

**СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ВАРИАНТОВ ОРГАНИЗАЦИИ
ТРАНСПОРТНОЙ СЕТИ СООБЩЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ
ПРОГРАММНОГО ИНСТРУМЕНТАРИЯ «TRANZIT»**

***Анотація.** Описується склад програмного інструментарію «TRANZIT», орієнтованого на моделювання транспортних систем сполучення, які функціонують в умовах випадкових дій. Наводяться результати використання інструментарію для вибору раціонального варіанта організації транзитних транспортних потоків у вибраному напрямі.*

***Ключові слова:** імітаційні моделі, транспортна мережа, максимальний потік.*

***Аннотация.** Описывается состав программного инструментария «TRANZIT», ориентированного на моделирование транспортных систем сообщения, функционирующих в условиях случайных воздействий. Приводятся результаты использования инструментария для выбора рационального варианта организации транзитных транспортных потоков в выбранном направлении.*

***Ключевые слова:** имитационные модели, транспортная сеть, максимальный поток.*

***Abstract.** The composition of «TRANZIT» software tools directed on the modeling of transport systems connection operating under the accidental exposures is described. The results of tools using for selection of the rational option of transit traffics of the selected direction are presented.*

***Keywords:** imitation models, transport networks, maximum flow.*

1. Введение

Проблема исследования транспортных систем сообщения (ТСС) состоит в том, что все они функционируют в условиях воздействия случайных факторов, определяющих вероятностный характер происходящих процессов и оказывающих влияние на результирующие характеристики системы. Рассмотрение функционирования ТСС без учёта влияния случайных воздействий ограничивает возможности аналитических методов при решении реальных практических задач. А получение решений аналитическими методами, учитывающими вероятностный характер функционирования ТСС, представляет сложную проблему, решение которой приводит к рассмотрению ряда достаточно сложных математических задач.

Значительный вклад в решение этой проблемы предлагается получить посредством построения, испытания и эксплуатации математических моделей ТСС и разработки средств их реализации, включающих методы, методику, программное обеспечение, которые учитывают особенности исследуемых систем, случайный характер происходящих в них процессов, варианты структурной организации систем, особенности взаимодействия их компонентов между собой и с внешней средой.

В статье приводится описание программного инструментария «TRANZIT», реализующего метод системного управления транспортными потоками [1] и позволяющего решить ряд практических задач проектного моделирования ТСС, а именно:

– определение максимальной пропускной способности для ТСС, учитывающей вероятностный характер изменения величины внутренних транспортных потоков, обеспечивающей минимальное значение обобщенного показателя эффективности организации транспортного процесса по параметрам «стоимость», «время», «расстояние»;

– оценка величины затрат (по критерию эффективности) на обеспечение движения вероятностных транзитных потоков, образующих интегральный транспортный поток в ТСС исследуемого географического региона;

- выбор рационального варианта распределения транспортных потоков, составляющих интегральный транспортный поток сети в заданном направлении, в соответствии с обобщённым критерием качества, обеспечивающим заданный уровень эффективности по параметрам «стоимость», «время», «расстояние»;
- определение диапазона изменения пропускной способности ТСС для заданного уровня эффективности организации транспортных потоков по критерию качества;
- поиск «узких» мест в ТСС для различных временных режимов функционирования сети с учётом вероятностного изменения характеристик участков сети;
- модификация структуры ТСС с учётом вероятностного изменения характеристик всей сети и отдельных её участков.

Возможности программного инструментария демонстрируются на примере моделирования автомобильной ТСС Республики Беларусь.

2. Состав программного инструментария «TRANZIT»

Программный инструментарий «TRANZIT» реализован на языке программирования С# в среде разработки Windows-приложений Microsoft Visual Studio 2008, имеет стандартизированный графический пользовательский интерфейс и включает совокупность специализированных подсистем, а именно:

- подсистему формирования графовой структуры исследуемой ТСС (PS.GRAF_S);
- подсистему задания исходных данных моделирования (PS.INPUT), в состав которой входят блок формирования транзитных направлений, блок задания первоначальных настроек моделирования, блок вычисления параметров ветвей графа, блок задания общих параметров моделирования, блок задания величины внутренних транспортных потоков с использованием процедуры Монте-Карло (PR.MONTEC);
- подсистему генерации программы-имитатора (проекта) на основе концептуальной модели, созданной внутри интерактивной визуальной среды (PS.GENER);
- подсистему методов аналитических расчётов, определяющих величину максимального потока и его распределение (PS.MAX);
- подсистему планирования и реализации имитационных экспериментов (ИЭ) с компьютерной моделью в соответствии с выбранным алгоритмом определения величины максимального потока и его распределения по сети (PS.YPRMOD).

Каждая из перечисленных подсистем предназначена для решения определённых функциональных задач. Подсистема формирования графовой структуры исследуемой сети PS.GRAF_S активизируется после выполнения команды создания нового проекта программы модели. Она реализует следующую последовательность действий: задание размера формы, на которой будет проектироваться графовая структура ТСС; задание графа ТСС (путем использования «подложки» карты дорог, которая будет взята за основу при формировании графа, или путём рисования на форме построения схемы модели ТСС).

Подсистема PS.INPUT организует первоначальный ввод исходной информации, необходимой для начала моделирования, контролирует корректность этой информации и выдает результаты контроля пользователю для устранения ошибок в режиме «вопрос-ответ». При работе с подсистемой пользователю предлагается последовательность форм, каждая из которых содержит небольшое количество полей для ввода информации, причем там, где это возможно, ввод данных заменен выбором из заранее подготовленных списков. В случае необходимости пользователь может вернуться назад и откорректировать данные.

При этом с использованием процедур блока начальных настроек (LIB.PERV) определяются следующие величины для каждой ветви графа:

- количество полос движения транспортных средств (h_{ij});

– функция распределения вероятности скорости движения транспортных средств на участке $F(v_{ij})$, соответствующем ветви графа;

– функция распределения вероятности величины плотности потока, определяющей значение среднего расстояния между соседними транспортными средствами на участке сети (l_{ij}^{nn});

– коэффициент износа дорожного покрытия $k_{ij} \in [0,1]$.

Блок процедур вычисления параметров ветвей графа (LIB.VG) автоматически определяет числовые значения следующих величин:

– длину ветви (l_{ij}) в соответствии с введённым коэффициентом масштабирования;

– пропускную способность ветви (c_{ij}) в соответствии со скоростью перемещения, плотностью потока и длиной участка дороги;

– скорость движения (v_{ij}), значение которой получено в результате розыгрыша случайной величины по функции распределения вероятности, заданной с использованием блока первичных настроек;

– время движения (t_{ij}), случайное значение которого рассчитывается по формуле $t_{ij} = l_{ij} / v_{ij}$ при задании длины и скорости;

– стоимость движения единицы потока (q_{ij}).

Блок формирования транзитных направлений (LIB.TN) реализует процедуры, позволяющие сформировать множества граничных вершин V^{TP} , которые лежат на границе исследуемого географического региона (через эти вершины транспортные средства потока поступают в ТСС) и множества внутренних вершин v_i , каждая такая пара которых $(v_i, v_j), i \neq j$ задает исток и сток внутреннего потока; на основе автоматически сформированных множеств определить непересекающиеся подмножества граничных вершин V_n^{TP} , определяющие истоки и стоки исследуемой ТСС; на основании полученных подмножеств задать набор пар вида $(V_n^{TP}, V_m^{TP}), n \neq m$, определяющих транзитные направления.

Блок задания величины внутренних транспортных потоков (LIB.VN) включает процедуру, основанную на оригинальном алгоритме расчёта величины внутренних потоков между заданными внутренними узлами сети, включающем процедуру розыгрыша значений величины установившихся внутренних потоков участков с использованием процедуры Монте-Карло (PR.MONTEC); процедуру определения величины внутреннего потока для каждой ветви графа ТСС.

Блок задания общих параметров моделирования (LIB.PM) позволяет установить интервал времени для проведения моделирования пропускной способности ТСС, указать весовые коэффициенты важности компонент вектора эффективности потока, являющиеся параметрами обобщенного критерия эффективности варианта организации движения, и перейти к обновлению первичных параметров моделирования.

Подсистема генерации программы-имитатора (проекта) PS.GENER на основе концептуальной модели, созданной внутри интерактивной визуальной среды моделирования с учётом заданных исходных данных моделирования, формирует программу ИМ ТСС.

Подсистема реализации методов определения величины максимального потока PS.MAX и вариантов распределения его транзитных потоков по ТСС включает:

– процедуру PR.FF, реализующую классический алгоритм Форда-Фалкерсона расчёта указанных величин (FF);

– процедуру PR.MFF, организующую поиск максимального потока, обладающий оптимальным интегральным показателем эффективности, который достигается за счет пе-

перераспределения структурного распределения потока с использованием модифицированного алгоритма поиска максимального потока (MFF);

– процедуру определения интегрального максимального потока (PR.INT), позволяющую организовать выбор наиболее эффективного варианта организации интегрального максимального потока в заданном направлении, обеспечивающего минимальные затраты на перемещение транспорта с учётом обобщённого критерия качества (INT) [2].

Подсистема реализации моделирования PS.YPRMOD включает процедуру генерации цикла из N итераций метода Монте-Карло, установленного в соответствии с планом имитационного эксперимента, процедуру формирования выборок статистик для различных сочетаний входов и выходов исследуемого направления по значениям максимальных потоков, эффективности и их распределениям по ветвям сети, процедуру проверки окончания моделирования.

Взаимодействие подсистем осуществляется через информационную базу данных (BD_TRANZIT) программного инструментария TRANZIT, содержащую таблицы с исходными данными и результатами моделирования. База данных реализована универсальными программными средствами и содержит входные данные, связывающие геометрическое представление объектов, имеющих пространственную природу, с таблицей параметров, описывающих свойства этих объектов.

3. Выбор варианта организации перемещения транзитных потоков на примере исследования автомобильной сети сообщения Республики Беларусь

Модель автомобильной ТСС Республики Беларусь была построена в диалоговом режиме программного инструментария, обеспечивающего использование файла карты дорог в качестве подложки при прорисовке графа ТСС и автоматическое занесение информации о параметрах исследуемого варианта сети в таблицы базы данных «TRANZIT».

Для иллюстрации возможностей программного инструментария «TRANZIT» рассмотрим транзитный поток, перемещение которого реализуется в условиях случайных воздействий. Предполагается, что исток и сток транзитного транспортного потока расположены на границах ТСС, а движение направлено от узла Подляска-Брест до узла – дорога на Смоленск.

В процессе моделирования была применена методика параметрического исследования характеристик движения для различных вариантов организации движения. Поскольку проведение мониторинга для получения исходных данных моделирования было ограничено объективными условиями функционирования исследуемого объекта, то для их оценки применялась методика, описанная в [3]. В соответствии с указанным способом оценки исходных данных при моделировании, во-первых, варьировались значения скорости перемещения транспортных средств (65 км/ч – 90 км/ч), во-вторых, рассматривались варианты изменения пропускной способности за счёт варьирования числа полос движения (1–3) и, в-третьих, варьировалась плотность транспортных средств на участках АСС (100 ед./км – 50 ед./км). Пропускная способность рассчитывалась по формуле: $pr = v^*d^*\rho$, где v – скорость (км/ч), d – период моделирования (ч), ρ – плотность транспортных единиц на участке (тр.ед./км). В соответствии с плотностью распределения транспортных средств на дорогах рассматривались различные варианты уплотнения исследуемой ТСС, а именно: 100%, 75%, 50%. Таким образом, для каждой серии имитационных экспериментов с учётом уровней описанных данных (значений скорости перемещения транспортных единиц, числа полос и плотности транспортного потока), а также с учётом выбранного времени моделирования определялись возможные значения пропускной способности, которые с использованием процедуры Монте-Карло разыгрывались при проведении моделирования.

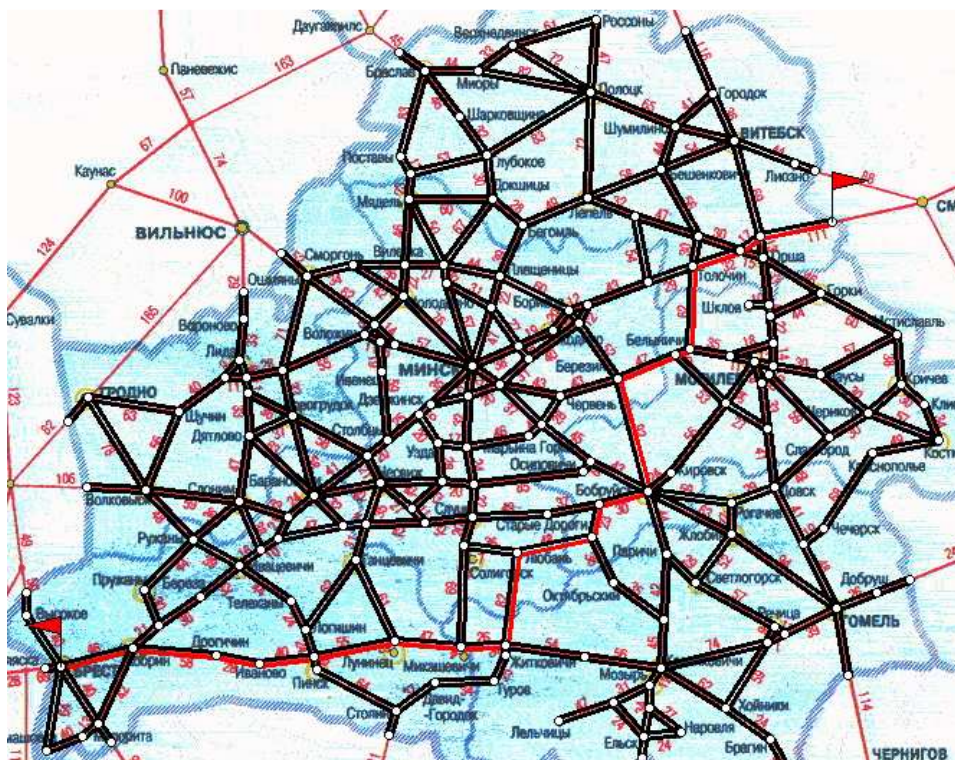


Рис. 1. Распределение максимального потока по ТСС, полученное с использованием классического алгоритма Форда-Фалкерсона (FF)

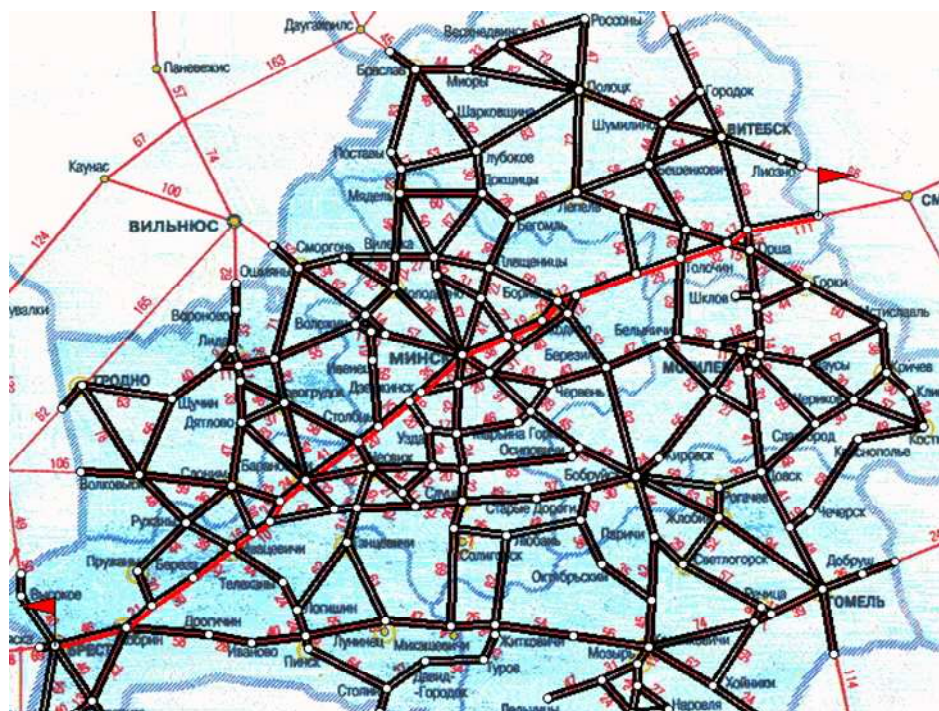


Рис. 2. Распределение максимального потока по ТСС, полученное с использованием модифицированного алгоритма Форда-Фалкерсона (MFF)

увеличения плотности потока (достигается повышением интенсивности потока), так и за счёт расширения дорог (увеличения количества полос движения), а также повышения уровня их эксплуатационных характеристик, приводящих к увеличению периода их эксплуатации и, как следствие, к 100% использованию участков дорог.

В процессе моделирования были сформированы выборки, по которым определены средние значения величины максимального потока и его нормированных показателей эффективности для различных критериев организации движения (расстояния ($d1$), времени ($d2$), стоимости ($d3$), обобщённого показателя качества ($d_i = 0,33$)), полученные с использованием альтернативных алгоритмов определения максимального потока и различных значений параметров функционирования сети, определяющих вероятностное значение параметра пропускной способности.

Сравнение вариантов организации перемещения по ТСС показало, что рост максимального потока может быть достигнут как за счёт повышения

вариантов организации перемещения по ТСС показало, что рост максимального потока может быть достигнут как за счёт повышения

Варианты распределения транзитного транспортного потока для направленного движения с одной полосой движения, полученные с использованием альтернативных алгоритмов расчёта: модифицированного алгоритма определения потока (MFF) и классического алгоритма (FF), представлены на рис. 1 и 2. Флажками обозначены исток и сток исследуемого транспортного потока, а само распределение потока выделено цветом.

При сопоставлении рис. 1 (алгоритм FF) и 2 (алгоритм MFF) видно, что в последнем случае достигается более экономичное распределение потока (по критерию расстояния).

С целью определения значения интегрального максимального потока, оценки его эффективности и нахождения его распределения по сети, функционирующей в условиях вероятностных значений пропускной способности участков ТСС, рассмотрим направленный транзитный

поток со множеством входов и множеством выходов (рис. 3).

На рисунке чёрным цветом выделены транзитные потоки, которые перемещаются по сети от её западной границы к восточной и в сумме составляют интегральный транспортный поток.

Согласно алгоритму нахождения интегрального максимального потока, основанному на модифицированном

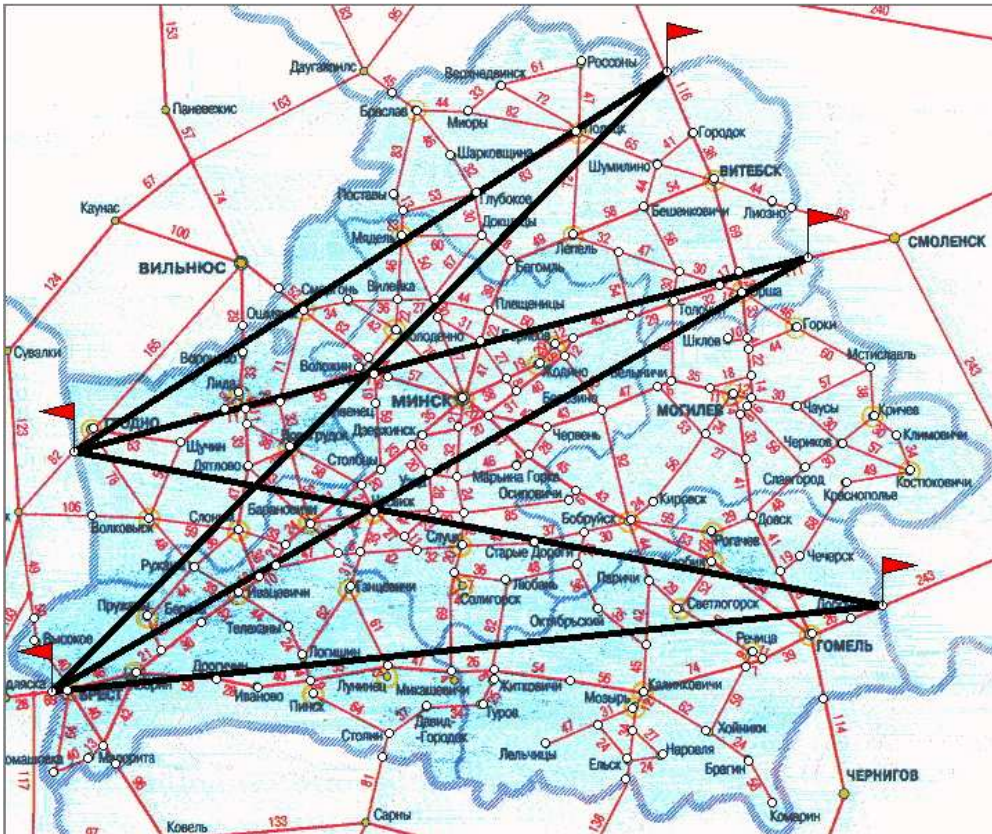


Рис. 3. Граф автомобильной ТСС Республики Беларусь с транзитными потоками направления Запад-Восток

алгоритме расчёта (MFF) максимального потока на очередной итерации, был получен наиболее эффективный вариант распределения интегрального максимального потока в выбранном направлении, который представлен на рис. 4. Цветом на рисунке, являющемся копией формы отображения результатов моделирования с использованием программного инструментария «TRANZIT», отмечена загруженность участков ТСС. Зеленый цвет означает невысокую загруженность (10%), желтый – участок ТСС загружен приблизительно на 50%, красный – участок ТСС загружен на 100%. Черный – ветвь не используется потоком. Полученные расчёты показали, что суммарная величина интегрального максимального потока в выбранном направлении больше, чем любая величина максимального потока, найденная для случая одного из рассматриваемых потоков, что свидетельствует о наиболее полном использовании ресурсов сети.

Дальнейшее исследование было направлено на сопоставительный анализ вариантов ТСС при 100% составе ветвей с аналогичными исследованиями, проведёнными для исследования этой же ТСС при 70% и 85% составе ветвей. Переход к вариантам с 85% и 70%

составом ветвей был проведён в связи с необходимостью исследования альтернативных вариантов организации функционирования АСС, возникающих по причине возникновения «пробок», аварийных ситуаций, ремонтных работ [4].

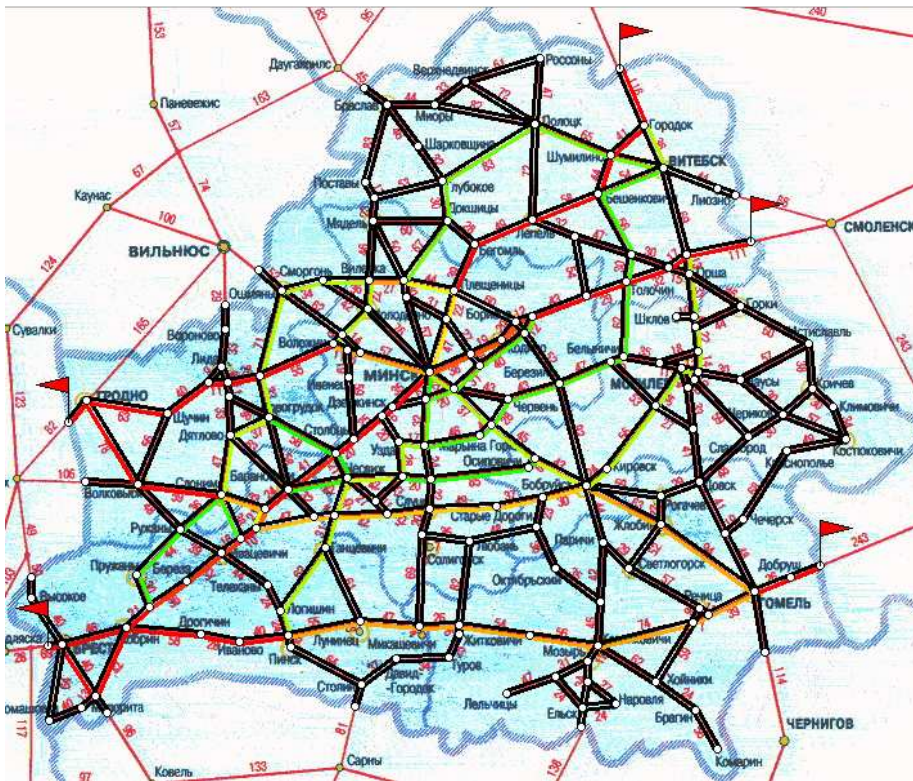


Рис. 4. Граф ТСС Республики Беларусь с найденным распределением интегрального максимального потока (MFF)

Сравнительный анализ результатов моделирования позволил сделать следующие выводы:

1. Для вариантов исследования транзитного потока, который обслуживается ТСС со 100% и 85 % составом ветвей, величины интегрального максимального потока, полученные с использованием классического (FF) и модифицированного (MFF) алгоритмов расчёта максимального потока на очередной итерации ме-

тода, совпадают в рамках экспериментов с одинаковыми значениями параметров. Величина эффективности при этом неизменно возрастает на 50–85% (при 100% составе ветвей) и на 30–40% (при 85% составе ветвей).

2. При сравнении значений показателей эффективности организации перемещения по расстоянию было сделано заключение о том, что эффективность транспортировки уменьшается приблизительно в 6 раз при переходе от 100% состава ветвей к 85% составу. А при переходе от 85% состава ветвей к 70% составу значение показателя эффективности по расстоянию незначительно увеличивается (на 8 %), однако это достигается потерей величины реализуемого интегрального максимального потока. В этом случае лучшие результаты по величине максимального интегрального потока даёт классический алгоритм FF. Отсюда можно заключить, что гибкое использование различных алгоритмов расчёта, реализованных в составе «TRANZIT», позволит выбрать оптимальный вариант распределения с учётом предпочтений исследователя.

3. Сравнение величин интегрального максимального потока при увеличении загрузки ТСС (уплотнении потока) показало, что при 50% загрузке ТСС величина потока минимальна для всех вариантов имитационных экспериментов. Во всех вариантах структурной организации ТСС (100% ветвей, 85% ветвей, 70% ветвей) уплотнение на 20%, а затем ещё на 30% приводит к соответствующему увеличению максимального потока. При переходе от варианта со 100% составом ветвей к 85% составу ветвей величина интегрального максимального потока уменьшается на 25%. Аналогичная картина наблюдается и при переходе от варианта с 85% составом ветвей к 70% составу ветвей: поток также уменьшается на 25%. Этот результат объясняется распределением интегрального максимального потока по альтернативным (обходным) участкам дорог с меньшей пропускной способностью, по-

сколькo часть участков дорог, имеющих более высокую пропускную способность, была исключена по причине их неудовлетворительных транспортно-эксплуатационных характеристик.

4. Выводы

Использование программного инструментария «TRANZIT» при выборе варианта организации ТСС в условиях её вероятностного функционирования позволяет автоматизировать наиболее трудоемкие этапы исследования реальной транспортной сети, что обеспечивается наличием удобного интерфейса, возможностью оперативной корректировки параметров моделирования и использованием эффективных алгоритмов расчёта. Это, в свою очередь, сокращает время и стоимость принятия проектных решений при изменении структурной организации сети и управлении транзитными транспортными потоками.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Максимей И.В. Определение интегрального максимального потока в региональной сети с помощью имитационного моделирования / И.В. Максимей, Е.И. Сукач, П.В. Гируц // Математичні машини і системи. – 2008. – № 2. – С. 128 – 136.
2. Максимей И.В. Методика определения рациональной организации транспортных потоков в региональной сети / И.В. Максимей, Е.И. Сукач, П.В. Гируц // Известия Гомельского гос. ун-та им. Ф. Скорины. – 2007. – № 5. – С. 442.
3. Сукач Е.И. Моделирование и анализ транспортных сетей с учётом случайных параметров их функционирования / Е.И. Сукач, П.В. Гируц, Д.В. Ратобильская // Известия Гомельского государственного университета имени Ф.Скорины. – 2010. – № 5 (62). – С. 21 – 25.
4. Имитационное моделирование динамики транспортных потоков региона при чрезвычайных ситуациях / И.В. Максимей, Е.И. Сукач, П.В. Гируц [и др.] // Материалы пятой междунар. конф. “Обработка информации и управление в чрезвычайных и экстремальных ситуациях”, ОИПИ, (Минск, 24–26 октября 2006г.). – Минск, 2006. – Т. 1. – С. 72 – 75.

Стаття надійшла до редакції 01.07.2011