

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ



DOI: 10.26794/2404-022X-2020-10-1-102-111

УДК 519.17(045)

JEL C61, C63

Моделирование транспортно-логистических систем и исследование их структурной устойчивости

Д.В. Яцкин^а, А.А. Кочкаров^б, Р.А. Кочкаров^с^а Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), Москва, Россия;^{б,с} Финансовый университет, Москва, Россия^а <https://orcid.org/0000-0003-2914-0907>; ^б <https://orcid.org/0000-0002-3232-5331>;^с <https://orcid.org/0000-0003-3186-3901>

АННОТАЦИЯ

Важным параметром транспортно-логистической задачи является структурная устойчивость системы к внешним воздействиям. В современной литературе понятие структурной устойчивости определяется применительно для каждой индивидуальной задачи, в результате чего появляются сложности применения разработанных методов в новых задачах. Статья посвящена оценке устойчивости функционирования транспортно-логистических систем. Методологическая база исследования включает теорию оптимального управления и многокритериальную оптимизацию, в качестве инструментов моделирования используются элементы теории графов, а также численный анализ для оценки коэффициентов устойчивости. Представлен перечень воздействий на систему в виде элементарных событий над графами, в том числе их суперпозиции. Отражено понятие структурного разрушения графа, что подразумевает разбиение графа на несвязные компоненты. Сформулирована постановка комбинированной транспортно-логистической задачи – поиска потоков и маршрутов. Предложен коэффициент эффективности для сравнения полученных решений, а также коэффициент устойчивости для оценки влияния структурных изменений в графе на решение задачи. Проведена компьютерная симуляция структурного разрушения на тестовых наборах данных. В результате ряда экспериментов установлено распределение специального коэффициента для элементарных процессов разрушения, задан интервал допустимых значений, соответствующий устойчивому состоянию системы. Теоретическая значимость исследования заключается в возможности использования полученных результатов на этапе конструирования транспортно-логистических сетей. С практической точки зрения представленные инструменты могут быть использованы для оценки устойчивости функционирования существующих транспортно-логистических систем.

Ключевые слова: транспортно-логистическая система; структурная устойчивость; граф; поиск решения; коэффициент эффективности

Для цитирования: Яцкин Д.В., Кочкаров А.А., Кочкаров Р.А. Моделирование транспортно-логистических систем и исследование их структурной устойчивости. *Управленческие науки = Management Sciences in Russia*. 2020;10(1):102-111. DOI: 10.26794/2404-022X-2020-10-1-102-111

ORIGINAL PAPER

Modeling of Transport and Logistics Systems and the Study of the Structural Stability

D.V. Yatskin^а, A.A. Kochkarov^б, R.A. Kochkarov^с^а Moscow Institute of Physics and Technology, Moscow, Russia;^{б,с} Financial University, Moscow, Russia^а <https://orcid.org/0000-0003-2914-0907>; ^б <https://orcid.org/0000-0002-3232-5331>;^с <https://orcid.org/0000-0003-3186-3901>

ABSTRACT

The structural stability of the system to external influences is an important parameter of the transport and logistics task. In modern literature, the concept of structural stability is defined as applied to each individual problem, as a result

© Яцкин Д.В., Кочкаров А.А., Кочкаров Р.А., 2020

of which there are difficulties in applying the developed methods to new problems. The paper describes assessing the stability of the functioning of transport and logistics systems. The methodological base of the research includes the theory of optimal control and multicriteria optimization; elements of graph theory are used as modeling tools, as well as numerical analysis to evaluate stability coefficients. A list of actions on the system in the form of elementary events over graphs, including their superposition, is proposed. There was proposed the concept of structural destruction of a graph that implies a partition of the graph into disconnected components. The formulation of the combined transport and logistics problem – the search for flows and routes. The authors propose an efficiency coefficient for comparing the obtained solutions, as well as a stability coefficient for assessing the influence of structural changes in the graph on the solution of the problem. A computer simulation of structural destruction on test data sets was carried out. As a result of experiments series, the distribution of a special coefficient for elementary fracture processes was established, as well as an interval of permissible values corresponding to a stable state of the system. The theoretical significance of the study lies in the possibility of using the results obtained at the stage of designing transport and logistics networks. From a practical point of view, the proposed tools can be used to assess the stability of the functioning of existing transport and logistics systems.

Keywords: transport and logistics system; structural stability; graph; search for a solution; efficiency ratio

For citation: Yatskin D.V., Kochkarov A.A., Kochkarov R.A. Modeling of transport and logistics systems and the study of the structural stability. *Upravlencheskie nauki = Management Sciences in Russia*. 2020;10(1):102-111. (In Russ.). DOI: 10.26794/2404-022X-2020-10-1-102-111

Введение

Последнее десятилетие как новый период развития глобальной экономики показал существенное изменение в мировом разделении труда. Это естественным образом сменило торговые балансы между участниками глобальной экономики. Такие изменения в мировой экономике, в свою очередь, привели к необходимости пересмотреть направления развития и модернизации существующих транспортно-логистических систем как на глобальном уровне, так и на региональном. Формирование новых и модернизация существующих региональных транспортно-логистических систем определит экономическое развитие самих регионов в долгосрочной перспективе.

Расходы на транспортно-логистическую деятельность в России составляют порядка 20% ВВП, в то время как среднемировые издержки составляют примерно 11% ВВП. При этом показатель транспортно-логистической привлекательности России в рейтинге Всемирного Банка за последние пять в целом не улучшается или ухудшается незначительно по некоторым составляющим. По сведениям РБК¹ снижение расходов до среднемировых 11% ВВП может высвободить порядка 180 млрд долл. США каждый год. В качестве основных факторов, влияющих на развитие транспортно-логистической системы, можно выделить: класс складских поме-

щений (скорость погрузки-разгрузки, объем площади); уровень внедрения логистики (оптимальное перемещение грузов); равномерное размещение транспортно-логистических центров (перекося в сторону размещения центров в отдельных регионах).

Поэтому изучение функционирования транспортно-логистических систем, в том числе и по средствам математического и компьютерного моделирования, остается актуальной задачей.

В настоящей работе понятие транспортно-логистической системы рассматривается исключительно в инфраструктурном смысле. Транспортно-логистическая система — это совокупность объектов и субъектов транспортной и логистической инфраструктуры, обеспечивающая транспортировку, хранение, распределение товаров. При таком определении транспортно-логистической системы одной из ключевых задач на практике становится задача обеспечения устойчивости функционирования транспортно-логистической системы, а ключевой задачей для исследований — оценка устойчивости функционирования транспортно-логистической системы.

Для транспортно-логистических задач важную роль играет такой параметр системы, как устойчивость к форс-мажорным обстоятельствам и внешним воздействиям [1], так как ими во многом определяется работоспособность такой системы (а на практике зачастую — и жизнеспособность бизнеса, построенного на ее основе).

Тем не менее понятие структурной устойчивости определяется и представляется в современной науч-

¹ Транспортная стратегия Российской Федерации на период до 2030 г. URL: <https://www.mintrans.ru/documents/2/1009> (дата обращения: 25.12.2019).

ной периодике недостаточно точно, что затрудняет применение такого подхода для решения реальных задач. Даже сам показатель устойчивости не определен однозначно, что порождает неприменимость большинства подходов в сферах, отличных от тех, для которых они были разработаны [2–4]. Дополнительным фактором, влияющим на устойчивость системы, является недетерминированность и множественность данных [5, 6].

Также следует отметить, что представленное в настоящей работе исследование лежит в русле развивающегося направления — управления структурной динамикой сложных систем [7–9]. Управление структурной динамикой сложных систем сформировалось вокруг задачи определения структурных инвариантов сетевых систем. Основополагающей идеей этого направления является сохранение важных характеристик сложной системы в условиях изменения структуры взаимосвязей (взаимоотношений, влияния) ее элементов. Уже можно с уверенностью утверждать, что идеи, методы и подходы, апробированные в крупномасштабных технических системах [10, 11], адаптируются исследователями и для изучения структурной динамики и социально-экономических и организационно-технических систем.

Целью настоящего исследования является создание инструментария оценки устойчивости функционирования транспортно-логистических систем, для чего решаются задачи: разработки теоретико-графовой модели транспортно-логистической системы; постановки многокритериальной оптимизационной задачи и описания его решения; определения процесса структурного разрушения системы в графовой терминологии; разработки коэффициента структурной устойчивости для оценки влияния структурного разрушения на решение задачи.

Вместе с этим за рамками данной работы находится исследование устойчивости решения в процессе структурного развития (значительный рост) транспортно-логистической сети, что и является темой для будущей научных изысканий [12].

Моделирование транспортно-логистической системы

Транспортно-логистическая система, как система, функционирующая на основе инфраструктурной сети, является объектом с дискретными свойствами и характеристиками. Традиционно в качестве ключевого математического инструментария

для моделирования сетевых систем, к которым относятся транспортно-логистические системы, используются подходы и методы прикладной теории графов [13].

В настоящей работе также будут использованы методы и подходы прикладной теории графов к описанию транспортно-логистической системы. В любой системе подобного рода можно выделить узлы, обладающие определенным набором попарных связей. На практике в роли узлов могут выступать пересылочные пункты (для задач доставки), станции, предназначенные для остановок того или иного транспорта (для решения задач обеспечения возможностей логистики) или, например, опорные точки, обязательные для посещения (для задачи построения маршрутов). Для каждого из приведенных примеров не составляет труда представить связи, которые соединяют узлы в этом случае.

Тогда можно построить граф $G(v, e)$, в роли вершин $\{v\}$ которого будут выступать узлы, а в роли ребер $\{e\}$ — обозначенные связи между ними. В таком случае основной спектр задач, решаемый на данном графе при моделировании решения реальных практических задач в описываемой им системе, сводится к поиску на графе обладающих определенными свойствами потоков, путей, маршрутов, циклов и т.п.

Стоит отметить, что предлагаемая в качестве модели графовая структура полностью описывает все существенные детали транспортно-логистической системы. В построенном графе объектами являются только ребра и вершины, а их параметрами — веса и пропускные способности. Соответственно, все существенные с точки зрения транспортно-логистических задач процессы, которые могут происходить с системой, полностью описываются изменениями этих объектов и параметров. Все возможные изменения можно представить как суперпозицию элементарных действий на полученном графе, список которых приведен в *табл. 1*.

При этом следует отметить, что изъятие вершины приводит к удалению всех инцидентных ей ребер, появление новой вершины без добавления инцидентных ей ребер не имеет смысла с точки зрения структурного роста, а смена типа вершины приводит к изменению компонент векторных весов инцидентных ребер.

В рамках настоящей работы изучаются вопросы структурной устойчивости, соответственно, простейшим примером воздействий, оказывающих влияние

Таблица 1 / Table 1

Список элементарных действий над графовой структурой / List of elementary actions on the graph structure

№	Действие / Operation	Пример соответствия (для рассмотренного ранее примера задачи доставки между филиалами) / Compliance example (for the previously discussed example of an inter-branch delivery task)
1	Добавление вершин / Adding vertices	Открытие пересылочного пункта / Opening a forwarding spot
2	Удаление вершины первого типа / Removing a vertex of the first type	Заккрытие пересылочного пункта / Forwarding Spot Closure
3	Добавление ребра / Adding a Rib	Появление нового канала связи / The emergence of a new communication channel
4	Удаление ребра / Removing a Rib	Невозможность использования определенного канала связи / Inability to use a specific communication channel
5	Изменение пропускной способности ребра / Rib bandwidth change	Изменение технологии доставки / Delivery Technology Change
6	Изменение векторного веса ребра / Change the vector weight of an edge	Изменение параметров доставки / Change Delivery Settings

Источник / Source: разработано авторами / developed by the authors.

именно на структуру, является отказ узлов и/или каналов связи между ними от выполнения своей роли.

Понятие структурного разрушения на образовавшейся графовой структуре определяется как совокупность элементарных действий удаления вершин и ребер графа. Если какая-то более сложная операция над графом включает в себя и другие элементарные действия, его можно разбить на структурное разрушение и побочные (с точки зрения процессов разрушения) действия.

Эффективность найденного решения

Введение понятия устойчивости к структурному разрушению, или структурной устойчивости систем, так же как и определение критериев такой устойчивости, является осмысленным только при учете особенностей решаемых транспортно-логистических задач. Дело в том, что каждая система, описываемая определенной структурой, предназначена для решения конкретной задачи или спектра задач, и процессы структурного разрушения в конечном счете оказывают влияние на решение этих задач. Именно в этом заключается практический смысл исследования таких процессов.

Соответственно, необходимо представление об эффективности того или иного решения, которое позволит оценивать эффект от его изменения.

Рассмотрим задачу расчета эффективности решения в общем виде.

Пусть условие транспортно-логистической задачи представляется в виде полного графа $G = (v, e)$. Вершины общим количеством N обозначаются как v_i , $i = \overline{1..N}$. Ребро, соединяющее вершины v_i и v_j , обозначается как e_{ij} .

Как правило, удобно рассматривать полные графы, поэтому в общем случае граф достраивается до полного. При этом все весовые коэффициенты ребер, не существовавших изначально, определяются по смыслу и, как правило, принимают нулевые или бесконечные значения.

Рассматривается множество из M элементов задачи, соответствующих объектам, на доставку которых и ориентирована конкретная транспортно-логистическая задача. Для элементов задачи определяется набор из P признаков — весовых коэффициентов ребер графа, важных для решения задачи оптимизации пути.

Изначально требуется нахождение оптимального решения комбинированной задачи (оптимизируются и потоки и маршруты). В таком случае необходимо задание начальных условий (\vec{x}, \vec{y}) .

В данном случае \vec{x} — совокупность признаков, отвечающих критерию оптимизации для каждого ребра. Для каждого конкретного ребра e_{ij} распределение x_{ij} представляет из себя двумерную матрицу, где каждому элементу задачи (множество которых всегда счетно) ставится в соответствие вектор признаков оптимизации. Таким образом, поскольку множество ребер $\{e_{ij}\}$ также удобно записывать в виде двумерной матрицы,

\bar{x} представляет из себя четырехмерную матрицу, каждый элемент которой x_{ijmp} представляет из себя p -й признак m -го элемента задачи для ребра e_{ij} .

Отдельно рассматривается совокупность пропускных способностей ребер \bar{y} . Здесь каждому ребру e_{ij} для каждого элемента задачи ставится в соответствие единственная пропускная способность. Таким образом, \bar{y} представляет собой трехмерную матрицу. Следует отметить важную особенность решения транспортно-логистических задач. Если в традиционном представлении теории графов понятие пропускной способности рассматривается только для ребер, в настоящем случае имеет практический смысл рассматривать также пропускные способности вершин. Для того чтобы не вводить новый и/или малоизвестный инструментальный рассмотрения таких ситуаций, вводится утверждение, что любой путь, содержащий вершину v_i , должен включать в себя петлю, инцидентную этой вершине. Таким образом, множество ребер полного графа с N вершинами имеет порядок не $N(N-1)/2$, а уже $N^2/2$.

Начальные условия (\bar{x}, \bar{y}) удобно представлять в виде одной матрицы I . I представляет из себя четырехмерную матрицу, состоящую из элементов I_{ijmp} , где

$$\begin{cases} i = \overline{1..N}, \\ j = \overline{1..N^2}, \\ m = \overline{1..M}, \\ p = \overline{1..(P+1)}. \end{cases}$$

Индексы i и j относятся к определению ребра (в том числе и петель), m — элемента задачи, для которого на данном ребре определяется один из признаков, определяемых индексом p . При этом к изначально рассматриваемым P признакам добавляется еще один — пропускная способность соответствующего ребра по отношению к соответствующему элементу задачи, соответствующая элементам \bar{y} . Таким образом, вместо совокупности начальных условий для задач первой и второй групп (\bar{x}, \bar{y}) происходит переход к рассмотрению матрицы начальных условий I . Следует отметить, что такое представление допустимо и для задачи одного из типов (поиска наименее затратного пути или оптимального потока).

Таким образом, настоящее описание полностью задает саму транспортно-логистическую систему. Следующим шагом является исследование решений

на ней транспортно-логистических задач для определенных элементов системы.

Для этого рассматривается поток элементов системы \bar{f} , задающий численные значения, соответствующие каждому элементу системы. Кроме того, необходимо отдельное задание оптимизационной функции. Для одного элемента задачи разумно рассматривать две оптимизационные функции $f(\bar{x})$ и $g(\bar{y})$ — отдельно и/или в совокупности. После осуществления перехода к представлению начальных условий в виде матрицы I критерий оптимизации может быть записан как $Z(I, \bar{f})$, а задача будет представляться в виде $Z(I, \bar{f}) \rightarrow \max$.

Однако в настоящем случае наибольший интерес представляет не решение задачи оптимизации как таковое, а сравнение различных решений, найденных при помощи эвристических алгоритмов или другими методами, между собой. Таким образом, необходимо определить решение задачи.

Для каждого потока элементов системы \bar{f} может быть найдено решение $\bar{s}(I, \bar{f})$ транспортно-логистической задачи. Решение представляет собой путь на графе, прохождение по которому решает исходную задачу доставки товара между точками, формализованную при помощи аппарата теории графов. В общем случае рассматривается общий путь для всех элементов задачи, однако при возможности поиска для каждого элемента своего пути задача превращается в вырожденную для каждого из M элементов задачи и происходит совокупное решение M аналогичных задач с вырожденными условиями (с рассмотрением только одного элемента задачи), что порождает упрощение задач вследствие понижения размерности матрицы I .

Итак, если речь идет о сравнении решений между собой, имеет смысл рассматривать не $Z(I, \bar{f})$, а $Z(\bar{s})$. Тогда оптимальное решение \bar{s}_{opt} будет соответствовать максимальному значению критерия оптимизации $Z_{opt} = Z(\bar{s}_{opt})$. Кроме того, \bar{s}_{opt} будет соответствовать решению описанной ранее задачи $Z(I, \bar{f}) \rightarrow \max$.

В таком случае эффективность каждого решения может сравниваться с эталонной при помощи вычисления коэффициента эффективности

$$k_{эфф} = \frac{Z(\bar{s})}{Z_{opt}}$$

Оценка влияния структурных изменений в транспортно-логистических задачах

Рассматривается транспортно-логистическая задача, условие которой представляется в виде пол-

Таблица 2 / Table 2

**Соответствие структурных изменений изменениям матрицы I /
Correspondence of structural changes to matrix I changes**

№	Структурное изменение / Structural change	Соответствующее изменение I / Corresponding change I
1	Удаление вершины v_i / Removing a vertex	Изменение всех значений I_{ijmp} на 0 или ∞ в зависимости от смысла соответствующего значения p / Change of all I_{ijmp} values to 0 or ∞ depending on the meaning of the corresponding p value
2	Добавление вершины v_i / Adding vertex	Изменение всех значений I_{ijmp} (с 0 или ∞ в зависимости от смысла соответствующего значения p) на актуальные / Change of all I_{ijmp} values (с 0 or ∞ depending on the meaning of the corresponding p) to the actual
3	Удаление ребра e_{ij} / Rib removal	Изменение значений I_{ijmp} на 0 или ∞ в зависимости от смысла соответствующего значения p / Changing I_{ijmp} values to 0 or ∞ depending on the meaning of the corresponding p
4	Добавление ребра e_{ij} / Adding a Rib	Изменение значений I_{ijmp} с 0 или ∞ (в зависимости от смысла соответствующего значения p) на актуальное значение / Changing the values of I_{ijmp} from 0 or ∞ (depending on the meaning of the corresponding p value) to the actual value
5	Изменение пропускной способности ребра e_{ij} / Rib bandwidth change	Изменение значений I_{ijmp} на соответствующее / Change the values of I_{ijmp} to the appropriate
6	Изменение векторного веса ребра e_{ij} / Change the vector weight of an edge	Изменение значений I_{ijmp} на соответствующее / Change the values of I_{ijmp} to the appropriate

Источник / Source: разработано авторами / developed by the authors.

ного графа $G = (v, e)$. Начальные условия задаются матрицей I , поток элементов задачи — \bar{f} .

Можно найти решение такой задачи и выбрать среди \bar{s} и среди множества всех решений оптимальное s_{opt} с точки зрения критерия $Z(\bar{s})$.

В таком случае любые структурные изменения повлекут за собой изменение матрицы I . Реберная структура графа G не изменится, он по-прежнему останется полным, изменится только вес ребер, а значит, значения матрицы I .

Соответствие элементарных структурных изменений модификациям матрицы I представлено в табл. 2.

В результате изменения структуры происходит изменение как в принципе всего множества решений $\{\bar{s}\}^*$, так и оптимального решения s_{opt} с точки зрения того же критерия $Z(\bar{s})$.

В каждой транспортно-логистической задаче, как правило, представляет интерес именно оптимальное

решение и его изменение. Соответственно, можно обозначить изначальное оптимальное решение как s_0 . В таком случае если после структурного изменения оптимальное решение изменилось на s_1 , можно говорить о влиянии такого структурного изменения. Влияние оценивается коэффициентом, аналогичным коэффициенту эффективности решения:

$$k_{вл} = \frac{Z(\bar{s}_1)}{Z(\bar{s}_0)}$$

Следует отметить, что в общем случае $k_{вл}$ принимает значения в интервале $[0, +\infty)$. Однако можно доказать, что при рассмотрении процессов структурного разрушения (представляющих из себя изменения, получаемые в результате суперпозиции п. 1 и 3 табл. 2), значения $k_{вл} \in [0, 1]$. Строго говоря, деструктивные процессы могут приводить и к из-

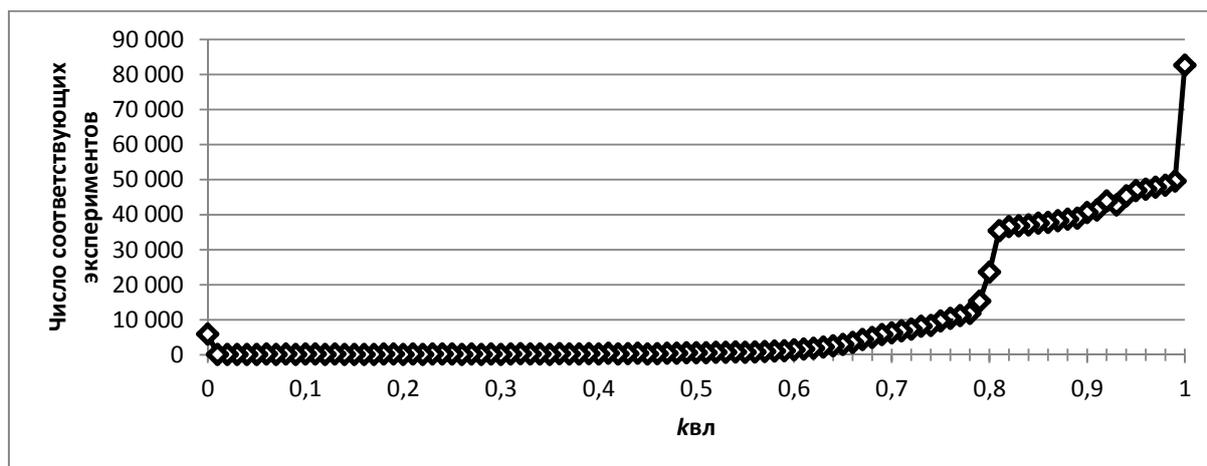


Рис./ Fig. Соответствие количества экспериментов и полученного в них значения $k_{вл}$ /
Correspondence of the experiments and the $k_{вл}$ value obtained

Источник / Source: разработано авторами / developed by the authors.

менению веса ребер, но называть их процессами структурного разрушения некорректно.

В таком случае можно судить о значимости того или иного процесса структурного разрушения по значению коэффициента $k_{вл}$. Если значение лежит в пределах допустимых норм, можно говорить о структурной устойчивости системы по отношению к соответствующему процессу разрушения.

Компьютерное моделирование

Для изучения спектра возможных значений коэффициента влияния $k_{вл}$ и распределения спектра его значений при структурных изменениях условий задачи был проведен численный эксперимент, в ходе которого были рассчитаны значения $k_{вл}$ для 5000 случайно сгенерированных значений I, \bar{f} при решении задачи поиска оптимального потока с точки зрения минимизации максимального уровня загруженности узла и одновременной минимизации суммарной стоимости такого пути. Соответственно, $Z(\bar{s})$ была выбрана таким образом, чтобы вес каждого из двух критериев оптимизации составлял $x\%$, где брались x от 0 до 100 с шагом 5.

Для каждого из 105000 наборов значений (I, \bar{f}, x) было проведено 10 экспериментов, связанных со случайными процессами структурного разрушения. В итоге было получено 1050000 значений $k_{вл}$, для которых можно подсчитать частоту достижения тех или иных значений.

При рассмотрении элементарных процессов разрушения (случайное удаление ребра/вершины матри-

цы I) в проведенном эксперименте распределение значений $k_{вл}$ представлено на рисунке.

Таким образом, представляется целесообразным рассматривать $[0,81; 1]$ как интервал допустимых значений $k_{вл}$, при достижении которого можно считать систему устойчивой к соответствующему воздействию. $k_{вл}$ приняло такое значение в 874 114 экспериментах (83,25% от общего числа экспериментов). Точка, соответствующая значению 0,81, представляет отдельный интерес для исследования в дальнейших работах.

С точки зрения практических задач это означает потерю в эффективности размером до 19%. При построении транспортно-логистических сетей на практике приемлемую для себя цифру потерь в эффективности интересанты определяют индивидуально, поэтому левая граница отрезка допустимых значений $k_{вл} \in [z; 1]$ может изменяться в зависимости от реальной задачи. Тем не менее результаты численного эксперимента дают возможность рекомендовать выбор $z = 0,81$, позволяющий обеспечить структурную устойчивость по отношению к основной массе структурных разрушений.

Заключение

В работе предложена модель описания транспортно-логистических задач и оценки влияния процессов структурного разрушения в них. Такие оценки имеют очень важное значение для исследования структурной динамики и структурной устойчивости транспортно-логистических систем по отношению к конкретным задачам [14–17].

Кроме того, предложенный и обоснованный в настоящей работе подход дает возможность исследовать эффективность решений в зависимости от потоков товаров (формализованных при помощи понятия элементов задачи), что позволяет делать выводы о допустимой нагрузке на систему и устойчивости по отношению к ее масштабированию.

Рассмотренный подход имеет большой потенциал для применения при решении обратной задачи — построения систем, устойчивых с точки зрения изменения эффективности решений (при структурных изменениях или масштабировании нагрузки).

Интересным и практически применимым является расширение предложенной модели до многопараметрической постановки с несколькими критериями и нечеткими весами, в частности интервальными числами. Исследование такой многокритериальной задачи потребует введения специальной терминологии парето-оптимальных решений, коэффициента предпочтительности, разработки точных алгоритмов выделения покрытий с заданными характеристиками, в том числе с оценкой приближенных решений.

Настоящая работа стала продолжением работ авторов по изучению структурного разрушения сложных технических систем, в основе функционирования которых находится такой объект, как «сеть» [18, 19]. Сетевые системы стали одним из распространенных объектов исследований современной науки. Провоцирован этот интерес в первую очередь накопившимся эмпирическим материалом о функционировании сетевых систем. Следующим шагом является апробация модельной задачи на реальных данных, например, таких компаний как АО «Почта России», ОАО «РЖД», ООО «Деловые линии» и др. В результате исследования также будут определены ограничения модели и возможность применения в тех или иных условиях.

В целом предложенная в работе модель представляется элементом интеллектуальной транспортно-логистической системы. Создание интеллектуальных транспортно-логистических систем является востребованной задачей на Европейском и мировом рынке перевозок. А активное использование интеллектуальных транспортно-логистических систем напрямую влияет на развитие регионов и территорий.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ КОМФИ 18–00–01103.

ACKNOWLEDGEMENT

This study was conducted with the support from the Russian Foundation for Basic Research (project KOMFI 18–00–01103).

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Захаров В.В., Щегряев А.Н. Устойчивая кооперация в динамических задачах маршрутизации транспорта. *Математическая теория игр и ее приложения*. 2012;4(2):39–56.
2. Есиков Д.О. Задачи обеспечения устойчивости функционирования распределенных информационных систем. *Программные продукты и системы*. 2015;(4):133–141.
3. Орлова Д.Е. Устойчивость решений при обеспечении функционирования организационно-технических систем. *Моделирование, оптимизация и информационные технологии*. 2018;6(1):325–336.
4. Ляпунов А. Общая задача об устойчивости движения. М.-Л.: ГИТТЛ; 1950. 472 с.
5. Кочкаров Р.А. Многовзвешенные предфрактальные графы с недетерминированными весами. Приложения в экономике, астрофизике и сетевых коммуникациях. М.: Ленанд; 2017. 432 с.
6. Кочкаров А.А., Салпагаров С.И., Кочкаров Р.А. О количественных оценках топологических характеристик предфрактальных графов. *Известия ТРТУ*. 2004;(8):298–301.
7. Соколов Б.В., Юсупов Р.М. Полимодельное описание и анализ структурной динамики систем управления космическими средствами. *Труды СПИИРАН*. 2010;(4):7–52.
8. Охтилев М.Ю., Соколов Б.В., Юсупов Р.М. Интеллектуальные технологии мониторинга и управления структурной динамикой сложных технических объектов. М.: Наука, 2006. 410 с.
9. Ипатов Ю.А., Калагин И.В., Кревецкий А.В., Соколов Б.В. Анализ динамических характеристик сложных графовых структур. *Известия высших учебных заведений. Приборостроение*. 2019;62(6):511–516. DOI: 10.17586/0021–3454–2019–62–6–511–516
10. Иванюк В.А., Абдикеев Н.М., Пашенко Ф.Ф., Гринева Н.В. Сетевые методы управления. *Управленческие науки*. 2017;7(1):26–34.

11. Кочкаров А.А., Сенникова Л.И., Халикова А.А. Новые подходы в моделировании сетевых систем. Препринт WP1/2013/03. М.: Финансовый университет; 2013. 44 с.
12. Кочкаров А.А., Кочкаров Р.А., Малинецкий Г.Г. Некоторые аспекты динамической теории графов. *Журнал вычислительной математики и математической физики*. 2015;55(9):1623–1629. DOI: 10.7868/S 0044466915090094
13. Робертс Ф.С. Дискретные математические модели с приложениями к социальным, биологическим и экологическим задачам. Пер. с англ. М.: Наука; 1986. 494 с.
14. Huber S., Klauenberg J., Thaller C. Consideration of transport logistics hubs in freight transport demand models. *European Transport Research Review*. 2015;7(32):1–14. DOI: 10.1007/s12544–015–0181–5
15. Nagurney A. et al. Spatial equilibration in transport networks. In: Henscher D.A. et al., ed. Handbook of transport geography and spatial systems. Bingley: Emerald Group Publ.; 2004;(5):583–608.
16. Lendermann P., McGinnis L.F., Mönch L., Schirmann A. Grand challenges for discrete event logistics systems. *Informatik Spektrum*. 2010;33(6):663–668.
17. Thiers G., McGinnis L. Logistics systems modeling and simulation. Proc. Winter Simulation Conference. 2011:1536–1546. URL: <https://www.informs-sim.org/wsc11papers/137.pdf> (дата обращения: 25.12.2019).
18. Watts D.J. Small worlds: The dynamics of networks between order and randomness. Princeton, Oxford: Princeton University Press; 2004. 262 p.
19. Newman M. Networks: An introduction. Oxford, New York: Oxford University Press; 2010. 784 p.

REFERENCES

1. Zakharov V.V., Shchegryaev A.N. Sustainable cooperation in dynamic transport routing problems. *Matematicheskaya teoriya igr i ee prilozheniya*. 2012;4(2):39–56. (In Russ.).
2. Esikov D. O. Tasks for ensuring the sustainability of the functioning of distributed information systems. *Programmnye produkty i sistemy = Software & Systems*. 2015;(4):133–141. (In Russ.).
3. Orlova D.E. Sustainability of decisions while ensuring the functioning of organizational and technical systems. *Modelirovanie, optimizatsiya i informatsionnye tekhnologii = Modeling, Optimization and Information Technology*. 2018;6(1):325–336. (In Russ.).
4. Lyapunov A. The general problem of traffic stability. Moscow-Leningrad: GITTL; 1950. 472 p. (In Russ.).
5. Kochkarov R.A. Multi-weighted pre-fractal graphs with non-deterministic weights. Applications in economics, astrophysics and network communications. Moscow: Lenand; 2017. 432 p. (In Russ.).
6. Kochkarov A.A., Salpagarov S.I., Kochkarov R.A. On quantitative estimates of the topological characteristics of prefractal graphs. *Izvestiya TRTU*. 2004;(8):298–301. (In Russ.).
7. Sokolov B.V. Yusupov R.M. Multiple-model description and structure dynamics analysis of space-facilities control systems. *Trudy SPIIRAN = SPIIRAS Proceedings*. 2010;(4):7–53. (In Russ.).
8. Okhtilev M. Yu., Sokolov B.V., Yusupov R.M. Intelligent technologies for monitoring and controlling the structural dynamics of complex technical objects. Moscow: Nauka; 2006. 410 p. (In Russ.).
9. Ipatov Yu.A., Kalagin I.V., Krevetsky A.V., Sokolov B.V. Analysis of dynamic characteristics of complex graph structures. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Priborostroenie = Journal of Instrument Engineering*. 2019;62(6):511–516. (In Russ.). DOI: 10.17586/0021–3454–2019–62–6–511–516
10. Ivanyuk V.A., Abdikeyev N.M., Patshenko F.F., Grineva N.V. Network-centric methods of management. *Upravlencheskie nauki = Management Sciences in Russia*. 2017;7(1):26–34. (In Russ.).
11. Kochkarov A.A., Sennikova L.I., Khalikova A.A. New approaches in modeling network systems. Preprint WP1/2013/03. Moscow: Financial University; 2013. 44 p. (In Russ.).
12. Kochkarov A.A., Kochkarov R.A., Malinetskiy G.G. Issues of dynamic graph theory. *Zhurnal vychislitel'noi matematiki i matematicheskoi fiziki = Computational Mathematics and Mathematical Physics*. 2015;55(9):1590–1596. DOI: 10.1134/S 0965542515090080
13. Roberts F.S. Discrete mathematical models with applications to social, biological and environmental problems. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, Inc.; 1976. 560 p. (Russ. ed.: Roberts F.S. Diskretnye matematicheskie modeli s prilozheniyami k sotsial'nym, biologicheskim i ekologicheskim zadacham. Moscow: Nauka; 1986. 494 p.).

14. Huber S., Klauenberg J., Thaller C. Consideration of transport logistics hubs in freight transport demand models. *European Transport Research Review*. 2015;7(32):1–14. DOI: 10.1007/s12544-015-0181-5
15. Nagurney A. et al. Spatial equilibration in transport networks. In: Henscher D.A. et al., ed. *Handbook of transport geography and spatial systems*. Bingley: Emerald Group Publ.; 2004;(5):583–608.
16. Lendermann P., McGinnis L.F., Mönch L., Schirmann A. Grand challenges for discrete event logistics systems. *Informatik Spektrum*. 2010;33(6):663–668.
17. Thiers G., McGinnis L. Logistics systems modeling and simulation. Proc. Winter Simulation Conference. 2011:1536–1546. URL: <https://www.informs-sim.org/wsc11papers/137.pdf> (accessed on 25.12.2019).
18. Watts D.J. *Small worlds: The dynamics of networks between order and randomness*. Princeton, Oxford: Princeton University Press; 2004. 262 p.
19. Newman M. *Networks: An introduction*. Oxford, New York: Oxford University Press; 2010. 784 p.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Данил Владиленович Яцкин — аспирант, Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), Москва, Россия
danil@frtk.ru

Азрет Ахматович Кочкаров — кандидат физико-математических наук, доцент, Финансовый университет, Москва, Россия
akochkar@gmail.com

Расул Ахматович Кочкаров — кандидат экономических наук, доцент, Финансовый университет, Москва, Россия
rasul_kochkarov@mail.com

ABOUT THE AUTHORS

Danil V. Yatskin — Postgraduate, Moscow Institute of Physics and Technology, Moscow, Russia
danil@frtk.ru

Azret A. Kochkarov — Cand. Sci. (Phys.-Math.), Associate Professor, Financial University, Moscow, Russia
akochkar@gmail.com

Rasul A. Kochkarov — Cand. Sci. (Econ.), Associate Professor, Financial University, Moscow, Russia
rasul_kochkarov@mail.com

Заявленный вклад авторов:

Яцкин Д.В. — сбор данных для проведения исследования, анализ данных, компьютерное моделирование, подготовка текста статьи, подготовка списка источников.

Кочкаров А.А. — подготовка обзора литературы, формулировка постановки задачи, выбор инструментария анализа, выводы, подготовка текста статьи.

Кочкаров Р.А. — проверка результатов моделирования, подготовка текста статьи, критический анализ, оформление, перевод на англ., подготовка списка источников.

The declared contribution of the authors:

Yatskin D.V. — data collection for research, data analysis, computer modeling, preparation of the article text, preparation of references.

Kochkarov A.A. — preparation of literature review, formulation of the problem statement, selection of analysis tools, conclusions, preparation of the article text.

Kochkarov R.A. — verification of simulation results, preparation of the article text, critical analysis, design, translation into English, preparation of a list of sources.

Статья поступила в редакцию 24.09.2019; после рецензирования 20.11.2019; принята к публикации 27.12.2019.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

The article was submitted on 24.09.2019; revised on 20.11.2019 and accepted for publication on 27.12.2019.

The authors read and approved the final version of the manuscript.