -й фазы цифровизированного логистического процесса используем следующие данные:

$i_r = \overline{1, I_r}$ – нумерационное множество объектов O_{i_r} , входящих в r -й цифровизированный компонент логистического процесса;

λ_r – интенсивность пуассоновского входного потока заявок на выходе предыдущего $(r - 1)$ -го компонента;

λ_{ir} – интенсивность потока заявок на выходе объекта O_{i_r} ;

μ_{ir} – интенсивность обслуживания заявок объектом O_{i_r} , при показательном законе распределения времени обслуживания t_{ir} ;

t – текущее время имитационного моделирования логистического процесса;

T – заданное время имитационного моделирования;

$v = \overline{1, V}$ – нумерационное множество заявок, обслуженных за время имитационного моделирования T .

По результатам имитационного моделирования определяются следующие временные, экономические и надежностные показатели эффективности перемещения материального потока логистического процесса:

Ψ_1 – среднее время ожидания обслуживания заявок в системе;

$$\Psi_1 = \frac{\sum_{v=1}^V \sum_{i_r=1}^{I_r} \tau_v^{\text{ож}}(i_r = \overline{1, I_r})}{I_r V};$$

Ψ_2 – среднее время простоя объектов организационной системы, участвующих в логистическом процессе,

$$\Psi_2 = \frac{\sum_{v=1}^V \sum_{i_r=1}^{I_r} \Delta_v(i_r = \overline{1, I_r})}{I_r V};$$

Ψ_3 – затраты на реализацию r -й фазы логистического процесса,

$$\Psi_3 = c_r V,$$

где c_r – средние затраты на обслуживание одной заявки в r -й фазе логистического процесса;

Ψ_4 – затраты, связанные с ожиданием заявок в накопителе,

$$\Psi_4 = \sum_{v=1}^V \sum_{i_r=1}^{I_r} \tau_v^{\text{ож}}(i_r = \overline{1, I_r}) c_{i_r}^{\text{H}},$$

где $c_{i_r}^{\text{H}}$ – удельные затраты в единицу времени ожидания в накопителе объекта O_{i_r} ;

Ψ_5 – затраты, связанные с простоем объектов логистического процесса,

$$\Psi_5 = \sum_{v=1}^V \sum_{i_r=1}^{I_r} \Delta_v(i_r = \overline{1, I_r}) c_{i_r}^{\text{пр}},$$

где $c_{i_r}^{\text{пр}}$ – удельные затраты в единицу времени, связанные с простоем объектов логистического процесса;

Ψ_6 – вероятность отказа обслуживания элементов материального потока,

$$\Psi_6 = \frac{V^{\text{от}}(T)}{V}.$$

Вычисление показателей эффективности информационного обмена в трехуровневой (кластерной) системе цифрового управления [10] для организации итерационного процесса $k_1 = 1, 2, \dots$ рандомизированного поиска на множестве альтернативных переменных оптимизационной модели $x_1, x_2, x_3, x_{im}, i_m = \overline{1, I_m}, m = \overline{1, M}$ предлагается осуществить на основе имитационного моделирования с использованием двух групп данных:

— связанных с образованием последовательно-параллельных каналов информационного обмена XML-документами между цифровыми платформами в рамках

кластерной структуры на основе вероятностных характеристик $P_{x_1}^{k_1}, P_{x_2}^{k_1}, P_{x_3}^{k_1}, P_{x_{im}}^{k_1}, i_m = \overline{1, I_m}, m = \overline{1, M}$;

— характеризующих интенсивности информационного обмена XML-документами между цифровыми платформами.

Вторая группа данных аналогична приведенным выше для имитационного моделирования R -фазной системы массового обслуживания.

Первая группа данных формируется в следующей последовательности:

— на основе значений вероятностей $P_{x_1}^{k_1}, P_{x_2}^{k_1}, P_{x_3}^{k_1}$ определяются значения альтернативных переменных

$$x_1 = \begin{cases} 1, & \text{если } P_{x_1}^{k_1} \leq \xi, \\ 0, & \text{в противном случае;} \end{cases}$$

$$x_2 = \begin{cases} 1, & \text{если } P_{x_2}^{k_1} \leq \xi, \\ 0, & \text{в противном случае;} \end{cases}$$

$$x_3 = \begin{cases} 1, & \text{если } P_{x_3}^{k_1} \leq \xi, \\ 0, & \text{в противном случае} \end{cases}$$

и число каналов информационного обмена между цифровой платформой управляющего центра и главными цифровыми платформами кластеров M ;

— на основании значений вероятностей $P_{x_{im}}^{k_1}$ определяются значения альтернативных переменных

$$x_{im} = \begin{cases} 1, & \text{если } P_{x_{im}}^{k_1} \leq \xi \\ 0, & \text{в противном случае, } i_m = \overline{1, I_m}, m = \overline{1, M}. \end{cases}$$

Осуществляется последовательная коррекция значений x_{im}^{ck} в соответствии с условием $\sum_{m=1}^m x_{1m} = 1, \dots, \sum_{m=1}^M x_{Im} = 1$,

где $i = \overline{1, I}$ и I – общее число объектов O_i , участвующих в логистическом процессе в отличие от нумерационных множеств $i_m = \overline{1, I_m}$ объектов O_{im} , относящихся к m -му кластеру, и определится по значениям x_{im}^{ck} :

— число каналов информационного обмена I_m между главной цифровой платформой и цифровыми платформами кластеров

$$I_m = \sum_{i=1}^I x_{im}^{ck}, m = \overline{1, M},$$

— номера объектов, включенных в m -й кластер, для которых $x_{im}^{ck} = 1$.

Заключение

С целью построения системы принятия решений при цифровом управлении логистическим процессом организационной системы следует ориентироваться на ряд особенностей такого рода цифровой трансформации управляемого перемещения результатов деятельности объектов, участвующих в логистическом процессе:

- интегрированность цифрового управления материальными и информационными потоками в единой цифровизированной среде;
- мультиплатформенность цифрового управления;
- многовариантность структурных решений при взаимодействии цифровых платформ;
- векторность оценки эффективности структурных решений взаимодействия цифровых платформ;
- возможность многовариантного моделирования оценочных показателей;
- необходимость верификации структурных решений по показателям эффективности обмена данными между цифровыми платформами.

Основой формализованного подхода к алгоритмизации принятия решений является многовариантная оптимизация структуры цифрового управления. При этом необходимо учитывать ряд факторов, связанных с наличием двух множеств показателей эффективности, поиском оптимального структурного решения на фиксированном и варьируемом множестве вариантов с привлечением методов экспертного оценивания. Это позволяет перейти к эквивалентным задачам векторной оптимизации на основе:

- методов их скаляризации;
- включения в цикл принятия решения имитационного моделирования перемещения результатов деятельности объектов организационной системы;
- верификации по показателям информационного обмена между цифровыми средствами.

ЛИТЕРАТУРА

1. Еловой И.А., Лебедева И.А. Интегрированные логистические системы доставки ресурсов: (теория, методология, организация). Минск: Право и экономика. 2011:460.
2. Формирование цифровой экономики и промышленности: новые вызовы; под ред. А.В. Бабкина. СПб: Издательство Политехнического университета. 2018:660.
3. Логунова И.В., Трощенко Д.В. Модель логистической системы предприятия в условиях цифровой экономики. *Эконом инфо*. 2019;16(2-3):81-86.
4. Снапелев Ю.М., Старосельский В.А. Моделирование и управление в сложных системах. М.: Сов. радио. 1974:264.
5. Львович И.Я., Львович Я.Е., Фролов В.Н. Информационные технологии моделирования и оптимизации: краткая теория и приложения: монография. Воронеж: ИПЦ «Научная книга». 2016:444.
6. Гелисханов И.З., Юдина Т.Н., Бабкина А.В. Цифровые платформы в практике: сущность, модели, тенденции развития. *Научно-технические вероятности СПбГПУ: Экономические науки*. 2018;II(6):22-26.
7. Гретченко А.И., Горохова И.В. Цифровая платформа – новая бизнес-модель в экономике. *Вестник российского экономического университета имени Г.В. Плеханова*. 2019;1(103):62-72.
8. Мрочковский Н.С., Ляндау Ю.В., Пушкин И.С., Кривоногов Е.А. Основные тенденции цифровой трансформации бизнеса. *Экономика и предпринимательство*. 2019;4(105):89-91.
9. Борзова А.С., Львович Я.Е., Муха В.В. Оптимизация выбора структуры гибкого кластерного взаимодействия цифровых средств управления логистическим процессом в организационной системе. *Вестник Российского нового университета: Сложные системы: модели, анализ, управление*. 2021;2:35-44.
10. Борзова А.С., Львович Я.Е., Муха В.В. Многокритериальное моделирование выбора варианта структуры управления логистическим процессом в организационной системе. *Моделирование, оптимизация и информационные технологии*. 2021;2:17-18.

REFERENCES

1. Elovoy I.A., Lebedeva I.A. Integrated logistics systems for the delivery of resources: (theory, methodology, organization). Minsk: Law and Economics. 2011:460. (In Russ)
2. Formation of the digital economy and industry: new challenges; ed. A.V. Babkin. St. Petersburg: Publishing House of the Polytechnic University. 2018:660. (In Russ)

3. Logunova I.V., Troshchenko D.V. Model of the logistics system of an enterprise in the digital economy. *Economy info*. 2019;16(2-3):81-86. (In Russ)
4. Snapelev Yu.M., Staroselsky V.A. Modeling and control in complex systems. M.: Sov. radio. 1974:264. (In Russ)
5. Lvovich I.Ya., Lvovich Ya.E., Frolov V.N. Information technologies for modeling and optimization: a brief theory and applications: monograph. Voronezh: IPC «Scientific book». 2016:444. (In Russ)
6. Geliskhanov I.Z., Yudina T.N., Babkina A.V. Digital platforms in practice: essence, models, development trends. *Scientific and technical probabilities of SPbSPU: Economic sciences*. 2018;II(6):22-26. (In Russ)
7. Gretchenko A.I., Gorokhova I.V. Digital platform – a new business model in the economy. *Bulletin of the Russian Economic University named after G.V. Plekhanov*. 2019;1(103):62-72. (In Russ)
8. Mrochkovsky N.S., Lyandau Yu.V., Pushkin I.S., Krivonogov E.A. The main trends in digital transformation of business. *Economics and Entrepreneurship*. 2019;4(105):89-91. (In Russ)
9. Borzova A.S., Lvovich Ya.E., Fly V.V. Optimization of the choice of the structure of flexible cluster interaction of digital means of managing the logistic process in the organizational system. *Bulletin of the Russian New University: Complex systems: models, analysis, control*. 2021;2:35-44. (In Russ)
10. Borzova A.S., Lvovich Ya.E., Fly V.V. Multicriteria modeling of the choice of a variant of the structure of management of the logistic process in the organizational system. *Modeling, optimization and information technologies*. 2021;2:17-18. (In Russ)

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Борзова Анжела Сергеевна, проректор, доктор технических наук, доцент, Московский государственный технический университет гражданской авиации, Москва, Российская Федерация.

e-mail: a.borzova@mstuca.aero

Муха Владимир Владимирович, аспирант, Воронежский государственный технический университет, Воронеж, Российская Федерация.

e-mail: vladimirmuxa@gmail.com

Angela S. Borzova, Vice-Rector, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Moscow State Technical University of Civil Aviation, Moscow, Russian Federation.

Vladimir V. Mukha, postgraduate student, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation.

Статья поступила в редакцию 11.09.2021; одобрена после рецензирования 20.09.2021; принята к публикации 28.09.2021.

The article was submitted 11.09.2021; approved after reviewing 20.09.2021; accepted for publication 28.09.2021.