

На правах рукописи

**ЕРОШОК Иван Дмитриевич**

**УПРАВЛЕНИЕ СТОХАСТИЧЕСКИМИ ПОТОКАМИ ОБЪЕКТОВ В  
СЕТИ С КУСОЧНО-ЛИНЕЙНЫМИ ТРАЕКТОРИЯМИ  
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИНТЕГРАЛЬНЫХ КОНТЕЙНЕРОВ**

Специальность 05.13.01 - Системный анализ, управление и обработка информации (технические системы)

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание учёной степени  
кандидата технических наук

Москва - 2020

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)»

Научный руководитель: **Балдин Александр Викторович**,  
доктор технических наук, профессор,  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)», г. Москва.

Официальные оппоненты: **Саксонов Евгений Александрович**,  
доктор технических наук, профессор,  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский технический университет связи и информатики», г. Москва.

**Мутина Елена Игоревна**,  
кандидат технических наук,  
Федеральное государственное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный технологический университет «Станкин», г. Москва.

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина», г. Рязань.

Защита состоится «\_\_» декабря 2020 года в 12<sup>00</sup> часов в конференц-зале на заседании диссертационного совета Д217.047.01, созданного на базе ФГУП "Научно-исследовательский и экспериментальный институт автомобильной электроники и электрооборудования", по адресу 105187 г. Москва, ул. Кирпичная, 39/41.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке ФГУП "Научно-исследовательский и экспериментальный институт автомобильной электроники и электрооборудования" и на сайте <http://www.niiae.ru>.

Автореферат разослан « » октября 2020 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета



д.т.н., с.н.с. Варламов О.О.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность проблемы

Задачи группового перемещения объектов по кусочно-линейным траекториям широко распространены в технических системах. Это доставка заготовок в мелкосерийных сборочно-конвейерных производствах с промежуточными пунктами контроля и перегрузки, перемещение специальных изделий в спутниковых группировках с использованием современных средств орбитальной доставки, мультимодальные перевозки с использованием грузовых контейнеров, классическая сеть городского пассажирского транспорта, в которой роль интегральных накопителей играют транспортные средства, в роли объектов выступают пассажиры, а кусочно-линейные траектории – маршруты с остановочными пунктами.

Общая проблема в этих прикладных постановках – эффективное управление стохастическими потоками объектов, перемещающимися по кусочно-линейным траекториям (транспортной сети) в интегральных накопителях. Эффективность в подобных постановках, как правило, является решением многокритериальных задач оптимизации (минимизация времени и/или стоимости доставки, минимизация накладных расходов на перемещение и управление, возможность динамического проектирования траекторий, внезапная необходимость замены вышедшего из строя интегрального контейнера и иные критерии). При этом входящий поток заявок на перемещение объектов зачастую является стохастическим, что исключает применение прямых аналитических способов решения.

Имеется достаточно большой объем работ по разработке и использованию методов проектирования транспортных и маршрутных сетей (М.А.Пиир, М.Л.Петрович, А.И.Стрельников, Л.И.Свердлин и др.), анализа поведенческих факторов подвижности населения (Г.А.Гольц, С.А.Ваксман, Ю.Г.Котиков, Н.С.Пальчиков, А.С.Михайлов и др.), методов построения матриц межрайонных и маршрутных корреспонденций (Н.В.Булычева, Л.Н.Авдотьин, Г.А.Варелопуло, М.Е.Корягин, В.Н.Мягков, А.Ю.Михайлов и др.), оценки эффективности функционирования транспортных систем городов и регионов (М.Я.Сницарь, Ю.С.Кирзнер, А.Б.Черепанов, А.И.Солодкий и др.).

Однако, в опубликованных работах недостаточно полно рассмотрены вопросы создания обобщенных имитационных моделей с взаимокоррелированными нестационарными потоками и режимами движения объектов по динамическому расписанию, которые являются основополагающими при оптимизации управления стохастическими потоками объектов в сети с кусочно-линейными траекториями с использованием интегральных контейнеров. В связи с этим работа, направленная на решение задач повышения эффективности управления такими системами, является актуальной.

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» в рамках одного из приоритетных направлений развития «Ин-

формационно-коммуникационные технологии».

**Целью диссертационной работы** является разработка моделей и методов управления стохастическими потоками объектов в сети с кусочно-линейными траекториями с использованием интегральных контейнеров на основе программных компонент гибридной системы моделирования сети траекторий.

Для достижения данной цели в диссертационной работе необходимо решить следующие задачи:

1. Провести системный анализ проблем управления стохастическими потоками объектов в сети с кусочно-линейными траекториями с использованием интегральных контейнеров.

2. Создать математические модели случайных временных рядов, характеризующих потоки объектов, с заданными корреляционными характеристиками.

3. Разработать алгоритм формирования матрицы корреспонденций по характеристикам входных потоков объектов и геоинформационным моделям их подвижности.

4. Создать имитационную модель управления потоками объектов в сети с кусочно-линейными траекториями с использованием интегральных контейнеров в виде сети массового обслуживания.

5. Разработать методы рационализации режимов перемещения по кусочно-линейным траекториям и параметров интегральных контейнеров.

6. Создать взаимодействия приложений и компоненты проблемно-ориентированной системы управления потоками объектов в сети с кусочно-линейными траекториями с использованием интегральных контейнеров.

**Объектом исследования** являются потоки объектов в сети с кусочно-линейными траекториями.

**Предметом исследования** являются модели и методы управления стохастическими потоками объектов в сети с кусочно-линейными траекториями с использованием интегральных контейнеров.

**Методы исследования.** Решение поставленных задач проведено с использованием методов статистического анализа данных, сетей массового обслуживания, имитационного моделирования, математического программирования.

**Тематика работы** соответствует следующим пунктам паспорта специальности 05.13.01 «Системный анализ, управление и обработка информации»: п. 2 «Формализация и постановка задач системного анализа, оптимизации, управления, принятия решений и обработки информации»; п. 9 «Разработка проблемно-ориентированных систем управления, принятия решений и оптимизации технических объектов».

**Научная новизна.** В работе получены следующие результаты, отличающиеся научной новизной:

- математические модели случайных временных рядов, характеризующих потоки объектов, отличающиеся линейным преобразованием элементов временных рядов потоков с одним временным индексом и обеспечивающие заданные корреляционные характеристики;

- алгоритм формирования матрицы корреспонденций, отличающийся многополюсной параметризацией пространства центров тяготения, обеспечи-

вающий учет характеристик входных потоков объектов и геоинформационных моделей их подвижности;

- методы рационализации режимов перемещения по кусочно-линейным траекториям и параметров интегральных контейнеров, отличающиеся учетом многообразия траекторий и конечных точек составляющих их отрезков и обеспечивающие повышение обоснованности решений по выбору эффективной организации режимов работы.

- структура взаимодействия приложений проблемно-ориентированной системы управления эффективной работой сети траекторий, отличающаяся использованием статистической базы данных и аналитико-имитационных моделей и обеспечивающая учет стохастических параметров потоков объектов при динамическом формировании комплекса кусочно-линейных траекторий.

### **Практическая значимость**

Разработанные алгоритмы формирования матрицы корреспонденций по характеристикам входных потоков и геоинформационным моделям подвижности объектов позволяют сократить расходы на натурное обследование потоков в системе городского пассажирского транспорта. Аналитико-имитационные модели обеспечивают оперативное формирование динамического расписания выхода подвижного состава в условиях неравномерного потока.

### **Основные положения, выносимые на защиту**

- математические модели случайных временных рядов, характеризующих потоки объектов обеспечивают заданные корреляционные характеристики;

- алгоритм формирования матрицы корреспонденций обеспечивает учет характеристик входных потоков объектов;

- методы рационализации режимов перемещения по кусочно-линейным траекториям и параметров интегральных контейнеров обеспечивают повышение обоснованности решений по выбору эффективной организации режимов работы;

- структура взаимодействия приложений проблемно-ориентированной системы управления эффективной работой сети траекторий реализует учет стохастических параметров потоков объектов и динамическое управление формированием комплекса кусочно-линейных траекторий.

**Достоверность полученных результатов** обеспечивается корректным использованием методов системного анализа, теории вероятностей и математической статистики, теории сетей массового обслуживания, методов оптимизации, соответствием результатов аналитического и имитационного моделирования, а также подтверждена результатами практической реализации и экспериментальными данными.

### **Реализация и внедрение результатов работы**

Результаты работы в форме проблемно-ориентированной системы управления потоками объектов в сети с кусочно-линейными траекториями с использованием интегральных контейнеров используются в учебном процессе ФГБОУ ВО «МАДИ» кафедры «Автоматизированные системы управления» по дисциплинам «Системный анализ и принятие решение» и «Моделирование систем», а

также в МГТУ им. Н.Э.Баумана по дисциплине «Моделирование АСОИУ».

**Апробация результатов диссертационного исследования.** Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих научно-технических форумах, семинарах и конференциях: конференции «Мир и безопасность в 21 веке» (Москва, 2014); 20-й НПК «Научно-практические аспекты совершенствования управления космическими аппаратами и информационного обеспечения запусков космических аппаратов» (Краснознаменск, 2015); конференции «Совершенствование методического и алгоритмического обеспечения исследований функционирования специализированных средств системы контроля космического пространства» (Москва, 2016); Международном научном конгрессе «Science & Engineering Education SEE» (Москва, 2016); международной НПК «Технические науки: проблемы и решения» (Москва, 2020); международной науч. конф. «Высокие технологии и инновации в науке» (Санкт-Петербург, 2020), а также семинарах кафедры «Системы обработки информации и управления» МГТУ им.Н.Э.Баумана (2015-2020).

**Публикации.** По результатам диссертационного исследования опубликовано 9 печатных работ, в т.ч. 4 статьи в изданиях, рекомендованных ВАК РФ, а также статья в издании, индексируемом в международной базе цитирования Scopus. В работах, опубликованных в соавторстве и приведенных в автореферате, лично автором получены следующие результаты: [5, 6] - математические модели случайных временных рядов, характеризующих потоки объектов, отличающиеся линейным преобразованием элементов временных рядов потоков с одним временным индексом; [4, 8] - алгоритм формирования матрицы корреспонденций, отличающийся многополюсной параметризацией пространства центров тяготения; [1, 3, 7] - методы рационализации режимов перемещения по кусочно-линейным траекториям и параметров интегральных контейнеров, отличающиеся учетом многообразия траекторий и конечных точек составляющих их отрезков; [2, 9] - структура взаимодействия приложений проблемно-ориентированной системы управления эффективной работой сети траекторий, отличающаяся использованием статистической базы данных и аналитико-имитационных моделей.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, выводов по работе, списка используемых источников из 122 наименований и приложения. Общий объем составляет 148 страниц, содержит 45 рисунков и 12 таблиц.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснована актуальность диссертационной работы, сформулированы цель и задачи исследования, представлены основные научные результаты, а также приведены сведения об апробации и внедрении работы.

**В первой главе** выполнен системный анализ работ в области организации оперативного управления и моделирования работы перемещений мобильных объектов по кусочно-линейным траекториям в интегральных контейнерах.

Рассмотрены основные положения статистической обработки результатов натурных обследований потоков объектов и результатов имитационного эксперимента. В рамках решения задач анализа потоков объектов и из влияния на

показатели объема и качества перемещений в работе предлагается использовать весь спектр методов многомерного статистического анализа.

Показано, что для построения модели сети траекторий адекватен аппарат сетей массового обслуживания (СеМО). Анализ работ в области моделирования сетей траекторий позволил предложить дизайн исследования по получению решений для организации эффективного управления потоками объектов (например, объектов городского пассажирского транспорта, рис. 1).

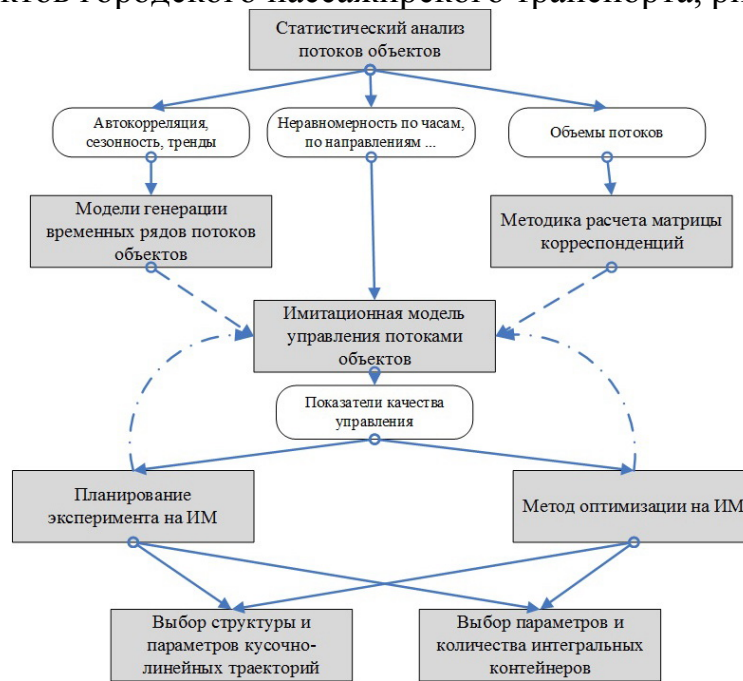


Рис. 1. Дизайн исследования

Предложенные методы решения поставленных задач позволят построить компоненты системы управления стохастическими потоками объектов, а также создать основу для построения автоматизированной системы поддержки принятия решений.

**Во второй главе** проведен статистический анализ потоков объектов на остановочных пунктах (ОП) выбранных траекторий конкретной сети траекторий. Предложены модели случайных временных рядов, характеризующих потоки объектов, а также алгоритм формирования матрицы корреспонденций, отличающийся учетом характеристик входных потоков объектов и геоинформационных моделей их подвижности. Полученные результаты статистического анализа реальных пассажиропотоков легли в основу построения имитационной модели обслуживания.

**В работе под кусочно-линейной траекторией (маршрутом) понимается связная ломаная, конечные и промежуточные узлы которой представляют собой потенциальные позиции перемещения объектов между различными интегральными контейнерами.** Для ряда траекторий реальных объектов получены основные статистические характеристики потоков. Проведен анализ статистических данных по выбранным траекториям и получены значения коэффициентов неравномерности потока по часам суток для различных маршрутов  $K_n^{B, P, Y, T} = Q_{ч} / Q_{ср.ч}$ , где  $Q_{ср.ч}$  среднечасовой, а  $Q_{чп}$  поток в час пик. Так, для выбранных маршрутов получены совершенно различные значения характеристик

потоков, а неравномерности (рис. 2) имеют различный вид.

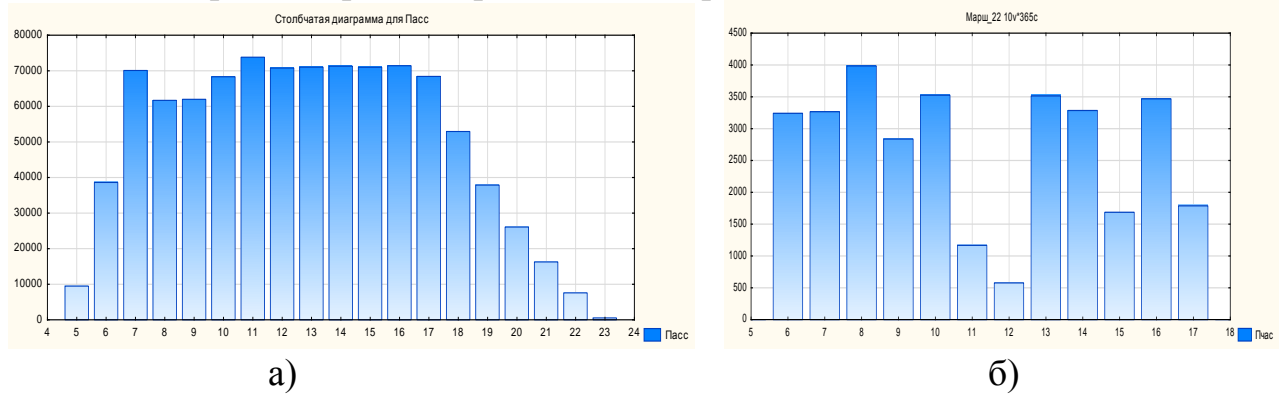


Рис. 2. Структура внутрисуточной неравномерности потоков

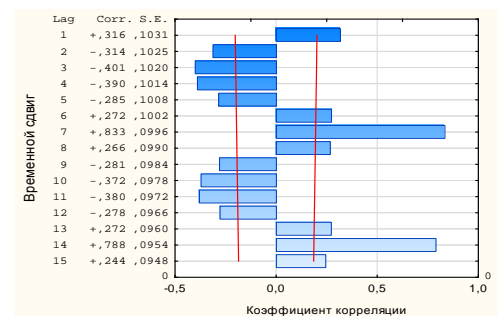
В работе показано, что имеет место различие коэффициентов неравномерности по направлению  $K_{н}^{н а п} Q_{п} / Q_{о б р}$ , где  $Q_{п р}$ ,  $Q_{о б р}$  - потоки в соответствующих направлениях. В рамках метода главных компонент предполагается, что имеется  $p$  показателей  $\xi_i$   $i=1, \dots, p$ , которые представляют случайные величины (например,  $\xi_i$  - поток на  $i$ -м ОП). Средние значения всех показателей определяются вектором  $\mathbf{m}=(m_1, \dots, m_p)$ , а матрица ковариаций этого случайного вектора -  $\mathbf{D}$ ,  $i, j=1 \dots p$ . Метод *анализа главных компонент* определяет структурную взаимосвязь между этими показателями, а суть метода состоит в том, что ищутся линейные комбинации исходных переменных

$$\eta_1 = \sum_{j=1}^p \alpha_{1j} \xi_j, \quad \eta_p = \sum_{j=1}^p \alpha_{pj} \xi_j, \quad (1)$$

которые удовлетворяют условиям ортогональности ( $cov(\eta_i, \eta_j)=0$ ,  $i, j=1..p$ ) и монотонности дисперсии ( $D\eta_1 \geq D\eta_2 \geq \dots \geq D\eta_p$ ).

Полученные результаты статистического анализа потоков на ОП являются основой для параметризации имитационной модели обслуживания траектории. Выявленные коэффициенты неравномерности, тренды и сезонные составляющие, а также корреляционный и факторный анализ исходных статистических данных легли в основу построения адекватных моделей и алгоритмов генерации нестационарных и взаимосвязанных временных рядов потоков. Оценочные характеристики на ОП служат основой для построения матрицы корреспонденций между ОП.

С о б с т в . з н а ч е н и я ( М _ 8 5 _ Р я )				
В ы д е л е н и е : Г л а в н ы е к о м п				
З н а ч	С о б с т в		К у м у л я	
	%	о б д и с п	С о б с т в	%
1	6 ,	8 1	6 ,	8 1
2	0 ,	5 ,	6 ,	8 6
3	0 ,	3 ,	7 ,	9 0
4	0 ,	3 ,	7 ,	9 3
5	0 ,	2 ,	7 ,	9 5
6	0 ,	1 ,	7 ,	9 7
7	0 ,	1 ,	7 ,	9 8
8	0 ,	1 ,	8 ,	1 0 0



а) информативность факторов

б) автокорреляция 1-й компоненты

Рис. 3. Факторный анализ потоков

*Разработка моделей нестационарных взаимосвязанных временных ря-*



## дов потоков

Основываясь на результатах проведенного статистического анализа потоков, показана возможность восстановления исходных временных рядов потоков на всех ОП пунктах по трем временным рядам главных компонент F1, F2 и F3, которые дают 90% информативности, т.е. могут восстановить все потоки на всех ОП с потерей точности не более 10%.

Предлагается алгоритм генерации этих потоков на основе обратного преобразования главных компонент. Базовой моделью генерации является модель стационарного временного ряда с заданной автокорреляционной функцией.

Для генерации стационарного временного ряда потока  $\xi_n, n=1,2,\dots$  с заданной автоковариационной функцией  $R^{3ad}$  для  $m=1,2,\dots,N$  (для  $m>N$  автокорреляция отсутствует  $R^{3ad}(m)=0$ ) предлагается следующая модель.

Без ограничения общности можно положить, что математическое ожидание  $M\xi_i=0$ . Автоковариационная функция временного ряда по определению равна  $R(m)=cov(\xi_i, \xi_{i+m})=M[(\xi_i-M\xi_i)\cdot(\xi_{i+m}-M\xi_{i+m})]=M(\xi_i\cdot\xi_{i+m})=M(\xi_1,\xi_m)$ . Автокорреляционная функция временного ряда определяется как  $R^*(m)=R(m)/R(0)$ , где  $R(0)=M M(\xi_n\cdot\xi_n)=D\xi_n=D\xi_1$  - дисперсия временного ряда.

Для генерации последовательности формируется совокупность случайных, одинаково распределенных и независимых случайных величин  $\eta_i, i=1,2,\dots$  с нулевым математическим ожиданием  $M\eta_i=0$  и единичной дисперсией  $D\eta_i=1$ , которая преобразуется в последовательность  $\xi_n = \sum_{i=1}^N x_i \eta_{i+n}, j=1,2,\dots$ . Задача заключается в нахождении значений переменных  $x_i$ , при которых автоковариационная функция последовательности  $\xi_n, n=1,2,\dots$ , будет равна заданной  $R^{3ad}(m)$ .

Из условия  $M\eta_i=0$  следует, что  $M\xi_j = M \sum_{i=1}^N x_i \eta_{i+j} = \sum_{i=1}^N x_i (M\eta_{i+j}) = \sum_{i=1}^N x_i = 0$ , т.е. математическое ожидание линейного преобразования также равно 0, поэтому для автоковариационной функции будет справедливо соотношение

$$R(m) = M(\xi_n \cdot \xi_{n+m}) = M \left[ \sum_{i=1}^N x_i \eta_{i+n} \cdot \sum_{j=1}^N x_j \eta_{j+n+m} \right] = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N x_i x_j M(\eta_{i+n} \cdot \eta_{j+n+m}), \quad (2)$$

$$\text{где } M(\eta_{i+n} \cdot \eta_{j+n+m}) = \begin{cases} 0, & i \neq j+m \\ 1, & i = j+m \end{cases}$$

Это приводит к необходимости численного решения системы из  $N$  нелинейных уравнений

$$\sum_{i=1}^{N-m} x_i x_{i+m} = R^{3ad}(m), m=0, 1, \dots, N-1. \quad (3)$$

с использованием итерационных процедур в математических пакетах MatLab, MathCad и других.

Для генерации взаимосвязанных потоков объектов с заданными кросскорреляциями в работе предлагается предварительное линейное преобразование элементов временных рядов потоков с одним временным индексом. Так, если случайный вектор  $\xi$  имеет характеристики  $M\xi=m_\xi$  и  $D\xi=||cov(\xi_i, \xi_j)||$ , то для случайного вектора  $\eta=L\xi+C$  вектор математических ожиданий вектора  $\eta$  будет ра-

вен  $M\eta=Lm\xi+C$ , а дисперсионная матрица  $\eta - D\eta=L\cdot D\xi\cdot L^T$ . Для заранее заданной дисперсионной матрицы результирующего вектора  $\eta$  предварительно решается система нелинейных уравнений для поиска матрицы  $L$ .

Нестационарность потока проявляется как во внутрисуточной, так и внутрисуточной неравномерности, причем для каждого ОП своей. Для реализации алгоритма генерации потоков выбрана соответствующая рекуррентная схема и процедура наложения на временной ряд потока выделенного нестационарного тренда.

**Таким образом, предложены математические модели случайных временных рядов, характеризующих потоки объектов, отличающиеся линейным преобразованием элементов временных рядов потоков с одним временным индексом и обеспечивающие заданные корреляционные характеристики.**

Для оценки корректности использования сгенерированных временных рядов потоков в имитационных моделях, в работе решена задача обеспечения формального подхода к оценке адекватности модельных и реальных временных рядов потоков, основанных на натурных обследованиях.

Для исходных данных потоков и временных рядов, сгенерированных с заданными статистическими характеристиками, в работе проведена проверка наличия линейной связи между параметрами на интервалах исследуемых процессов. Для этого исходные и сгенерированные ряды потоков разбиваются на множество одинаковых интервалов и проводится группировка значений  $X(t_i)$  исходного ряда  $X(t)$  на  $m$  интервалов:

$$\begin{aligned} \tau_1 &= X(t_1), X(t_2), \dots, X(t_k), \\ \tau_2 &= X(t_{k+1}), X(t_{k+2}), \dots, X(t_{2k}), \\ &\dots \\ \tau_m &= X(t_{(m-1)\cdot k+1}), X(t_{(m-1)\cdot k+2}), \dots, X(t_{m\cdot k}). \end{aligned} \quad (4)$$

Таким образом, исходный временной ряд представляется в виде величины сдвига, набора интервалов длины и остатка:

$$X(t) = \delta_j + \begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \\ \dots \\ \tau_m \end{bmatrix} + v_j = \delta_j + \begin{bmatrix} X(t_1), X(t_2), \dots, X(t_k), \\ X(t_{k+1}), X(t_{k+2}), \dots, X(t_{2k}), \\ \dots \\ X(t_{[m-1]\cdot k+1}), X(t_{[m-1]\cdot k+2}), \dots, X(t_{m\cdot k}) \end{bmatrix} + v_j \quad (5)$$

где  $v_j$  остаток,  $v_j \in (0, k)$ . Значение  $k_i$  будем называть интервалом длины  $k$ , а временной ряд, представленный в виде семейства интервалов одинаковой длины  $k_i$  и остатка  $v_j$  представляется в виде интервального разбиения.

Для каждого интервального разбиения  $x(t)^{\delta_j}$  проводится расчет параметров  $R$ ,  $D$  и  $\xi$ , представление их в виде числовых последовательностей:  $R_k^\delta = \{R_{\tau_1}, R_{\tau_2}, \dots, R_{\tau_m}\}$ ,  $\xi_k^\delta = \{\xi_{\tau_1}, \xi_{\tau_2}, \dots, \xi_{\tau_m}\}$ ,  $D_k^\delta$ , а для каждой пары числовых последовательностей интервального разбиения  $x(t)^{\delta_k}$  рассчитывается совместный коэффициент корреляции Пирсона.

В результате, каждому интервальному разбиению исходных и сгенерированных потоков  $x(t)^{\delta_k}$  ставятся в соответствие параметры корреляции. Результат

сравнения параметров у исходных и сгенерированных потоков показывает наличие участков равновесного состояния процессов одинаковой длины  $k$  и говорит о близости исходных и сгенерированных, с помощью предложенной в работе модели генерации процессов. Сравнение аналогичных параметров интервальных разбиений произвольных процессов  $\hat{X}(t)_{var}$  и исходных процессов  $\hat{X}(t)_{sour}$  показывает, что данное свойство выполняется только для потоков с заданными характеристиками и может использоваться как один из вариантов проверки корректности предложенной модели генерации.

### **Формирование матрицы корреспонденций**

Одним из основных параметров имитационной модели сети траекторий должна быть матрица корреспонденций между ОП (ММК). Матрица отражает потоки между всеми ОП за заданный интервал времени -  $\mathbf{A}=\|a_{ij}\|$ ,  $i=1..m$ ,  $j=1..m$ , где  $a_{ij}$  - количество передвижений объектов из  $i$ -го в  $j$ -й ОП.

Алгоритм имитационной модели должен предусматривать разыгрывание остановки выхода для каждого поступившего объекта. Такая матрица может быть получена на основании известных векторов поступивших и покидающих потоков  $A_i, B_j$  на все ОП. При этом  $P = \sum_i A_i = \sum_j B_j$ .

Используем информационную модель пространственного представления корреспонденций в виде эллипсов рассеяния. В рамках ее расширения для формирования корреспонденций сети траекторий предлагается многополюсная параметризация пространства центров тяготения в виде рабочих зон (рис. 4а), каждая из которых представляются двумерным нормальным распределением

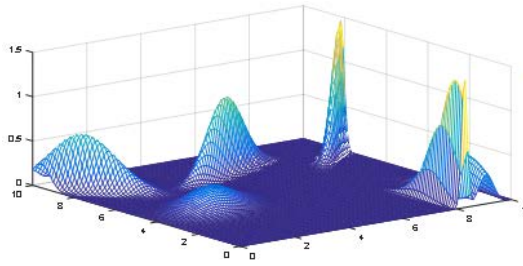
$$f(\mathbf{X}) = \frac{1}{(2\pi)^{n/2} |\mathbf{D}|^{1/2}} \times e^{-\frac{1}{2}(\mathbf{X} - \mathbf{m})^T \mathbf{D}^{-1}(\mathbf{X} - \mathbf{m})}, \quad (6)$$

где  $\mathbf{m}$  - вектор средних,  $n$  – размерность пространства, а  $\mathbf{D}$  - ковариационная матрица.

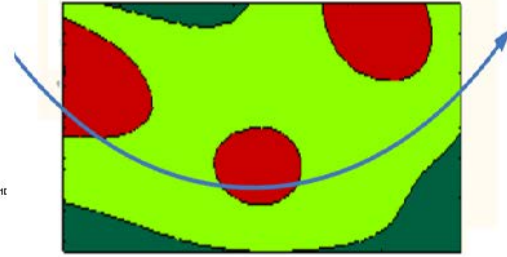
Далее строится композиция этих функций в виде линейной комбинации  $F(x) = a_0 + \sum_{i=1}^n a_i f_i(\mathbf{X})$ . Затем наносится линия, определяющая траекторию и строится функция от положений ОП на траектории, которая затем нормируется до значения  $P = \sum_i A_i = \sum_j B_j$  (рис. 4б). Предлагается использовать энтропийную модель подвижности:

$$-\sum_{i,j} x_{ij} \ln x_{ij} \rightarrow \max, \quad \sum_{j=1}^m x_{ij} = A_i, i=1..n, \quad \sum_{i=1}^n x_{ij} = B_j, j=1..m, \quad (7)$$

$$\frac{1}{P} \sum_{i,j} x_{ij} \cdot t_{ij} = t_c, \quad P = \sum_i A_i = \sum_j B_j. \quad (8)$$



а) центры притяжений



б) представление траектории

Рис. 4. Модель перераспределения выходов  $B_i$

Искомыми величинами являются корреспонденции  $x_{ij}$ , а величины  $A_i$ ,  $B_j$ ,  $P$ ,  $t_{ij}$ ,  $t_{cp}$  считаются заданными. В рамках решения задачи используется метод множителей Лагранжа, который сводится к нахождению максимума

$$L = -\sum_{i,j} x_{ij} \ln x_{ij} + \sum_j \beta_j \left( \sum_i x_{ij} - B_j \right) + \sum_i \alpha_i \left( \sum_j x_{ij} - A_i \right) + \gamma \left( \frac{1}{P} \sum_{i,j} x_{ij} t_{ij} - t \right), \quad (9)$$

где  $\alpha_i$ ,  $\beta_j$  и  $\gamma$  представляют неопределенные множители Лагранжа, а для всех частных производных  $L$  по  $x$  справедливо равенство  $\frac{\partial L}{\partial x_{ij}} = \ln x_{ij} - 1 + \beta_j + \alpha_i + \frac{\gamma}{P} t_{ij}$

или  $x_{ij} = \exp(1 - \alpha_i) \exp(-\beta_j) \exp\left(\frac{\gamma}{P} t_{ij}\right)$ .

**Таким образом, представлен алгоритм формирования матрицы корреспонденций, отличающийся многополюсной параметризацией пространства центров тяготения, обеспечивающий учет характеристик входных потоков объектов.**

#### *Имитационная модель обслуживания траектории*

На основе проведенного статистического анализа, разработанных моделей генерации потоков и матрицы корреспонденций, в работе поставлена и решена задача построения имитационной модели обслуживания траектории.

Моделирующий алгоритм включает следующие составляющие: алгоритм формирования модельного времени; подпрограммы событий, реализующие элементарные операторы; алгоритм выбора очередного класса одновременных событий (КОС); алгоритм генерации КОС. КОС определяет связность событий.

Имитационная модель позволяет оценить времена ожидания и перемещения объектов в соответствии с режимом выпуска контейнеров на траекторию, а также показатели комфортности передвижения объектов, объем перемещений на траектории и другие параметры, необходимые для оценки эффективности организации процесса перемещения объектов на траектории.

**В третьей главе** решаются задачи оценки влияния показателей организации перемещения интегральных контейнеров на характеристики качества обслуживания объектов, оптимизации графика движения интегральных контейнеров с возможностью перехода на комбинированные и укороченные схемы, а также выбора параметров и состава интегральных контейнеров для обслуживания набора траекторий.

#### *Задачи рационализации режимов перемещения интегральных контейнеров*

Решение поставленной в работе задачи выбора режимов организации пе-

ремещения интегральных контейнеров на траектории основывается на использовании аналитических моделей для выбора начальных значений параметров и последующего использования планов Плакета-Бермана и стохастической аппроксимацией для оптимизации начальных параметров.

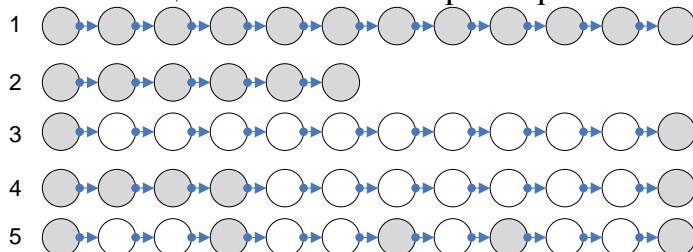


Рис. 5. Режимы перемещения интегральных контейнеров по траектории

В общем случае различают пять режимов перемещения интегральных контейнеров на траектории (рис. 5) 1) обычный (остановки на всех ОП); 2) укороченное сообщение; 3) экспрессный (без остановок от начального до конечного ОП); 4) полуэкспрессный; 5) скоростной (лишь на узловых ОП).

На практике более эффективным может явиться применение комбинации нескольких режимов перемещения интегральных контейнеров на траектории, что позволяет сочетать доступность обычного режима с экономичностью и эффективностью скоростного и экспрессного режимов.

#### **Формирование комбинированных траекторий**

Для решения задачи оптимизации комбинированной траектории предлагается использовать аналитическое выражение для времени ожидания на  $j$ -м ОП

$$T_j = T_j^Q + T_j^R - F_j \delta_j \frac{T_o (1 - k_j)}{T_o - \delta_j k_j} + Z. \quad (10)$$

которое согласуется с результатами имитационных экспериментов, и где

$$T_j^R = R_j \left[ (P_{отк j} + \frac{1}{2}) \frac{T_o (T_{об} - \delta_{oj})}{A(T_o - \delta_{oj} k_j)} + \frac{\sigma^2 A(T_o - \delta_{oj} k_j)}{2 T_o (T_{об} - \delta_{oj})} \right], \quad T_j^Q = Q_j \left[ (P_{отк j} + \frac{1}{2}) \frac{T_o}{A_j} + \frac{\sigma^2 A_j}{2 T_o} \right], \quad Q_j$$

- количество объектов с  $j$ -м ОП;  $R_j$  - количество объектов без  $j$ -го ОП;  $F_j$  - количество объектов, использовавших ОП  $j$ ;  $A$  - количество интегральных контейнеров;  $T_{об}$  - оборот интегрального контейнера с обычным режимом;  $\delta_j$  - средняя задержка на  $j$ -м ОП;  $\sigma$  - нерегулярность поступления интегральных контейнеров;  $P_{отк j}$  - вероятность отказа на  $j$ -м ОП в обслуживании;  $Z$  - затраты времени объектов, которые не определяются режимом перемещения интегральных контейнеров.

Задача заключается в оценке при перечисленных ограничениях значения  $k_j$  для минимизации времени  $T_j$ . Практика показала, что погрешность до 5% вполне допустима. При этом  $k_j$  варьируется в пределах от 0,05 до 0,95, а интервалы движения  $I_u$  содержатся в пределах от 5 до 15 мин. Показано, что при значениях, превышающих данный временной интервал, формирование комбинированного режима нерационально. В работе показано, что с увеличением исходного интервала движения интегральных контейнеров  $I_u$  область значений  $k_j \leq 0,8$ , соответствующая оптимальному применению комбинированных режимов движения интегральных контейнеров на траекториях, быстро уменьшается.

### **Укороченные траектории**

В качестве переменной используется доля интегральных контейнеров, останавливающихся на  $j$ -й ( $j=1, 2, \dots, n-1$ ) и всех предшествующих ей ОП траектории  $r_j$ . Наложим основные ограничения на переменную  $r_j$ . В соответствии с определением  $r$ , имеем  $0 \leq r_j \leq 1$  и  $r_j \leq r_{j+1}$ , откуда следует, что при получении первого же значения  $r_j=1$  укорачивание основной траектории следует прекратить. Суммарные затраты времени объектов  $T_j$  зависят от переменной  $r_j$ :

$$T_j = T_j^Q + T_j^R. \quad (11)$$

где  $T_j^R = R_{j(1)} \left[ \left( P_{o1} + \frac{1}{2} \right) \frac{T_o (T_o - \dot{f} r_j) + \frac{\sigma^2 A (T_o - \dot{f} r_j)}{2 T_o (T_o - \dot{f} r_j)} \right]$ ,  $T_j^Q = Q_{j(1)} \left[ \left( P_{o1} + \frac{1}{2} \right) \frac{T_o}{A_j} + \frac{\sigma^2 A}{2 T_o} \right]$ ,  $Q_{j(1)}$  - количество объектов с ОП от 1 до  $j$ -го (включительно);  $R_{j(1)}$  - количество объектов без ОП от 1 до  $j$ -го;  $T_{об}$  - оборот интегрального контейнера на основной траектории;  $\tau$  - средние затраты времени оборот интегрального контейнера на перемещение по одному отрезку траектории.

Проведённое аналитико-имитационное моделирование организации перемещения на укороченных траекториях показало, что для получения значений  $r_j < 1$  при любом значительном числе ОП основной траектории число объектов  $n$ , не пользующихся первой ОП  $R_{11}$ , обязано быть больше количества объектов не менее чем в 40-50 раз. В реальных условиях организация укороченных маршрутов целесообразна примерно для 10-20% городских автобусных маршрутов. При этом  $r_j$  обычно лежит в интервале:  $0,5 \leq r_j \leq 0,8$ .

Таким образом, совмещение аналитических моделей и моделей оптимизации на имитационной модели позволило повысить обоснованность решений по выбору эффективной организации режимов работы.

#### **Задача рационализации параметров интегральных контейнеров**

Решение задачи выбора параметров интегральных контейнеров для обслуживания траектории основывается на полученных методах оценки качества обслуживания. Основными критериями при решении данной задачи являются время ожидания обслуживания и расходы на содержание интегральных контейнеров, которые естественным образом вступают в компромисс.

Формальный аппарат решения сводится к многокритериальной постановке. Минимизировать необходимо как общее время ожидания  $T_{ож}^{общ}$  всех объектов выбранной траектории, так и затраты  $R_{АП}^{общ}$

$$T_{ож}^{общ} \rightarrow \min, \quad R_{АП}^{общ} \rightarrow \min. \quad (12)$$

Соотношение для среднего времени ожидания может быть представлено в виде  $T_{ож} = \frac{1}{2} + \frac{\sigma_I^2}{2 \cdot I} + P_{отк} I_{эф}$ , где  $I$  - плановый интервал передвижения интегральных контейнеров, мин.;  $\sigma_1$  - СКО планового интервала, мин.;  $I_{эф}$  - эффективный интервал движения  $I_{эф} = I + \frac{\sigma_I^2}{I}$ , мин.;  $P_{отк}$  - вероятность отказа в обслуживании.

Вероятность отказа используется  $P_{отк} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^\infty e^{-\frac{y^2}{2}} dy$ ,  $x = \frac{q + 0.5 - I \cdot \lambda}{\sqrt{I \cdot \lambda}}$ , где  $\lambda$  - средняя интенсивность потока объект./мин., а  $q$  - номинальная предельная

вместимость интегрального контейнера, объектов.

Одним из подходов к решению многокритериальной задачи (12) является формирование обобщенного аддитивного критерия, в котором вводятся эмпирические коэффициенты  $\alpha_T$  и  $\alpha_R$ , определяющие значимость соответствующих критериев  $K = \alpha_T T_{ож}^o + \alpha_R R_{АП}^o$ . Зависимость между  $T_{ож}^{общ}$  и  $R_{АП}^{общ}$  носит обратно пропорциональный характер и для различных значений коэффициентов  $\alpha_T$  и  $\alpha_R$  можно рассчитать значение обобщенного критерия  $K_{общ}$ , как функции количества автобусов на маршруте. Предлагается использовать совместно два типа модели, а именно, имитационную и аналитическую. Кроме того, приводя обобщенный критерий к финансовым единицам, можно положить коэффициент  $\alpha_R=0$ , и варьировать только коэффициентом  $\alpha_T$

$$F = C \cdot \sum_{i=1}^l \left[ t_i \left( \sum_{j=1}^m T_{ожji} \cdot S_{kj} \right) \right] + R_A^o \rightarrow \min, \quad (13)$$

где  $T_{ожji}$  - среднее время ожидания, а  $S_{ji}$  - интенсивность потоков на  $i$ -м интервале на  $j$ -й ОП,  $m$  - общее число ОП.

Ограничения накладываются на набор емкостей различных интегральных контейнеров  $\{V_i\}$ ,  $i=1..m$ ; минимальное и максимальное число интегральных контейнеров  $A_{min}$  и  $A_{max}$ ; количество интегральных контейнеров выбранной емкости; число интегральных контейнеров с минимальной емкостью  $W_{min}$ , наименьшей пропускной способностью траекторий и ОП  $\Omega_{min}$ .

Качество обслуживания определяется общей емкостью во всех интегральных контейнерах  $V = \sum_{i=1}^m A_i \omega_i$  в заданном интервале времени, причем оно должно быть не меньше среднего объема перемещений на наиболее напряженном участке за тот же интервал времени.

Получили задачу целочисленного программирования

$$\begin{aligned} & F(T_{ож}, R_{АП}) \rightarrow \min, \\ & \{V_i\}, i=1..m, V_i \in [V_{min}, V_{max}], \{A_i\}, i=1..m, A_i \in [A_{min}, A_{max}], \\ & \sum_{i=1}^m A_i V_i = V^o \geq \min \quad \lambda \cdot T_{ож} \cdot \sum_{i=1}^m A_i \leq \Omega_{min} \end{aligned} \quad (14)$$

где  $A_i$  - число интегральных контейнеров емкостью  $V_i$ ,  $V^{общ}$  - суммарная емкость, критерий  $F(T_{ож}, R_{АП})$  рассчитывается на основании соотношения (13).

Для решения данной задачи оптимизации в работе предложен эвристический алгоритм, в котором использовались методы целочисленного многокритериального поиска с использованием процедур оптимизации в MatLab.

**Таким образом, предложены методы рационализации режимов перемещения по кусочно-линейным траекториям и параметров интегральных контейнеров, отличающиеся учетом многообразия траекторий и конечных точек составляющих их отрезков и обеспечивающие повышение обоснованности решений по выбору эффективной организации режимов работы.**

**В четвертой главе** решается задача разработки структуры и элементов программной реализации проблемно-ориентированной системы управления эффективной работой транспортной сети на примере городской маршрутной

сети.

Предлагается инструментальная среда сборки и синхронизации параметризуемых приложений на основе разработанных механизмов условного перехода по завершению каждого программного приложения. Сценарий методики анализа и расчета представляет собой совокупность элементарных приложений (фрагментов) с заданием алгоритмической структуры и развязки по данным (рис. 6). Фрагмент имеет структуру:

$$F_i = (t_i, d_i, a_i, \alpha_i, s_i, r_i, p_i), \quad (15)$$

где  $t_i$  - тип фрагмента (информационный, расчетный, выбор и т.п.);  $d_i$  - уровень сложности;  $a_i$  - уровень доступа к фрагменту;  $\alpha_i$  - операция сравнения уровня доступа пользователя и уровня доступа фрагмента ( $\neq, <, \leq, =, \geq, >$ ),  $s_i$  - время принудительного окончания предъявления;  $r_i$  - подмножество признаков, связанных с данным фрагментом,  $p_i$  - параметризация при активации.

Все приложения объединяются в структурный элемент, который представляет  $S = \langle F_i, i=1..N, T \rangle$ , где  $F_i$  -  $i$ -й фрагмент;  $T$  - матрица смежности фрагментов. Кроме того, помимо разработанных программных компонентов в структуру включаются стандартные пакеты, для которых разработаны соответствующие компоненты интерфейсного взаимодействия, основанные на совместном использовании полученных в результате расчета OLE-объектов.

Для реализации запросов к статистической БД предлагается агрегативный подход с использованием OLAP-технологий. Исходная БД имеет большую размерность (1 год статистики потока - 100000000 записей). Из исходной БД агрегаты первого уровня формируются на SQL Server, второго - на MySQL, третьего - на Excel с использованием встроенных OLAP таблиц, для которых выполняется анализ и визуализация в различных математических пакетах (MatLab, MathCad Statistica и др).

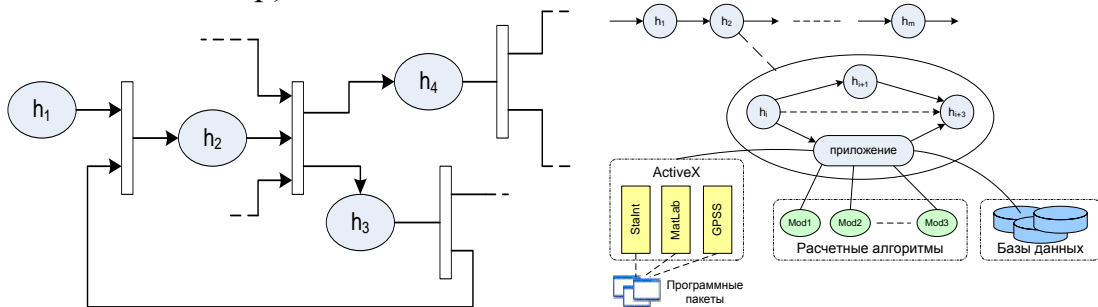
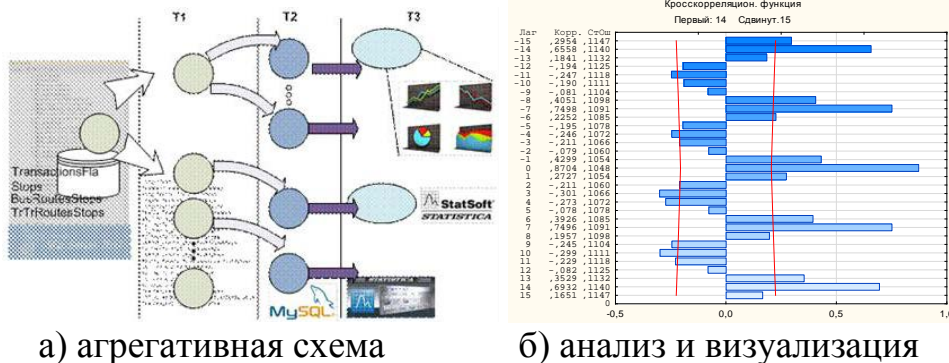


Рис. 6. Обобщенная структура взаимодействия программных приложений



а) агрегативная схема

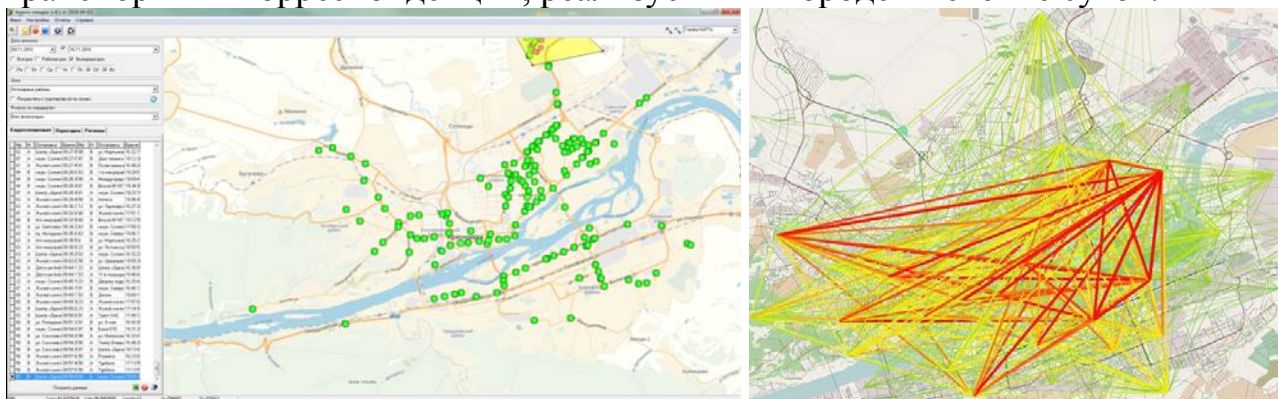
б) анализ и визуализация

Рис. 7. Агрегаты формирования запросов к статистической БД

Для оценки степени пересадочности разработан ряд запросов, по которым



сформирована совокупность таблиц. Список данных запросов и таблиц является основой для корректировки матрицы корреспонденций. На трудовые корреспонденции приходится порядка 60-70% поездок. Для представления результатов анализа запросов разработаны интерактивные формы (рис. 8а) и визуализация с помощью мультиграфа корреспонденций (рис. 8б). Мультиграф корреспонденций представляет из себя набор парных связей источник-цель всех транспортных корреспонденций, реализуемых в городе в течение суток.



а) Интерактивный режим

б) Мультиграф корреспонденций

Рис. 8. Представление данных в системе анализа

### ***Разработка сценария и программная реализация инструмента для моделирования маршрутной сети***

В работе осуществлена разработка сценария и программная реализация инструмента для моделирования маршрутной сети. Разработанные инструментальные средства включают конструкторы управляющих тестовых заданий (УТЗ), тестов и структурных элементов.

**Создана структура взаимодействия приложений проблемно-ориентированной системы управления эффективной работой маршрутной сети, отличающаяся использованием статистической базы данных и аналитико-имитационных моделей и обеспечивающая учет стохастических параметров потоков объектов при динамическом формировании комплекса кусочно-линейных траекторий.**

**В заключении** приведены основные результаты и выводы диссертационной работы.

### **ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ**

1. Проведен системный анализ проблем управления стохастическими потоками объектов в сети с кусочно-линейными траекториями с использованием интегральных контейнеров.

2. Созданы математические модели случайных временных рядов, характеризующих потоки объектов, с заданными корреляционными характеристиками.

3. Разработан алгоритм формирования матрицы корреспонденций, обеспечивающий учет характеристик входных потоков объектов и геоинформационных моделей их подвижности.

4. Создана имитационная модель управления потоками объектов в сети с кусочно-линейными траекториями с использованием интегральных контейнеров в виде сети массового обслуживания.

5. Разработаны методы рационализации режимов перемещения по кусоч-

но-линейным траекториям и параметров интегральных контейнеров.

6. Создана структура взаимодействия приложений и компоненты проблемно-ориентированной системы управления потоками объектов в сети с кусочно-линейными траекториями с использованием интегральных контейнеров.

7. Разработанные методы и модели используются в учебном процессе МАДИ и МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Полученные результаты могут найти применение в сфере управления многоуровневыми разветвленными транспортными системами. Направления дальнейших исследований заключаются в разработке новых подходов к учету динамически формируемых маршрутов.

### **Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:**

#### **Публикации в изданиях списка ВАК**

1. Ерошок И.Д., Еремин С.В., Новиков А.Н. Оптимизация режимов движения автобусов на городском маршруте // Мир транспорта и технологических машин - 2020. - № 1(68). - С. 87-93.

2. Ерошок И.Д., Балдин А.В., Еремин С.В., Новиков А.Н. Гибридная среда сборки разнородных приложений моделирования транспортных систем // Мир транспорта и технологических машин. - 2020. - № 2(69). - С. 47-55.

3. Ерошок И.Д., Балдин А.В. Алгоритм оптимизации состава автобусного парка на основе аналитической и имитационной моделей // Динамика сложных систем - XXI ВЕК - 2020. - № 1. - С. 55-64.

4. Ерошок И.Д., Балдин А.В. Модель генерации взаимосвязанных пассажиропотоков на остановочных пунктах с заданными автокорреляционными свойствами // Динамика сложных систем - XXI ВЕК - 2020. - № 1. - С. 71-78.

#### **Публикации в изданиях, индексируемых в Scopus**

5. Eroshok I., Baldin A., Burmistrov V. Various Processes Trough the Hidden Stable Dependencies. Journal of Engineering and Applied Sciences, 2019, vol. 14, no 2, pp. 348-355.

#### **Статьи и материалы конференций**

6. Ерошок И.Д., Гудимов Д.А., Стоянов П.Г. Сравнительный анализ методов идентификации отметок и фильтрации параметров траектории при сопровождении целей в помехах // Молодежный научно-технический вестник, 2013, №10, <http://ainsnt.ru/doc/620729.html>.

7. Ерошок И.Д., Балдин А.В. Цифровое моделирование практических задач на примере маршрутизации городской транспортной сети// Вестник науки, 2020, № 8(29), с. 26-45.

8. Ерошок И.Д., Балдин А.В. Оптимизация состава автобусного парка для обслуживания маршрута// Высокие технологии и инновации в науке. Сб. избранных статей Междунар. науч. конф. СПб., 2020. С. 105-113.

9. Балдин А.В., Ерошок И.Д. Открытая гибридная система поддержки принятия решений моделирования транспортных систем// Технические науки: проблемы и решения: сб. ст. по матер. XXXVIII междунар. НПК. - № 7(35). - М.: Интернаука, 2020. С. 57-70.