

## Методы и средства автоматизации определения оптимальных маршрутов грузоперевозок

Е.И. СУКАЧ, П.В. ГАВРИЛИК

Рассматриваются методы оценки максимального потока, кратчайшего расстояния для транспортных систем ограниченного региона с учётом случайных факторов их функционирования. Полученное решение определяет исходные данные при работе интерактивного сервиса формирования оптимальных маршрутов доставки грузов от отправителя к заказчиком с учетом множества условий транспортировки.

**Ключевые слова:** транспортная система, максимальный поток, кратчайший путь, надежность, эффективность, графы, автоматизация расчета, вероятностное моделирование.

Methods for estimating the maximum flow, the shortest distance for transport systems of a limited region, taking into account random factors of their functioning are considered. The resulting solution determines the source data for the interactive service of forming optimal routes for cargo delivery from the sender to customers, taking into account a variety of transportation conditions.

**Keywords:** transport system, maximum flow, shortest path, reliability, efficiency, graphs, calculation automation, probabilistic modeling.

**Введение.** Увеличение объемов грузоперевозок с использованием автомобильного транспорта, который обеспечивает доставку грузов от двери до двери, делает актуальным решение таких задач, как сокращение времени доставки груза, оптимизация последовательности шагов создания заказа для клиента, отслеживание новых заказов для водителей и в целом повышение экономической эффективности доставки грузов для заинтересованной организации. Существует потребность в быстром, понятном и выгодном решении в сфере грузоперевозок, которое соответствовало бы современному рынку и требованиям пользователей. Поэтому актуальна задача построения маршрутов для посещения заданного множества адресов некоторым количеством транспортных средств с возвращением в некоторое общее начальное местоположение.

Применение автоматизированных систем в области транспортной логистики – это один из способов экономии ресурсов при транспортировке грузов [1]. Предлагается поэтапное решение задачи организации доставки грузов.

На первом этапе учитывается, что грузы доставляются в населенные пункты с активным дорожным движением и развитой транспортной сетью, что влечет за собой сложности и возможные издержки, именно поэтому важен предварительный анализ и моделирование транспортных систем (ТС), функционирующих в условиях воздействия случайных факторов.

С этой целью возможно применение различных методов и инструментальных средств моделирования. В работе [2] предлагается подход к исследованию ТС, основанный на сочетании аналитических алгоритмов решения классических задач с методом статистических испытаний Монте-Карло. Приводится пример определения наиболее эффективного максимального потока ТС ограниченного региона с использованием модифицированного алгоритма Форда-Фалкерсона. Имитационное моделирование, предполагающее рассмотрение различных траекторий функционирования исследуемых систем во времени с последующим усреднением полученных результатов моделирования [3], является ресурсоёмким по материальным и временным затратам. Метод вероятностно-алгебраического моделирования ориентирован на определение интегральных вероятностных характеристик ТС, увеличение числа элементарных участков которых и их состояний не приводит к экспоненциальному усложнению расчётов [4]. При этом следует отметить, что применение метода ограничено рассмотрением ТС простой графовой структуры.

С учетом изложенного для определения пропускной способности ТС автомобильных дорог, составляющих сеть грузоперевозок, предлагается использовать методику оценки пропускной способности структурно-сложных объектов ограниченной размерности.

На втором этапе решается задача автоматизации процесса планирования и отслеживания грузоперевозок за счёт разработки интерактивного сервиса автоматизации построения маршрутных схем с использованием современных технологий программирования.

При решении глобальной задачи разработки и реализации приложения по грузоперевозкам необходимо обеспечить его конкурентоспособность перед работающими сервисами. Для решения поставленной задачи планирования грузоперевозок разработаны и используются такие сервисы, как FedEx, DHL, UPS. Общими их недостатками являются ограниченные возможности современного сервиса для осуществления заказов, односторонний малопонятный интерфейс, отсутствие средств сопровождения контакта «водитель-клиент».

В сфере пассажирских перевозок эффективно функционируют такие сервисы, как Uber, Яндекс Такси и др., которые включают средства оптимизации маршрутов перевозок, отражения информации о местоположении водителя, предоставляют возможность взаимодействия в системе «водитель-клиент/пассажир» и др. Однако они не учитывают специфику доставки грузов и поэтому для рынка грузоперевозок бесполезны.

При разработке сервиса были учтены преимущества существующих сервисов и расширены функциональные возможности нового программного продукта, что позволило снять ряд важных организационных вопросов, таких как недостаточное число водителей требуемой квалификации для доставки определенного груза (расширение числа водителей за счет водителей, использующих личный транспорт), высокая стоимость доставки грузов, недостаточно оптимальный подбор маршрутов, большое число центров, занимающихся организацией грузоперевозок посредством традиционных средств связи.

**Оценка пропускной способности транспортной сети грузоперевозок с учетом воздействия случайных факторов.** Объектом исследования является ТС грузоперевозок, которая представляется в виде графа  $G(N, K)$ , где  $N = \{N_\nu\}$ ,  $\nu = \overline{1, l}$  – вершины (пункты доставки грузов),  $K = \{K_i\}$ ,  $i = \overline{1, m}$  – рёбра, соответствующие участкам сети грузоперевозок. Выбираются две терминальные вершины  $N_1, N_2 \in N$ , определяющие начальную точку отправки грузов и конечный пункт доставки грузов для исследуемой системы.

Ставится задача вероятностной оценки пропускной способности ТС, то есть определения значений вектора вероятностей вида:

$$P^s = (p_0^s, p_1^s, \dots, p_n^s), \sum_{j=0}^n p_j^s = 1, \quad (1)$$

и соответствующих интервальных значений пропускной способности по вероятностным значениям пропускных способностей участков вида:

$$P^i = (p_0^i, p_1^i, \dots, p_n^i), \sum_{j=0}^n p_j^i = 1, i = \overline{1, m}. \quad (2)$$

Исходными данными для расчёта являются вектора вероятностей вида (2), характеризующие возможные значения пропускной способности, полученные с использованием экспериментальных данных и определяющие вероятностные состояния участков ТС.

При этом предполагается, что значение пропускной способности участков изменяется в пределах заданных интервалов, а именно:

$$PR_i \in [PR_{i_0}, PR_{i_m}], i = \overline{1, m}, \quad (3)$$

где  $m$  – число участков ТС,  $PR_i$  – значение пропускной способности  $i$ -го участка,  $PR_{i_0}$  – нижняя граница пропускной способности  $i$ -го участка,  $PR_{i_m}$  – верхняя граница пропускной способности  $i$ -го участка. Будем полагать, участки могут находиться в двух состояниях, которым соответствуют граничные значения пропускной способности, то есть:

$$S_1 = PR_{i_0}, S_2 = PR_{i_m}. \quad (4)$$

В частности, нижняя граница значений пропускной способности может принимать значение 0, что будет соответствовать возникновению «пробки» на участке.

Алгоритм оценки пропускной способности ТС реализуется последовательностью следующих шагов.

*Шаг 1.* Генерируются все детерминированные варианты реализации случайного графа  $G(N, K)$ , рёбра которого имеют вероятностные веса:

$$P^i = (p_1^i, p_2^i), \sum_{j=1}^2 p_j^i = 1, i = \overline{1, m}, \quad (5)$$

определяющие вероятности возможных значений пропускной способности участков. При рассмотрении двух значений пропускной способности число таких вариантов  $H = 2^m$ . Обозначим множество вариантов реализаций случайного графа:

$$H\_VAR = \{G_h(N, K)\}, h = \overline{1, H}. \quad (6)$$

*Шаг 2.* Для полученных вариантов (6), представляющих собой графы  $G_h(N, K)$  с детерминированными значениями пропускной способности участков, на основе алгоритма Форда-Фалкерсона определяется величина максимального потока и его распределение по сети. В результате каждой реализации случайного графа ставится в соответствие значение максимального потока, то есть:

$$G_h(N, K) \rightarrow \varphi_h, h = \overline{1, H}. \quad (7)$$

*Шаг 3.* Вычисляются вероятности возможных значений максимального потока, соответствующие вариантам реализации случайного графа (7):

$$P(\varphi_h) = \prod_{i=1}^m p_{hi}, h = \overline{1, H}, \quad (8)$$

где  $p_{hi}$  – вероятность значения пропускной способности  $i$ -го участка в  $h$ -ом варианте реализации случайного графа  $G(N, K)$ .

*Шаг 4.* Формируются интервальные оценки значений пропускной способности ТС, образом которой является граф  $G(N, K)$ . С этой целью среди всех вариантов (7) определяются минимальное и максимальное значения максимального потока, определяющие границы изменения пропускной способности ТС:

$$PR_o^s = \varphi_{\max} = \max_h(\varphi_h), PR_n^s = \varphi_{\min} = \min_h(\varphi_h). \quad (9)$$

После чего интервал изменения пропускной способности системы разбивается на  $n$  интервалов, каждый из которых характеризует  $j$ -ый уровень пропускной способности, определяющий вероятностное состояние системы:

$$[PR_o^s, PR_n^s] \rightarrow \{[PR_o^s, PR_1^s], \{[PR_j^s, PR_{j+1}^s], j = \overline{1, n-2}\}, [PR_{n-1}^s, PR_n^s]\}. \quad (10)$$

*Шаг 5.* Вычисляются вероятности состояний пропускной способности  $S = \{S_j\}, j = \overline{0, n}$ , соответствующие интервалам пропускной способности (10):

$$\begin{aligned} P(S_1) &= \sum_{h=1}^H P(\varphi_h), \varphi_h \in [PR_o^s, PR_1^s] \\ P(S_2) &= \sum_{h=1}^H P(\varphi_h), \varphi_h \in [PR_1^s, PR_2^s] \\ &\dots\dots\dots \\ P(S_n) &= \sum_{h=1}^H P(\varphi_h), \varphi_h \in [PR_{n-1}^s, PR_n^s]. \end{aligned} \quad (11)$$

Таким образом, результатом оценки вероятностных значений состояний ТС является два вектора, а именно, вектор интервальных значений пропускной способности (10) и вектор вероятностей, характеризующий эти интервальные оценки пропускной способности:

$$P^s = (P(S_1), P(S_2), \dots, P(S_n)), \sum_{j=1}^n P(S_j) = 1. \quad (12)$$

Особенностью предложенного алгоритма является то, что для двух состояний пропускной способности участков, имеющих вероятностную природу, формируется множество состояний пропускной способности сети, то есть имеем отображение:

$$\{[PR_{i0}, PR_{in}], j = \overline{1, n}\} \rightarrow \{[PR_0^s, PR_1^s], \{[PR_j^s, PR_{j+1}^s], j = \overline{1, n-2}\}, [PR_{n-1}^s, PR_n^s]\}. \quad (13)$$

При этом два состояния пропускной способности участков отображаются в  $n$  состояний всей ТС:

$$\{S_1, S_2\} \rightarrow \{S_1, S_2, \dots, S_n\}, \quad (14)$$

а множество векторов вероятностей (5) отображаются в один вектор (12).

Особенность предложенной расчётной схемы заключается в определении вероятностного максимального потока и нахождении варианта его распределения по сети с учётом меняющейся обстановки на дорогах, что позволяет обеспечить безопасность, надежность доставки грузов как в целом для заинтересованной организации, так и для отдельных заказчиков товаров на всех участках ТС.

Предложенный метод реализован с использованием системы вероятностно-алгебраического моделирования «Probability Algebraic Simulation» [5]. Для демонстрации предложенной методики была использована ТС грузоперевозок с пунктами доставки груза (рисунок 1). На рисунке 2 представлен граф модели ТС для каждого участка автомобильных дорог указаны вероятности возможных значений пропускной способности вида (2).

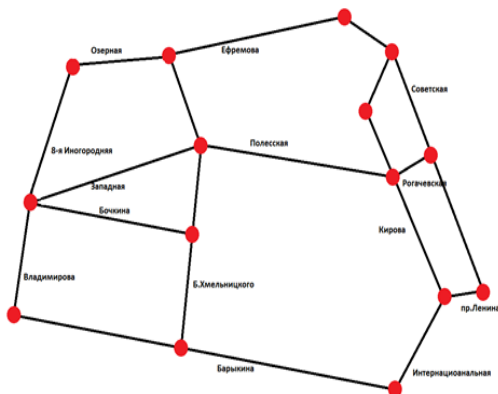


Рисунок 1 – Транспортная система грузоперевозок

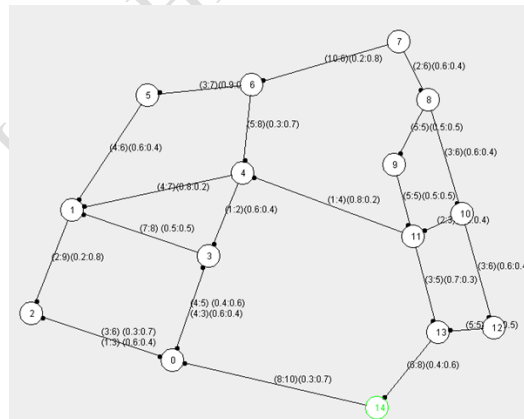


Рисунок 2 – Граф с исходными данными вероятностного моделирования

Результаты расчёта, полученные с использованием средств автоматизации описанного метода представлены на рисунке 3а и 3б.



Рисунок 3а – Графическое представление результата оценки максимального потока

	A	B	C	D
1	Max flow value	Probability	Count	
2	5	0.13056	360448	
3	10	0.07693056	61440	
4	6	0.06048	131072	
5	12	0.03282616	121856	
6	11	0.04687718	63488	
7	8	0.5376	196608	
8	7	0.00896	32768	
9	13	0.00336609	15360	
10	9	0.1024	65536	
11				

Рисунок 3б – Аналитическое представление результата оценки максимального потока

**Интерактивный сервис планирования и отслеживания грузоперевозок.** Приоритетными условиями разработки данного сервиса, ориентированного на многомиллионный рынок потенциальных клиентов, являлись требования снижения скорости и повышение надежности поиска решения (планирования маршрутов доставки грузов с учетом имеющихся данных о максимальном потоке и его распределения по сети).

Хранение данных в силу большого числа преимуществ происходит с помощью NoSQL-базы данных Cloud Firestore, которая была разработана специально для хранения и синхронизации данных веб-приложений на глобальном уровне. Для разработки Front части приложения используется фреймворк Angular 7. Для получения географических координат используется сервис Google Maps, который предоставляет быстрый и удобный интерфейс. Хранение состояния приложения происходит с помощью Redux, а именно – NgRx (пакета модулей, который имплементирует redux-паттерн и дает возможность воспользоваться некоторыми приемами, помогающими сделать приложение более гибким и масштабируемым). Серверная часть приложения написана на .Net, весь сервис разворачивается на платформе облачных приложений следующего поколения Microsoft Azure Service Fabric с использованием модели разворачивания – Docker контейнера [6]. Построение маршрута происходит с помощью сервиса Routific [7], которому передается объект с координатами остановок. Выбор в пользу данного решения обусловлен многими факторами, включая быстроту внедрения, экономическую невосемость и качественное функционирование.

При смешанном характере перевозок (крупные и мелкие партии) в первую очередь происходит планирование маршрутов для перевозки крупнопартионных грузов, которыми считаются грузы, превышающие грузоподъемность и/или паллетоёмкость транспортного средства. Обычно при этом используется критерий минимизации себестоимости перевозок при максимальной загрузке транспортного средства и прицепа с соблюдением следующих условий. Ограничение на объем грузов:

$$Q_i \leq q_i + q'_i, i = 1, N, \quad (15)$$

где  $Q_i$  – объём груза, перевозимый  $i$ -м транспортным средством,  $q_i$  – грузоподъемность  $i$ -го транспортного средства,  $q'_i$  – грузоподъемность прицепа  $i$ -го транспортного средства,  $N$  – общее количество доступных транспортных средств в текущий момент времени. Ограничения на время доставки грузов:

$$\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^P t_{i,j} \leq 8, \quad (16)$$

где  $t_{i,j}$  – время работы  $i$ -го транспортного средства с  $j$ -м клиентом,  $P$  – общее количество клиентов в текущий момент времени.

Предполагается, что выбранные и загруженные транспортные средства движутся по маятниковым маршрутам [8], при которых путь следования автомобиля между двумя пунктами доставки неоднократно повторяется. В случае междугородних перевозок такие транспортные средства считаются занятыми на весь текущий день и не могут быть выбраны для перевозок по другим маршрутам.

Дополнительные функциональные возможности, реализованные с использованием специальных алгоритмов поиска [9] в составе интерактивного сервиса грузоперевозок, такие как выбор оптимального подвижного состава с учетом условий доставки, вида груза, условий погрузки и выгрузки; формирование маршрутов доставки грузов и организация движения по кратчайшему пути с учетом дислокации потребителей и поставщиков; кооперация перевозчиков на сети большой размерности, направлены на снижения затрат при транспортировке груза.

Например, при построении маршрутов перевозки продуктов питания, упакованных и помещенных на паллеты (стандартные поддоны для перевозки), учитываются следующие дополнительные ограничения:

$$P_j \leq p_i + p'_i, \quad (17)$$

$$F_i = 1, \quad (18)$$

где  $P_j'$  – количество перевозимых паллет  $j$ -му заказчику,  $p_i$  – паллетоёмкость  $i$ -го транспортного средства,  $p_i'$  – паллетоёмкость прицепа  $i$ -го транспортного средства,  $F_i$  – возможность использования  $i$ -го транспортного средства для работы, т.е. проверка на занятость. Перед построением маршрутов для организации доставки необходимо было найти кратчайшие расстояния между пунктом отправки и пунктами доставки груза. В данном случае матрица кратчайших расстояний была получена с помощью сервиса Routific. Информация о заказчиках (наименование, адрес, вид продукции, ограничение по грузоподъёмности, время погрузки, время приёма, время оформления и др.), парке транспортных средств (государственный номер, грузоподъёмность транспортного средства и прицепа, паллетоёмкость транспортного средства и прицепа, стоимость 1 км, стоимость 1 ч и др.) была помещена в отдельные таблицы базы данных сервиса. На рисунках 4а и 4б представлена маршрутная карта до оптимизации маршрутов и после.

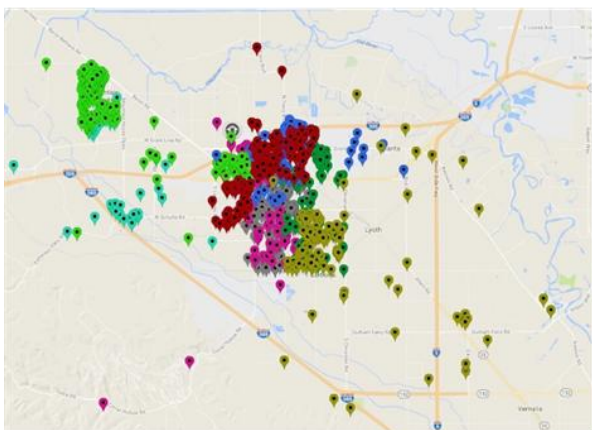


Рисунок 4а – Маршрутная карта до оптимизации

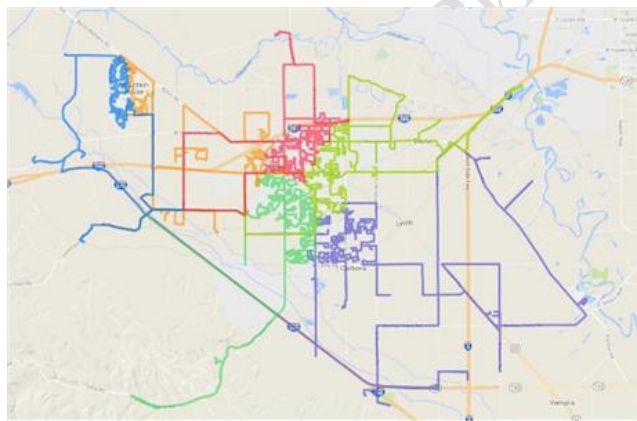


Рисунок 4а – Маршрутная карта после оптимизации

Реализованный интерактивный сервис грузоперевозок с возможностью планирования маршрутов и удовлетворяющий современному рынку отличается следующей новизной:

- методы построения маршрута выгодно отличаются оптимальностью и экономической эффективностью от стандартных решений, используемых в большинстве приложений этой же области;

- реализованная оригинальная схема взаимодействия «водитель-клиент/грузоотправитель» открывает дополнительные возможности улучшения экономических показателей как для водителей, так и для клиентов;

- использование современных инструментальных средств позволило реализовать интуитивно понятный и простой интерфейс разработанного сервиса, который не требует больших временных затрат от пользователей на понимание его функционирования.

**Заключение.** С учетом того, что объем грузоперевозок имеет тенденцию роста, важность применения математических методов и средств их реализации трудно переоценить. Централизованный поиск оптимальных вариантов формирования маршрутов для заинтересованных в доставке грузов организаций позволит снизить расходы на транспортировку грузов и значительно увеличит продуктивность и сбережения пользователя.

Предложенный в статье подход обеспечивает быстрое, понятное и выгодное решение в сфере грузоперевозок, которое соответствует современному рынку и требованиям пользователей и основано на гармоничном сочетании математически обоснованных расчётов учитывающих случайный фактор доставки грузов, и современные технологии, позволяющие учесть особенности типовой задачи организации перевозок и использовать новые возможности информационных технологий.

В составе нового инструментального средства использованы расчетно-экспериментальные вероятностные методы анализа, основным инструментом которых является вероятностное моделирование пропускной способности сети грузоперевозок и готовое

средство Rautific, позволяющее для ТС с установленным максимальным потоком и его распределением автоматизировать процесс построения маршрутных схем доставки грузов.

### Литература

1. Сукач, Е.И. Применение имитационного моделирования для исследования динамики транспортных потоков региона / Е.И. Сукач // Известия Гомельского государственного университета имени Ф.Скорины. – 2006. – № 4 (37). – С. 96–99.
2. Программно-технологический комплекс имитации транспортных потоков региона «TRANZIT»: свидетельство о регистрации компьютерной программы № 272 / Е.И. Сукач, П.В. Гируц, А.В. Клименко, Д.В. Ратобылская. – Минск : НЦИС, 2010. – Заявка № С20100152. – Дата подачи : 22.12.2010.
3. Сукач, Е.И. Метод перераспределения автомобильных транспортных потоков региона на основе имитационного моделирования / Е.И. Сукач // Реєстрація, зберігання і обробка даних (Data Recording, Storage & Processing). – 2008. – Т. 10, № 3. – С. 37–45.
4. Сукач, Е.И. Метод исследования функционально-сложных систем с использованием вероятностно-алгебраического моделирования / Е.И. Сукач // Математические машины и системы – 2010. – № 3. – С. 120–130.
5. Система вероятностно-алгебраического моделирования «Probability Algebraic Simulation (PALS)»: свидетельство о регистрации компьютерной программы № 450 / Е.И. Сукач, Д.В. Ратобылская. – Минск : НЦИС, 2012. – Заявка № С20120049. – Дата подачи : 25.06.2012.
6. Гаврилик, П.В. Разработка интерактивного сервиса грузоперевозок / П.В. Гаврилик // Творчество молодых : сб. статей. – Гомель : ГГУ им. Ф. Скорины, 2018. – Ч. 1. – С. 110–113.
7. Routific API [Electronic resource] / Routific, 2019. – Mode of access : <https://www.routific.com>. – Data of access : 11.01.2019.
8. Бронштейн, Е.М. Об оптимальной доставке грузов транспортным средством с учетом зависимости стоимости перевозок от загрузки транспортных средств по нескольким циклическим маршрутам / Е.М. Бронштейн, П.А. Зелёв // Информатика и её применения. – 2014. – № 8 (4). – С. 53–57.
9. Истомин, А.М. Вероятностный анализ одной задачи маршрутизации / А.М. Истомин // Дискретный анализ и исследование операций. – 2014. – № 21 (4). – С. 42–53.

Гомельский государственный  
университет им. Ф. Скорины

Поступила в редакцию 07.04.2019