

Библиографическое описание согласно ГОСТ Р 7.0.100–2018

Применение иерархического анализа чувствительности к модели пропускной способности городской транспортной сети / Г. С. Боровкова, С. В. Жихорева, В. Э. Клявин, А. К. Погодаев, А. С. Сысоев. – Текст : непосредственный. – DOI 10.15593/2499-9873/2024.4.07 // Прикладная математика и вопросы управления / Applied Mathematics and Control Sciences. – 2024. – № 4. – С. 88–98.



ПРИКЛАДНАЯ МАТЕМАТИКА
И ВОПРОСЫ УПРАВЛЕНИЯ

№ 4, 2024

<https://ered.pstu.ru/index.php/amcs>



Научная статья

DOI: 10.15593/2499-9873/2024.4.07

УДК 654.1/5+681.3



Применение иерархического анализа чувствительности к модели пропускной способности городской транспортной сети

Г.С. Боровкова, С.В. Жихорева, В.Э. Клявин, А.К. Погодаев, А.С. Сысоев

Липецкий государственный технический университет, Липецк, Российская Федерация

О СТАТЬЕ

Получена: 01 ноября 2024

Одобрена: 15 ноября 2024

Принята к публикации:

28 декабря 2024

Финансирование

Исследование выполнено за счет

гранта Российского научного

фонда № 24-21-00291,

<https://rscf.ru/projects/24-21-00291/>.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии

конфликта интересов.

Вклад автора

Эквивалентный

Ключевые слова:

иерархический анализ чувствитель-

ности, пропускная способность,

транспортные потоки, математиче-

ское моделирование, критические

точки, управление транспортными

потоками.

АННОТАЦИЯ

В связи с увеличением числа личных транспортных средств в городских агломерациях и ростом грузоперевозок возникает необходимость внедрения интеллектуальных транспортных систем для разработки стратегий по снижению загруженности дорог и предотвращению дорожно-транспортных происшествий. Одним из ключевых показателей транспортной системы, отражающих эффективность использования имеющейся городской инфраструктуры, является пропускная способность планируемых маршрутов. Модель оценки пропускной способности городского маршрута на основе пропускной способности его элементов – перегонов и перекрестков – является многоуровневой, иерархической, многокритериальной. Кроме того, данная модель является динамической, поскольку ее параметры меняются с течением времени. Все это повышает вычислительную сложность анализа такой модели и приводит к необходимости уменьшить число исследуемых параметров. Один из подходов к редукции параметров модели – анализ чувствительности, основанный на анализе конечных изменений. Применительно к модели пропускной способности данный подход позволит выявить те параметры элементов маршрута, изменение которых влечет наибольшие изменения в пропускной способности маршрута в целом, и даст возможность управления ими с целью повышения общей эффективности системы.

Цель исследования заключается в разработке методики иерархического анализа чувствительности модели пропускной способности улично-дорожной сети, основанной на анализе конечных изменений, которая даёт возможность выявлять критические точки и оценивать вклад отдельных элементов и групп объектов в общую эффективность функционирования транспортной системы. Полученные результаты свидетельствуют, что предложенная методика позволяет точно определить основные факторы, воздействующие на пропускную способность, и предложить меры по оптимизации управления транспортными потоками.

© **Боровкова Галина Сергеевна** – кандидат технических наук, доцент, кафедра прикладной математики, e-mail: haligh@mail.ru, ORCID: 0009-0004-9851-6634.

Жихорева Светлана Викторовна – ассистент, кафедра прикладной математики, e-mail: zhikhoreva_sv@stu.lipetsk.ru, ORCID: 0000-0001-6904-8035.

Клявин Владимир Эрнстович – доктор технических наук, доцент, главный научный сотрудник Научно-исследовательского института, e-mail: vlk@list.ru, ORCID: 0000-0002-7839-4463.

Погодаев Анатолий Кириянович – доктор технических наук, профессор, кафедра прикладной математики, e-mail: rak@stu.lipetsk.ru, ORCID: 0000-0002-3951-5939.

Сысоев Антон Сергеевич – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой прикладной математики, e-mail: sysoev_as@stu.lipetsk.ru, ORCID: 0000-0002-0866-1124.



Эта статья доступна в соответствии с условиями лицензии Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0)

Perm Polytech Style: Borovkova G.S., Pogodaev A.K., Klyavin V.E., Zhikhoreva S.V., Sysoev A.S. Hierarchical sensitivity analysis capacity models. *Applied Mathematics and Control Sciences*. 2024, no. 4, pp. 88–98. DOI: 10.15593/2499-9873/2024.4.07

MDPI and ACS Style: Borovkova, G.S.; Pogodaev, A.K.; Klyavin, V.E.; Zhikhoreva, S.V.; Sysoev, A.S. Hierarchical sensitivity analysis capacity models. *Appl. Math. Control Sci.* **2024**, *4*, 88–98. <https://doi.org/10.15593/2499-9873/2024.4.07>

Chicago/Turabian Style: Borovkova, Galina S., Svetlana V. Zhikhoreva, Vladimir E. Klyavin, Anatoly K. Pogodaev, and Anton S. Sysoev. 2024. "Hierarchical sensitivity analysis capacity models". *Appl. Math. Control Sci.* no. 4: 88–98. <https://doi.org/10.15593/2499-9873/2024.4.07>



APPLIED MATHEMATICS
AND CONTROL SCIENCES

№ 4, 2024

<https://ered.pstu.ru/index.php/amcs>



Article

DOI: 10.15593/2499-9873/2024.4.07

UDC 654.1/5+681.3



Hierarchical sensitivity analysis capacity models

G.S. Borovkova, A.K. Pogodaev, V.E. Klyavin, S.V. Zhikhoreva, A.S. Sysoev

Lipetsk State Technical University, Lipetsk, Russian Federation

ARTICLE INFO

Received: 01 November 2024

Approved: 15 November 2024

Accepted for publication:

28 December 2024

Funding

The study was carried out with the support of a grant from the Russian Science Foundation № 24-21-00291, <https://rscf.ru/projects/24-21-00291/>.

Conflicts of Interest

The author declares no conflict of interest.

Author Contributions

Equivalent.

Keywords:

hierarchical sensitivity analysis, capacity, traffic flows, mathematical modeling, critical points, traffic flow management.

ABSTRACT

With the increasing number of private vehicles in urban agglomerations and growing freight traffic, there is a need to implement intelligent transportation systems to develop strategies to reduce congestion and prevent traffic accidents. One of the key indicators of the transportation system, reflecting the efficiency of using the available urban infrastructure, is the capacity of planned routes. The model for estimating the capacity of an urban route based on the capacity of its elements - runs and intersections - is multi-level, hierarchical, and multi-criteria. In addition, this model is dynamic because its parameters change over time. All this increases the computational complexity of analyzing such a model, and leads to the need to reduce the number of parameters under study. One approach to reducing model parameters is sensitivity analysis based on finite change analysis. In the case of the capacity model, this approach will allow to identify those parameters of the route elements, the change of which causes the greatest changes in the capacity of the route as a whole, and will give the opportunity to manage them in order to improve the overall efficiency of the system.

The aim of the study is to develop a methodology for hierarchical sensitivity analysis of the capacity model of the street and road network based on finite change analysis, which makes it possible to identify critical points and assess the contribution of individual elements and groups of objects to the overall performance of the transportation system. The results obtained show that the proposed methodology allows to accurately identify the main factors affecting the capacity and to propose measures to optimize traffic flow management.

© Galina S. Borovkova – CSc of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Applied Mathematics, e-mail: haligh@mail.ru, ORCID: 0009-0004-9851-6634.

Svetlana V. Zhikhoreva – Ph. D. Student, Department of Applied Mathematics, e-mail: zhikhoreva_sv@stu.lipetsk.ru, ORCID: 0000-0001-6904-8035.

Vladimir E. Klyavin – Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Chief Scientific Associate, Research Institute, e-mail: vlk@list.ru, ORCID: 0000-0002-7839-4463.

Anatoly K. Pogodaev – Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Applied Mathematics, e-mail: pak@stu.lipetsk.ru, ORCID: 0000-0002-3951-5939.

Anton S. Sysoev – CSc of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Applied Mathematics, e-mail: sysoev_as@stu.lipetsk.ru, ORCID: 0000-0002-0866-1124.



This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0)

Введение

В связи с увеличением количества автомобилей и ростом городской инфраструктуры задача управления транспортными потоками в современных городах является актуальной практически с момента появления автомобиля [1]. Эффективное управление транспортными потоками и выявление критических точек улично-дорожной сети позволяют повысить пропускную способность дорог, снизить заторы и улучшить общую транспортную ситуацию [2]. С помощью современных методов и технологий появляется возможность анализировать транспортные системы в режиме реального времени, что создает новые возможности для управления и оптимизации транспортных потоков [3; 4].

Анализ чувствительности представляет собой процесс определения влияния неопределённости входных данных на неопределённость выходных параметров системы [5]. Иерархические системы широко используются для описания сложных объектов и систем, в том числе и для управления транспортными потоками [6]. Существуют различные подходы к анализу чувствительности для таких систем.

Первый подход предполагает рассмотрение сложной модели как «чёрного ящика» без учёта связей между её компонентами [6]. Этот метод подходит для небольших и простых моделей, но может быть неэффективен для сложных систем, требующих больших вычислительных ресурсов. В этом случае можно провести анализ чувствительности для подмоделей и выбрать наиболее важные входы.

Второй подход заключается в независимом анализе каждой подмодели с оценкой коэффициентов чувствительности для каждого входа перед рассмотрением иерархических связей [7]. Однако этот метод не может полностью объяснить поведение факторов вне контекста. Для устранения этой проблемы можно провести анализ чувствительности, изменяя определённые входы выбранных подмоделей и оценивая связанные составные части иерархии или всю модель. Этот подход отличается от первого тем, что модель рассматривается как совокупность взаимодействующих компонентов, а не как «чёрный ящик».

Третий подход используется для систем с чёткой иерархической структурой, где каждый уровень получает входные данные только от связанных подмоделей нижнего уровня [7]. В этом случае применяется стратегия «сверху вниз». Анализ чувствительности проводится на каждом уровне иерархии для каждой подмодели независимо, результаты чувствительности могут быть объединены в глобальный индекс чувствительности.

В рамках данной работы предлагается метод анализа чувствительности по факторам математической модели иерархической системы, основанный на анализе конечных изменений. Такой подход позволит провести декомпозицию иерархической модели на более простые и выявить наиболее значимые факторы, изменение которых приведет к наибольшему изменению результирующей функции.

Постановка задачи исследования

Цель данного исследования заключается в разработке методики иерархического анализа чувствительности модели пропускной способности улично-дорожной сети, основанной на анализе конечных изменений. Эта методика поможет определить критические точки улично-дорожной сети и оценить вклад различных элементов (перегонов, регулируемых и нерегулируемых перекрёстков) и групп объектов в общую эффективность транспортной системы [8].

Всю транспортную сеть конкретного города можно разбить на участки, которые в разные моменты времени характеризуются общими показателями, такими как текущая загрузка

женность, количество полос на перегонах, продолжительность горения зеленого сигнала светофора и пр. [9]. При прохождении транспортных потоков через городскую дорожную сеть зачастую необходимо найти протяженный сложный маршрут, состоящий из большого числа перегонов и пересечений, которые как раз и образуют такие участки. При этом следует избегать участков с большой загруженностью и низкой пропускной способностью. Любой построенный маршрут представляет собой иерархическую систему, поскольку состоит из разнородных структурных элементов, которые могут образовывать подсистемы, элементы которых взаимосвязаны друг с другом. В качестве подсистем для целого маршрута могут выступать различные комбинации последовательных элементов или сами элементы транспортной сети. Исследование всей системы относительно ее структурных элементов представляется вычислительно сложной задачей, поскольку таких элементов достаточно много [10]. В связи с этим актуальной задачей является группировка таких элементов в подсистемы и исследование сложной иерархической системы относительно ее подсистем.

Для достижения поставленной цели необходимо выполнить следующие задачи:

1. Разработать математическую модель пропускной способности улично-дорожной сети.
2. Провести преобразование модели для анализа чувствительности.
3. Определить методологию иерархического анализа чувствительности.
4. Рассчитать значения функций чувствительности для каждого элемента и группы объектов улично-дорожной сети.
5. Определить параметры промежуточных точек и их влияние на пропускную способность.

Разработка и использование предложенной методики позволят органам управления дорожным движением и транспортным службам быстро выявлять и устранять проблемные участки на дорогах, что повысит эффективность использования транспортной инфраструктуры, снизит загруженность и улучшит экологическую обстановку в городе. Кроме того, внедрение этой методики обеспечит более рациональное планирование и развитие дорожной сети.

Метод решения задачи

Анализ конечных изменений (АКИ) — мощный инструмент для оценки влияния значительных изменений параметров на выходные данные модели [11]. В отличие от традиционного анализа чувствительности, который рассматривает бесконечно малые изменения параметров, АКИ фокусируется на конечных, практических изменениях, что делает его особенно полезным в условиях реального времени и динамических систем.

В данном исследовании АКИ используется для оценки изменений пропускной способности улично-дорожной сети при значительных изменениях таких параметров, как плотность транспортного потока и средняя скорость движения. Применение АКИ позволяет точнее моделировать реальное поведение транспортной системы и оперативно реагировать на изменения [12].

Иерархический анализ чувствительности (ИАЧ) — это метод, позволяющий структурировать и анализировать влияние различных факторов на пропускную способность транспортной системы на разных уровнях детализации. Основная идея метода заключается в разделении всей системы на несколько уровней и проведении анализа чувствительности на каждом уровне [13; 14]. Это помогает выявить критические точки и ключевые факторы, влияющие на общую пропускную способность.

Процесс ИАЧ состоит из следующих основных этапов:

1. Определение уровней анализа: система транспортных потоков разделяется на несколько уровней, например, на уровне отдельных элементов (перегоны, перекрёстки), групп объектов (районы города) и общей системы (весь город).

2. Построение иерархической структуры: создаётся иерархическая структура, где каждый уровень включает элементы нижнего уровня. Например, уровень района включает несколько перекрёстков и перегонов.

3. Расчёт чувствительности на каждом уровне: анализ чувствительности проводится для каждого элемента на каждом уровне иерархии. Это позволяет оценить вклад каждого элемента в общую пропускную способность системы.

4. Объединение результатов: результаты анализа на каждом уровне объединяются для получения общей картины и определения ключевых факторов, влияющих на пропускную способность на уровне всей системы.

5. Введение и обоснование промежуточных точек. Для детального анализа чувствительности используются промежуточные точки, которые позволяют оценить изменения пропускной способности при небольших изменениях параметров модели. Введем обозначения $p(f_i)$ для чувствительности y относительно f_i и $p(x_1, x_2, \dots, x_n)$ для чувствительности y относительно x_i .

Параметры промежуточных точек α_i определяются из следующих уравнений [11]:

$$\Delta f_i = f_i(1) - f_i(0),$$

$$\Delta f_i = f'_{x_i}(x_1 + \alpha_1 \Delta x_1, \dots, x_n + \alpha_n \Delta x_n) \Delta x_i, \quad (1)$$

где Δf_i – приращение функции f_i , $f'_{x_i}(x_1 + \alpha_1 \Delta x_1, \dots, x_n + \alpha_n \Delta x_n)$ – производная функции f по переменной x_i в промежуточных точках, Δx_i – изменение параметра x_i .

Решив систему уравнений (1) для всех параметров, мы получим значения параметров промежуточных точек α_i . Эти параметры используются для анализа чувствительности на различных уровнях иерархии для оценки факторных влияний и факторных нагрузок, которые, в свою очередь, помогут определить факторы, изменение которых наибольшим образом влияет на изменение результирующего показателя.

Модель пропускной способности улично-дорожной сети

Пропускная способность маршрута следования транспортного средства зависит от пропускной способности его элементов [14]. Очевидно, что пропускная способность маршрута может быть оценена как пропускная способность наиболее загруженного его элемента, однако, в рамках данного исследования предлагается использовать индекс, учитывающий параметры всех участков и перекрестков следующим образом

$$c_{route} = \sum_{i=1}^n \alpha_i c_i,$$

где c_{route} – расчетная пропускная способность построенного маршрута (авт./ч), c_i – пропускная способность элемента сети (авт./ч), α_i – весовой коэффициент i -го элемента сети.

Пропускная способность элемента сети (c_i) является неоднородной величиной и зависит от типа рассматриваемого элемента. Так, для такого элемента, как перекресток, c_i рассчитывается с использованием методов имитационного моделирования, а для перегона – с использованием нейронных сетей. Использование множества разнородных факторов приводит к высокой трудоемкости оценки и может «зашумлять» реальные показатели. Модель также должна использоваться в условиях реального времени для оценки пропускной способности улично-дорожной сети города. Поэтому модель должна иметь унифицированную структуру, обеспечивающую приемлемую точность. Для этого используется подход, основанный на ремоделировании, которое заключается в построении новой модели на основе уже существующих [6]. Особенность этого подхода заключается в том, что существующие модели могут быть структурами разных классов, в то время как ремоделируемые модели являются элементами одного класса. Технически ремоделирование – это алгоритм, позволяющий преобразовать исходную модель в модель предпочтительного класса.

В данном исследовании в качестве моделей унифицированного класса используются классические нейронные сети. В общем виде такая модель выглядит следующим образом [15]

$$y = \varphi^{(k)}(w_0^{(k)} + W_1^{(k)} \varphi^{(k-1)} \times \left(\dots \left(w_0^{(2)} + W_1^{(2)} \varphi^{(1)} \left(w_0^{(1)} + W_1^{(1)} x \right) \right) \dots \right),$$

где $y \in R$ – выходное значение (пропускная способность полосы движения или пересечения), $x \in R^n$ – вектор входов, $\varphi^{(i)}$, $i = 1, \dots, k$ – векторные функции векторных аргументов, функции активации, $W_1^{(i)}$ – матрицы весовых коэффициентов при переходе от слоя $(i-1)$ к слою i , $w_0^{(i)}$, $i = 1, \dots, k$ – свободные коэффициенты.

Модель пропускной способности, полученная в результате обучения нейронной сети, имеет вид:

$$y = \frac{1}{1 + e^{-(b_0 + \sum_{i=1}^n x_i b_i)}}, \quad (2)$$

где $b_i, i = 0, 1, \dots, n$ – коэффициент модели, $x_i, i = 1, \dots, n$ – параметры модели, описывающие ее структурные элементы, n – количество параметров.

В рамках данной работы в качестве параметров x_i для перегона будем использовать следующие характеристики:

- интенсивность движения – количество единиц транспорта в час (принимает значения от 350 до 1000 шт);
- количество полос (принимает значения от 1 до 3).

Для перекрестка в качестве x_i будем рассматривать отношение времени горения зеленого сигнала к длительности цикла (принимает значение в промежутке $[0, 1; 0, 9]$).

Основные результаты

Рассмотрим работу модели на небольшом маршруте, состоящем из двух перегонов и перекрестка. Его конфигурация представлена на рисунке. Пропускная способность данного маршрута будет зависеть от набора из пяти параметров – по два параметра для перегонов и один для перекрестка, как показано в табл. 1.

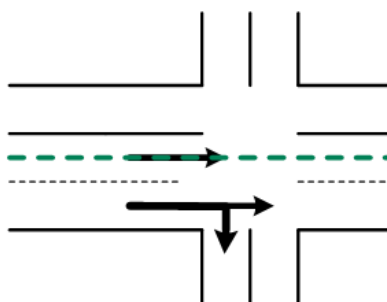


Рис. Конфигурация построенного маршрута

Таблица 1

Параметры модели

Параметр	Описание	Элемент
$X1$	Интенсивность движения	Первый перегон
$X2$	Количество полос	
$X3$	Время зеленого сигнала	Перекресток
$X4$	Интенсивность движения	Второй перегон
$X5$	Количество полос	

Путем элементарных преобразований модель пропускной способности (2) можно привести к виду:

$$y = 1 - \frac{1}{1 + e^{(b_0 + \sum_{i=1}^n x_i b_i)}}.$$

Введем следующие замены:

- $f_1 = e^{x_1 b_1 + x_2 b_2}$ описывает первый перегон;
- $f_2 = e^{x_3 b_3}$ описывает перекресток;
- $f_3 = e^{x_4 b_4 + x_5 b_5}$ описывает второй перегон.

Тогда модель пропускной способности примет вид:

$$y = 1 - \frac{1}{1 + e^{b_0} \cdot \prod_{i=1}^m f_i}, \tag{3}$$

где $m = 3$ – количество функций.

Таким образом, можно провести анализ чувствительности данной модели отдельно для каждого f_i , y относительно f_i и y относительно x_i ; y относительно f_i обозначим как $p(f_i)$, для такой функции будем находить параметр промежуточной точки β ; y относительно x_i обозначим как $\hat{p}(x_1, \dots, x_n)$, для такой функции будем находить параметр промежуточной точки γ [10]. Для каждой из функций f_i также проведем анализ чувствительности и найдем параметры промежуточной точки α_i .

Рассмотрим работу метода на реальных данных, которые представлены в табл. 2. Здесь и далее (0) – обозначение начальных (плановых) значений, (1) – конечных (фактических) значений, Δ – приращение функции (разность между фактом и планом).

Таблица 2

Исходные данные

Параметр	Y	$X1$	$X2$	$X3$	$X4$	$X5$
(0)	0,088878	0,412	2	0,24	0,457	2
(1)	0,121866	0,735	2	0,631	0,427	2
Δ	0,032988	0,323	0	0,391	-0,030	0

Параметры модели заданы в табл. 3. Они получены в результате обучения нейросетевой модели. Параметры количества полос на перегонах не могут меняться, их мы исключим из списка переменных.

Таблица 3

Параметры модели

b_0	b_1	b_2	b_3	b_4	b_5
0,5809	0,3201	-1,215	0,7636	1,6888	-0,782

Рассчитаем теперь значения функций f_i , они представлены в табл. 4.

Таблица 4

Значения функций

Параметр	F1	F2	F3
(0)	0,100448	1,201131	0,452839
(1)	0,111389	1,619037	0,430467
Δ	0,010941	0,417906	-0,02237

Частные производные для функций f_i имеют вид:

$$f'_{1x_1} = b_1 e^{x_1 b_1 + x_2 b_2},$$

$$f'_{2x_3} = b_3 e^{x_3 b_3},$$

$$f'_{3x_4} = b_4 e^{x_4 b_4 + x_5 b_5}.$$

По определению приращение функции f_i имеет вид:

$$\Delta f_i = f^{(1)} - f^{(0)},$$

а по теореме Лагранжа:

$$\Delta f_1 = b_1 e^{(x_1 + \alpha_1 \Delta x_1) b_1 + x_2 b_2} \Delta x_1,$$

$$\Delta f_2 = b_3 e^{(x_3 + \alpha_2 \Delta x_3) b_3} \Delta x_3,$$

$$\Delta f_3 = b_4 e^{(x_4 + \alpha_3 \Delta x_4) b_4 + x_5 b_5} \Delta x_4.$$

Решив 3 таких уравнения, получим 3 параметра промежуточной точки $\alpha_i \in [0; 1]$ и по ним рассчитаем факторные нагрузки A_i , которые совпадают с $\Delta f_i, i = 1, \dots, 3$, как показано в табл. 5.

Далее найдем параметр промежуточной точки $\beta \in [0; 1]$ – один для всей модели. Для этого решим уравнение вида:

$$\Delta p = \sum_{i=1}^3 \frac{dp(\dots f_i + \beta \Delta f_i \dots)}{df_i} \Delta f_i.$$

Таблица 5

Параметры промежуточной точки и соответствующие факторные нагрузки

i	1	2	3
α_i	0,504	0,512	0,498
A_i	0,010941	0,417906	-0,02237

Полеченное значение $\beta = 0,3542251864$. Рассчитаем факторные нагрузки для найденного параметра промежуточной точки, они представлены в табл. 6.

Таблица 6

Факторные нагрузки для параметра β

i	1	2	3
A_i	0,009496	0,028045	-0,004552

Исходя из факторных нагрузок, приведенных в таб. 5 и 6, можно сделать вывод, что наибольшее влияние на изменение функции оказало изменение фактора 2. Это означает, что на изменение пропускной способности данного маршрута в большей степени влияет изменение характеристик такого структурного элемента, как светофор, и именно за счет изменения времени горения зеленого можно в большей степени изменить пропускную способность самого маршрута.

Заключение

Использование данного метода для функций многих переменных позволяет исследовать и анализировать взаимосвязь между изменениями результирующих величин и изменениями их совокупностей. Этот подход выявляет влияние исходных факторов на сами результирующие величины и устанавливает различия в воздействии изменений этих факторов на общую результирующую величину.

В управленческих процессах применение данного метода способствует принятию научно обоснованных и своевременных решений, позволяя выявить тенденции в транспортных процессах, описанных соответствующими моделями.

Декомпозиция сложной функции на подфункции упрощает определение промежуточных точек и факторных нагрузок, что имеет критическое значение для эффективного решения задачи управления транспортными потоками.

Список литературы

1. Герами, В.Д. Управление транспортными системами. Транспортное обеспечение логистики: учебник и практикум для вузов / В.Д. Герами, А.В. Колик. – М.: Юрайт, 2024. – 536 с.
2. Управление транспортными потоками в городах: монография / под общ. ред. А.Н. Бурмистрова, А.И. Солодкого. – М.: ИНФРА-М, 2024. – 207 с.
3. Шамлицкий, Я.И. Методы и алгоритмы управления транспортными потоками: монография / Я.И. Шамлицкий. – Красноярск: СибГУ им. академика М.Ф. Решетнёва, 2019. – С. 160.
4. Kerner, B.S. Introduction to Modern Traffic Flow Theory and Control / B.S. Kerner. – Berlin: Springer, 2009. – С. 265.

5. Сальтелли, А. Анализ чувствительности нелинейных математических моделей: численные опыты / А. Сальтелли, И.М. Соболев // Математическое моделирование. – 1995. – № 7. – С. 16–28.
6. Mathematical remodeling concept in simulation of complicated variable structure transportation systems / P. Saraev, S. Blyumin, A. Galkin, A. Sysoev // *Transportation Research Procedia*. – 2020. – № 45. – С. 475–482.
7. Сараев, П.В. Концепция математического ремоделирования / П.В. Сараев // *Нано-био-технологии. Теплоэнергетика. Математическое моделирование: сборник статей международной научно-практической конференции*. – Липецк, 2024. – С. 150–154.
8. Zhang, J. Virtual traffic simulation with neural network learned mobility model / J. Zhang, A. El Kamel. – Text: immediate. // *Advances in Engineering Software*. – 2018. – Vol. 115. – P. 103–111.
9. Pell, A. Trends in real-time traffic simulation / A. Pell, A. Meingast, O. Schauer // *Transportation Research Procedia*. – 2017. – Т. 25. – P. 1477–1484.
10. Аземша, С.А. Повышение эффективности дорожного движения на перекрестках внедрением адаптивного регулирования / С.А. Аземша, П.И. Капитанов, В.И. Евланов. – Текст: непосредственный // *Наука и транспорт. Вестник Белорус. гос. ун. трансп.* – 2020. – № 2 (41). – С. 37–41.
11. Блюмин, С.Л. Применение анализа конечных изменений и метода обратных вычислений в системах управления и поддержки принятия решений / С.Л. Блюмин, Г.С. Боровкова // *Проблемы управления*. – 2018. – № 6. – С. 29–34.
12. Основы лагранжева анализа конечных изменений / С.Л. Блюмин, Г.С. Боровкова, К.В. Серова, А.С. Сысоев. – Липецк: Липецкий государственный технический университет, ЭБС АСВ. – 2016. – С.80.
13. Блюмин, С.Л. Анализ конечных изменений как метод исследования иерархических организационных систем / С.Л. Блюмин, Г.С. Боровкова, А.С. Сысоев // *Проблемы управления и моделирования в сложных системах: труды XXI Международной конференции*. – Самара: Общество с ограниченной ответственностью «Офорт». – 2019. – С. 367–372.
14. Блюмин, С.Л. Комбинации норм невязок и методы параметрической идентификации моделей / С.Л. Блюмин, П.В. Сараев // XII Всероссийское совещание по проблемам управления ВСПУ2014. ИПУ РАН. – 2014. – С. 2612–2618.
15. Блюмин, С.Л. Исследование чувствительности нейросетевых моделей с применением анализа конечных изменений / С.Л. Блюмин, А.В. Галкин, А.С. Сысоев // *Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Системный анализ и информационные технологии*. – 2023. – № 2. – С. 40–51.

References

1. Gerami V.D., Kolik A.V. *Upravlenie transportnymi sistemami. Transportnoe obespechenie logistiki: uchebnik i praktikum dlia vuzov*. – М.: Iurait, 2024. – 536 p.
2. *Upravlenie transportnymi potokami v gorodakh : monografiia / pod obshch. red. A.N. Burmistrova, A.I. Solodkogo*. – М.: INFRA-M, 2024. – 207 s.
3. *Metody i algoritmy upravleniia transportnymi potokami : monografiia / Ia. I. Shamlitskii*. – Krasnoiar'sk : SibGU im. akademika M. F. Reshetneva, 2019. – С. 160.
4. Kerner B.S. *Introduction to Modern Traffic Flow Theory and Control*. Berlin: Springer, 2009. 265 p.

5. Saltelli A., Sobol I.M. Analiz chuvstvitel'nosti nelineinykh matematicheskikh modelei: chislennyye opyty. *Matematicheskoe modelirovanie*, 1995, №7, pp. 16-28.
6. Saraev P., Blyumin S., Galkin A., Sysoev A. Mathematical remodeling concept in simulation of complicated variable structure transportation systems. *Transportation Research Procedia*, 2020, №45, pp. 475-482.
7. Saraev P.V. Kontseptsiiia matematicheskogo remodelirovaniia. *Nano-bio-tekhnologii. Teploenergetika. Matematicheskoe modelirovanie. Sbornik statei mezh-dunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii*. Lipetsk, 2024, pp. 150–154.
8. Zhang J. Virtual traffic simulation with neural network learned mobility model / J. Zhang, A. El Kamel. - Text: immediate. // *Advances in Engineering Software*. - 2018. - V. 115. P. 103- 111.
9. Pell A. Trends in real-time traffic simulation / A. Pell, A. Meingast, O. Schauer. - Text: immediate // *Transportation Research Procedia*, - 2017. - T. 25. - P. 1477 - 1484.
10. Azemsha, S. A. Povysenie effektivnosti dorozhnogo dvizheniya na perekrestkah vnedreniem adaptivnogo regulirovaniya / S.A. Azemsha, P.I. Kapitanov, V.I. Evlanov. – Tekst: neposredstvennyj // *Nauka i transport. Vestnik Belorus. gos. un. transp.* – 2020. – № 2 (41).
11. Bliumin S.L., Borovkova G.S. Primenenie analiza konechnykh izmenenii i metoda obratnykh vychislenii v sistemakh upravleniia i podderzhki priniatiia reshenii. *Problemy upravleniia*. 2018, № 6, pp. 29–34.
12. Bliumin S.L., Borovkova G.S., Serova K.V., Sysoev A.S. Osnovy lagranzheva analiza konechnykh izmenenii. Lipetsk : Lipetskiĭ gosudarstvennyiĭ tekhnicheskiiĭ universitet, EBS ASV. 2016. 80 p.
13. Bliumin S.L., Borovkova G.S., Sysoev A.S. Analiz konechnykh izmenenii kak metod issledovaniia ierarkhiche-skikh organizatsionnykh system. *Problemy upravleniia i modelirovaniia v slozhnykh sistemakh : Trudy XXI Mezhdunarodnoi konfe-rentsii*. Samara: Obshchestvo s ogranichennoi otvetstvennost'iu "Ofort", 2019, pp. 367–372.
14. Bliumin S.L., Saraev P.V. Kombinatsii norm neviazok i metody parametriceskoi identifi-katsii modelei. XII vserossiiskoe soveshchanie po problemam upravleniia VSPU2014. IPU RAN, 2014, pp. 2612–2618.
15. Bliumin S.L., Galkin A.V., Sysoev A.S. Issledovanie chuvstvitel'nosti neirosetevykh modelei s primene-niem analiza konechnykh izmenenii. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Serii: Sistemnyi analiz i informatsi-onnye tekhnologii*, 2023, № 2, pp. 40–51.