

УДК 681.3

*Е. С. Абрамов, Д. В. Дервянко, Д. П. Ковалёв*

### АНАЛИЗ ВЕРОЯТНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМ С УЧЁТОМ СЛУЧАЙНЫХ ПАРАМЕТРОВ ИХ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ

*В статье излагается способ вероятностной оценки эффективности (пропускной способности, логистических характеристик) структурно-сложной транспортной системы, основанный на сочетании классических алгоритмов с методом полного перебора. Приводится пример, демонстрирующий получение вероятностной оценки эффективности (кратчайшего пути) для фрагмента транспортной системы.*

Существует ряд задач решаемых при исследовании транспортных систем (ТС) и их потоков. Классическими задачами в этой области являются определение кратчайшего (наиболее выгодного) пути в ТС и нахождение максимальной величины потока. Большое число задач анализа вариантов организации ТС связано с поиском логистических характеристик их транспортных потоков. Однако решение указанных задач становится возможным при определенных ограничениях ТС и их участков.

В классической постановке задачи определения кратчайшего пути между заданными пунктами ТС предполагается постоянная величина характеристик участков ТС. Если такой характеристикой является длина участков, то алгоритм, основанный на аналитических расчётах, позволяет найти кратчайший путь. Однако, выбор кратчайшего пути в смысле времени перемещения транспортных средств, стоимости и общей эффективности организации транспортного процесса требует разработки специальных методов, позволяющих учесть случайный характер этих величин.

Применение алгоритма Форда-Фалкерсона при определении максимального потока требует, чтобы пропускные способности участков были постоянными (целыми) величинами. В общем случае, пропускная способность участка ТС зависит от длины этого участка ТС, скорости движения транспортных средств по участку и их количества, которое может поместиться на участке ТС. Таким образом, предположение о случайном характере величины пропускной способности ветви ТС входит в противоречие с классической постановкой задачи о нахождении максимального потока в ТС [1].

В виду изложенного можно сделать вывод о том, что классические задачи о нахождении максимального потока и наиболее выгодного пути ТС соответствует частным случаям задачи моделирования транспортных потоков исследуемой ТС, а их решения представляют лишь возможные варианты решений, соответствующие некоторым реализациям алгоритмов для случайно заданных параметров.

В статье предлагается единый подход к исследованию ТС, функционирующих в условиях случайных воздействий, основанный на сочетании аналитических алгоритмов решения классических задач с комбинаторным методом полного перебора вероятностных значений характеристик перемещения единиц транспорта по участкам ТС. Приводится пример определения наиболее эффективного (кратчайшего) пути с учётом вероятностных значений этой величины на участках.

**Пример нахождения вероятностных значений эффективного (кратчайшего) пути транспортной системы.** Рассматривается типовой вариант организации транспортной системы, который представлен на рисунке 1.

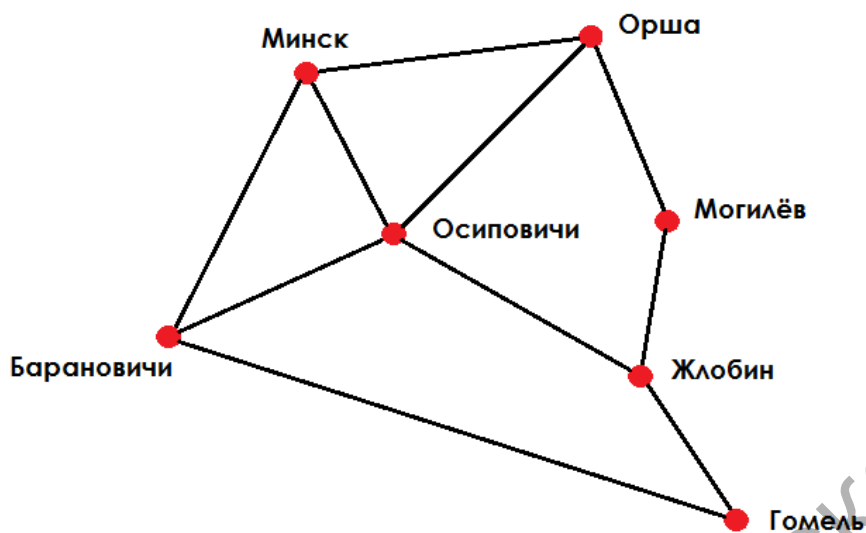


Рисунок 1 – Схема фрагмента транспортной системы

Схема представляют собой упрощённый вариант организации ТС и включает соединённые графические примитивы, обозначающие типовые элементы (дороги, перекрёстки) исследуемых объектов, имеющие вероятностные параметры. С целью нахождения вероятностной оценки эффективного (кратчайшего) пути схем была преобразована в граф (рисунок 2), с выделением элементов графовой модели.

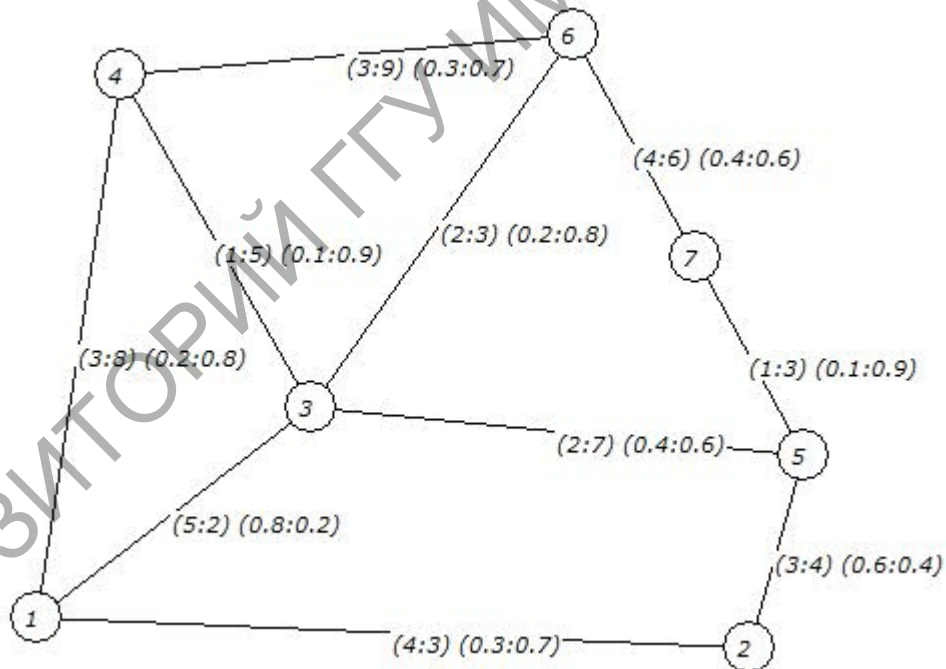


Рисунок 2 – Граф модели фрагмента транспортной системы

Рассматривались два значения, характеризующие эффективность перемещения по участкам ТС, для которых были указаны соответствующие вероятности. Для реализации вероятностного метода получения оценки наиболее эффективного (кратчайшего) были сгенерированы все возможные варианты реализации случайного графа (матрицы смежности  $n^m$ , где  $n$  – количество значений эффективности перемещения по

участку сети,  $m$  – число участков), для каждого из которых была решена частная задача определения эффективного (кратчайшего) пути и вычислена его вероятность. Для примера (рисунок 1) была задана матрица смежности графа  $7 \times 7$  с двумя возможными состояниями, а именно:

(0:0), (4:3), (5:2), (3:8), (0:0), (0:0), (0:0)  
 (0:0), (0:0), (0:0), (0:0), (3:4), (0:0), (0:0)  
 (0:0), (0:0), (0:0), (0:0), (2:7), (2:3), (0:0)  
 (0:0), (0:0), (1:5), (0:0), (0:0), (3:9), (0:0)  
 (0:0), (0:0), (0:0), (0:0), (0:0), (0:0), (1:3)  
 (0:0), (0:0), (0:0), (0:0), (0:0), (0:0), (4:6)  
 (0:0), (0:0), (0:0), (0:0), (0:0), (0:0), (0:0)

В результате расчёта с использованием реализованного программного обеспечения были получены вероятностные оценки, характеризующие оценку эффективного (кратчайшего) пути ТС (рис. 3).

	A	B	C	D
1	Min path	Path	Probability	Count
2	10	1-2-5-7	0.3445433856	114
3	9	1-2-5-7	0.3362400000	128
4	7	1-3-5-7	0.0720000000	128
5	11	1-2-5-7	0.0464652288	21
6	8	1-2-5-7	0.0415840000	160
7	7	1-2-5-7	0.0386400000	96
8	9	1-3-6-7	0.0350208000	40
9	10	1-3-5-7	0.0331223040	22
10	11	1-3-6-7	0.0100611072	13
11	10	1-4-6-7	0.0096215040	18
12	8	1-3-6-7	0.0091968000	56
13	5	1-3-5-7	0.0080000000	128
14	10	1-3-6-7	0.0075168000	24
15	8	1-3-5-7	0.0037632000	24
16	9	1-4-3-5-7	0.0033408000	24
17	7	1-4-3-5-7	0.0003712000	24
18	10	1-4-3-6-7	0.0002806272	3
19	11	1-4-3-6-7	0.0002322432	1

Рисунок 3 – Результат нахождения оценки эффективного (кратчайшего) пути фрагмента транспортной системы

В таблице, содержащей результаты оценки, Min path – эффективность (длина) пути, Path – номера вершин кратчайшего пути, Probability – вероятность кратчайшего пути, Count – количество совпадений результата.

Алгоритм позволил для двух значений эффективности (длины) участков ТС сформировать вектор состояний эффективности (длины) пути ТС, то есть  $\{(S1,S2)\} \rightarrow (S1, \dots, Sn)$ , а также оценить вероятности результирующего вектора эффективности (длины) пути.

Программное обеспечение было протестировано. По результатам тестов была выявлена зависимость скорости выполнения алгоритма от числа рёбер (участков ТС). Результаты тестирования представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Результаты тестирования алгоритма поиска вероятностных характеристик эффективности транспортной сети

№	число вершин	число ребёр	состояния	кол-во матриц	время генерации	время поиска	время обработки результатов
1	11	20	2	1048576	00:51:09:8	00:06:05:5	00:00:03:7
2	11	17	2	131072	00:12:37:1	00:01:49:6	00:00:01:3
3	11	16	2	65536	00:06:11:7	00:00:55:5	00:00:00:8
4	11	15	2	32768	00:03:07:4	00:00:32:7	00:00:00:6
5	11	13	2	8192	00:00:48:8	00:00:06:9	00:00:00:4

Как видно из результатов, время выполнения алгоритма экспоненциально зависит от числа ребёр (рисунок 4).

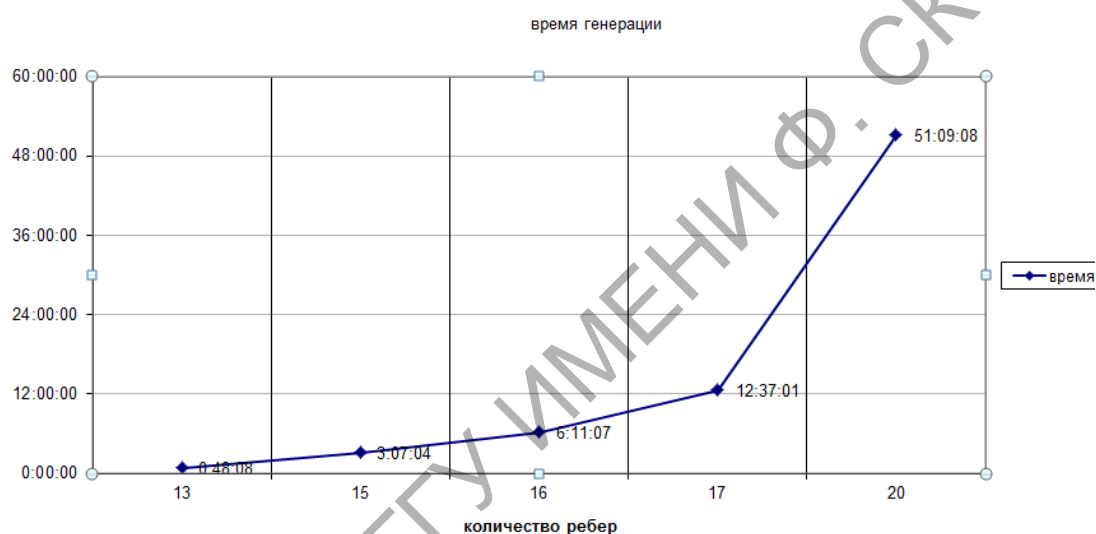


Рисунок 4 – График зависимости времени от числа связей

Практическое применение программного обеспечения позволит спрогнозировать и оценить определения распределения стоимости перемещения и максимального потока транспортной системы.

Представленный в статье подход эффективен при проектировании новых ТС, при построении новых линий транспортных линий, оценке характеристик стоимости, пропускной способности, определении логистических характеристик системы по соответствующим вероятным характеристикам участков ТС. Полученные результаты могут представлять собой, как оценку вероятных характеристик ТС ограниченной размерности, так и быть использованы для реализации метода вероятностно-алгебраического моделирования эффективности (пропускной способности, логистических характеристик) ТС большой размерности [2].

### Литература

- 1 Гасников А. В. Введение в математическое моделирование транспортных потоков/ А. В. Гасников. – М.:МЦНМО, 2014. – 330 с.
- 2 Сукач, Е. И. Вероятностно-алгебраическое моделирование сложных систем графовой структуры /Е. И. Сукач; М-во образования РБ, Гомельский государственный университет имени Ф. Скорины. – Гомель: ГГУ им. Ф. Скорины, 2012. – 224 с.