

*На правах рукописи*



**Цейтлина Татьяна Олеговна**

**МЕТОД ДОЛГОСРОЧНОГО ПРОГНОЗИРОВАНИЯ РАЗВИТИЯ СЕТИ  
ВНУТРИРОССИЙСКИХ МАГИСТРАЛЬНЫХ АВИАЛИНИЙ  
НА ОСНОВЕ ТЕХНОЛОГИЙ НЕЧЁТКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ И  
НЕЙРОСЕТЕВОГО ПРОГРАММИРОВАНИЯ**

Специальность 05.13.01 – «Системный анализ, управление и обработка информации  
(авиационная и ракетно-космическая техника)»

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание учёной степени  
кандидата технических наук

Москва – 2015

Работа выполнена в Федеральном государственном унитарном предприятии «Центральный аэрогидродинамический институт имени профессора Н.Е. Жуковского» (ФГУП «ЦАГИ»)

**Научный руководитель** кандидат технических наук, доцент  
**Смирнов Андрей Валентинович**

**Официальные оппоненты:** **Кузнецов Валерий Леонидович**,  
доктор технических наук, профессор,  
ФГБОУ ВПО «Московский государственный  
технический университет гражданской авиации»  
(МГТУ ГА), заведующий кафедрой прикладной  
математики

**Тюменцев Юрий Владимирович**,  
кандидат технических наук, доцент,  
ФГБОУ ВПО «Московский авиационный институт  
(национальный исследовательский университет)»  
(МАИ), ведущий научный сотрудник

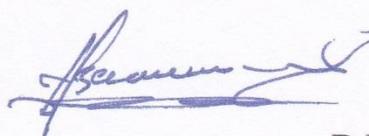
**Ведущая организация** Федеральное государственное унитарное  
предприятие «Государственный научно-  
исследовательский институт гражданской авиации»  
(ФГУП ГосНИИ ГА)

Защита диссертации состоится “11” июня 2015 года в 11<sup>00</sup> часов на  
заседании диссертационного совета Д 212.125.12 при ФГБОУ ВПО «Московский  
авиационный институт (национальный исследовательский университет)» по адресу:  
125993, г. Москва, А-80, ГСП-3, Волоколамское ш., д. 4, Учёный совет МАИ.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте МАИ по ссылке:  
<http://www.mai.ru/events/defence/>

Автореферат разослан “ \_\_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 2015 г.

Учёный секретарь  
диссертационного совета Д 212.125.12,  
кандидат технических наук, доцент



В.В. Дарнопых

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Объект и предмет исследования

Объектом исследования является сеть внутрироссийских магистральных авиалиний. Рассматриваются аэропорты России и соединяющие их авиалинии. Предметом исследования являются процессы трансформации сети внутрироссийских магистральных авиалиний, а также факторы, определяющие будущее развитие этой сети.

### Актуальность работы

Прогнозирование развития сети авиалиний является одной из актуальных задач в области исследования авиатранспортной системы страны. В 70 – 80-е гг. в СССР проводились разнообразные работы по исследованию и прогнозированию развития его авиатранспортной системы. Наиболее известными из них являются исследования, проводившиеся в ГосНИИ ГА, – это работы Р.В. Сакача, Е.Г. Пинаева, Е.Ф. Косиченко, Б.Е. Лужанского, В.П. Кошкина, И.А. Самойлова, А.А. Соколова, М.А. Курилец. Значительный вклад в решение задач прогнозирования перевозок пассажиров на воздушном транспорте внесли А.М. Андронов, А.Н. Хижняк, И.Е. Швацкий, А.А. Фридлянд. Среди работ последнего времени можно отметить работы В.П. Алексеева, Б.В. Артамонова, В.В. Балашова, Б.Х. Давидсона, А.В. Климина, В.В. Клочкова, С.К. Колпакова, Г.А. Павловца, И.А. Самойлова, В.И. Самойлова, Н.А. Селивановой, А.В. Смирнова, О.Ю. Страдомского, А.Ю. Уджуху.

Зарубежные исследования, посвящённые анализу развития структуры авиатранспортных систем, сосредоточены на изучении топологических и метрических свойств маршрутных сетей (аэропортов и связей между ними). Это работы Ф. Ван, Ц. Ван, В.-Б. Ду, Я. Лю, С. Ма, М.Ф. Тимберлейк, К.-Ц. Цай, С.-Б. Цао, Ф. Цзинь, Ц. Чжан, К. Баттон, Г. Бюргхауvt, А.Р. Гётц, С.Дж. Саттон, Й. Хакфорт и др. В методиках прогнозирования рынка воздушных судов (ВС) зарубежных производителей авиационной техники (Airbus и Boeing) методы прогнозирования развития сети авиалиний занимают значительное место, поскольку от них зависит качество и обоснованность прогнозов.

Обеспечение конкурентоспособности отечественной авиационной техники требует создания новых эффективных технологий. Оценка эффективности разрабатываемых технологий должна выполняться с учётом тенденций и темпов развития авиаперевозок. Нужны такие модели, которые позволят сформировать сценарии развития авиаперевозок,

спрогнозировать интенсивность движения самолётов различных классов на сети авиалиний.

Основной проблемой при решении многих задач в области исследования и прогнозирования пассажирских авиаперевозок является проблема прогнозирования пассажиропотоков. Анализ работ, посвящённых этой проблеме, позволяет предположить, что процесс развития пассажиропотоков и процесс развития сети авиалиний несколько отличаются друг от друга: авиалинии и пассажиропотоки определяются разными (как по составу, так и по количеству) измеряемыми параметрами и, по-видимому, описываются разными функциональными зависимостями. Возможно, это и затрудняет создание модели для прогнозирования пассажиропотоков, учитывающей динамику развития сети. Для устранения этой проблемы задачу прогнозирования пассажиропотоков необходимо решать в два этапа. На первом этапе решать задачу прогнозирования развития сети авиалиний (без пассажиропотоков). А на втором этапе – задачу распределения прогнозного спроса на пассажирские авиаперевозки по авиалиниям сформированной сети.

В настоящей работе рассматривается решение задачи только первого этапа: решается вопрос о существовании либо отсутствии авиалиний. Используется эмпирический метод наряду с современными вычислительными технологиями (нейросетевое программирование и нечёткое моделирование), которые позволяют значительно расширить число переменных и не задавать для них вид функциональной зависимости.

### **Цель и задачи диссертационной работы**

Целью работы является повышение качества и обоснованности долгосрочного прогнозирования развития пассажирских авиаперевозок. Для достижения этой цели на этапе прогнозирования развития сети внутрироссийских магистральных авиалиний в диссертации были поставлены следующие научные задачи:

1. провести анализ принципов формирования существующей сети внутрироссийских магистральных авиалиний;
2. выявить переменные, определяющие наличие или отсутствие прямого авиасообщения между двумя городами/аэропортами;
3. построить модель «условий существования» прямого авиасообщения между городами/аэропортами рассматриваемой сети;
4. провести анализ полученной модели и определить границы её применимости;

5. построить прогноз развития сети внутрироссийских магистральных авиалиний на основе данных социально-экономических и демографических прогнозов развития страны.

### **Методы исследования**

В диссертационной работе использовались методы системного анализа, теории сложных сетей, нечёткой логики, нечёткого моделирования, нейросетевого моделирования, компьютерного моделирования.

**Достоверность результатов**, полученных в диссертационной работе, подтверждается использованием аппаратов математической статистики; адекватностью разработанной информационной модели на данных, не использованных при её создании; непротиворечивостью полученных результатов с существующими представлениями о функционировании и развитии авиатранспортных сетей.

**Научная новизна результатов исследования** состоит в применении методов системного анализа, нечёткой логики и нейросетевого моделирования для исследования закономерностей построения и долгосрочного прогнозирования развития сети внутрироссийских магистральных авиалиний. На защиту выносятся следующие результаты, определяющие новизну и научную значимость исследования (*в скобках указаны соответствующие пункты паспорта специальности 05.13.01*):

1. Новый подход к решению задачи прогнозирования развития сети магистральных авиалиний. В основе подхода лежит гипотеза о том, что существование прямого авиасообщения между городами определяется набором универсальных правил, не зависящих явно от времени и не привязанных к конкретной паре городов. В отличие от традиционных подходов, использующих трендовые, регрессионные или эмпирические модели, для решения рассматриваемой задачи выбран подход «чёрного ящика» (*пп. 2, 4*).
2. Закономерности развития сети внутрироссийских магистральных авиалиний, выявленные на основе анализа развития сети как сложной системы. Сеть авиалиний обладает основными свойствами, характерными для безмасштабных графов, процесс её развития происходит в соответствии с механизмами предпочтительного присоединения и ассортативности (*пп. 8, 12*).

3. Модель условий существования авиалинии, созданная как система нечёткого вывода. Основу модели составляют нечёткие правила, определяющие наличие или отсутствие прямого авиасообщения между городами России. Модель создана с помощью нейросетевых технологий на основе статистических данных о параметрах городов, пар городов и наличии прямого авиасообщения между ними (*п. 3*).
4. Метод долгосрочного прогнозирования развития сети внутрироссийских магистральных авиалиний, учитывающий возможные изменения социально-экономических параметров регионов страны и целевые параметры развития инфраструктуры наземного и воздушного транспорта. Метод предназначен для моделирования развития коммуникационного ядра сети на основе прогнозных значений параметров городов и пар городов (*пп. 3, 11*).

### **Практическая значимость**

Диссертация обладает практической значимостью. В работе разработан метод долгосрочного прогнозирования развития сети магистральных авиалиний, осуществлён прогноз развития структуры сети внутрироссийских магистральных авиалиний к 2020 г. для трёх сценариев социально-экономического развития страны (инерционного, энерго-сырьевого и инновационного). Полученные результаты (в совокупности с прогнозированием уровней пассажиропотоков на прогнозной сети авиалиний) позволяют эффективно решать ряд прикладных задач в области исследования перспектив развития гражданской авиационной техники, в частности:

- оценка эффективности новых авиационных технологий;
- формирование рациональных технических требований к перспективным ВС;
- сравнительный анализ различных концепций перспективных ВС;
- прогнозирование потребного парка ВС.

### **Апробация работы**

Результаты и основные положения диссертационной работы докладывались автором и обсуждались на: 9 и 10-й международных научно-технических конференциях «Research and Education in Aircraft Design (READ)» (Варшава, 2010 г., Брно, 2012 г.); XVII и XVIII международных молодёжных научных конференциях «Туполевские чтения» (Казань, 2009, 2010 гг.); IV международной молодёжной научной конференции «Гражданская

авиация: XXI век» (Ульяновск, 2012 г.); 45, 46, 47 и 49-х Научных чтениях памяти К.Э. Циолковского (Калуга, 2010-2012, 2014 гг.); VII Московской международной конференции по исследованию операций (ORM'2013) (Москва, 2013 г.).

## **Публикации**

Основные результаты диссертационной работы опубликованы в пятнадцати работах: четыре статьи [1-4] в журналах, входящих в Перечень ВАК РФ, одна статья [5] в зарубежном издании, индексируемом в базе данных Scopus, и десять работ [6-15] в трудах и сборниках материалов научных конференций.

## **Структура и объём диссертации**

Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка сокращений и условных обозначений, списка литературы. Содержание работы изложено на 133 машинописных страницах, включая 67 рисунков и 31 таблицу. Список литературы включает 81 наименование.

## **СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

Во **введении** обоснована актуальность исследования, сформулированы цели и задачи диссертации, описана структура работы, перечислены полученные в диссертации новые результаты.

### **Глава 1. Анализ сети магистральных авиалиний России**

Проанализировано развитие сети с 1992 по 2008 гг.; выявлены принципы построения и развития сети – показано, что авиатранспортная сеть России по своей структуре близка к безмасштабной сети (имеет основные свойства, характерные для безмасштабных сетей), а процесс её развития происходит в соответствии с закономерностями, свойственными безмасштабным графам – механизмами предпочтительного присоединения и ассортативности; проведена классификация авиалиний и определены этапы их развития.

#### **1.1 Тенденции развития сети магистральных авиалиний России**

На основе расписаний полётов ВС, ежегодно формируемых Центром расписаний и тарифов Федерального агентства воздушного транспорта РФ, был проведён анализ тенденций развития сети внутрироссийских магистральных авиалиний за период с 1992 по 2008 гг. В рассматриваемом периоде отмечено постоянное обновление сети, это указывает

на то, что в структуре сети в каждый определённый момент времени присутствуют авиалинии, находящиеся на промежуточных стадиях развития – «исчезающие» и «появляющиеся». Период после 2000 г. характеризуется устойчивым ростом показателей авиаперевозок, развитие сети в этом периоде происходит в соответствии с установившимися новыми тенденциями, которые могут быть использованы при прогнозировании развития сети на последующие 10-15 лет (при сохранении сложившейся политической и экономической ситуации в стране). Дальнейшие исследования осуществлены на основе данных 2006 г. Рассматривается сеть из 123 городов, в которых расположены аэропорты, участвующие в магистральных авиаперевозках.

## 1.2 Безмасштабная природа сети магистральных авиалиний России

Показано, что сеть внутрироссийских магистральных авиалиний обладает свойствами, характерными для безмасштабных сетей (scale-free network), а именно, имеет степенное распределение связей между узлами сети (показатель степени  $n$  принимает значение между 2 и 3) (рис.1), концентратороподобное ядро (семь городов) и малый диаметр сети (четыре, т.е. кратчайший путь между любыми городами сети не превышает трёх перелётов).

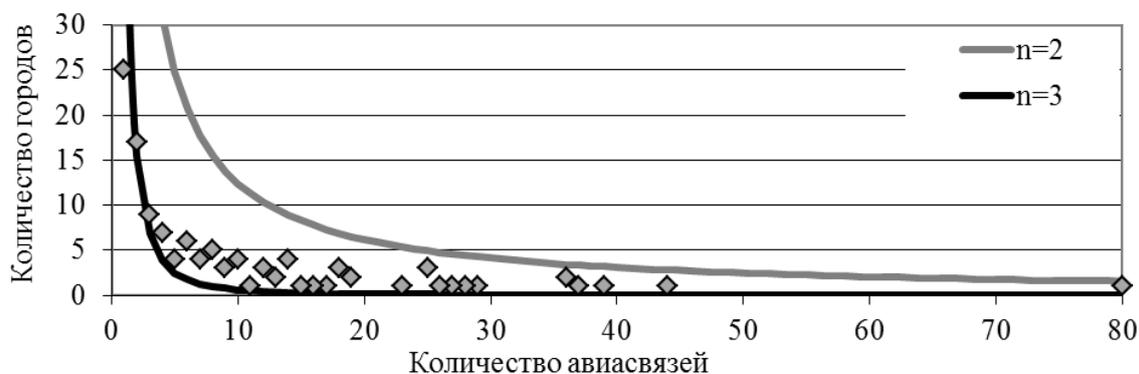


Рис. 1 – Степенной закон распределения количества городов по количеству авиасвязей для сети внутрироссийских магистральных авиалиний

## 1.3 Классификация и этапы развития магистральных авиалиний России

Для понимания процессов эволюции авиалинии во времени была проведена классификация внутрироссийских магистральных авиалиний и выделены этапы, характерные для развития авиалиний различного типа. Проанализированы авиалинии, на которых, согласно расписанию движения ВС, была осуществлена навигация в течение 2006 года хотя бы однажды. Авиалинии по преобладающей составляющей

пассажиропотока («сезонной» или «круглогодичной») разделены на *сезонные* и *круглогодичные*. К *эпизодическим* отнесены авиалинии, имеющие период навигации менее 13 недель. Для каждой авиалинии на основе данных о навигационном периоде авиалинии, суммарном количестве дней в году, когда осуществляются полёты на авиалинии, и о суммарном количестве рейсов на авиалинии за год были сформированы показатели состояния авиалинии в течение года: *средняя регулярность* – осреднённое за год количество дней в неделю, когда осуществляются полёты на авиалинии и *средняя интенсивность* – осреднённое за год количество рейсов в неделю. Авиалинии классифицированы по месту расположения в пространстве трёх показателей состояния в течение года (рис. 2).

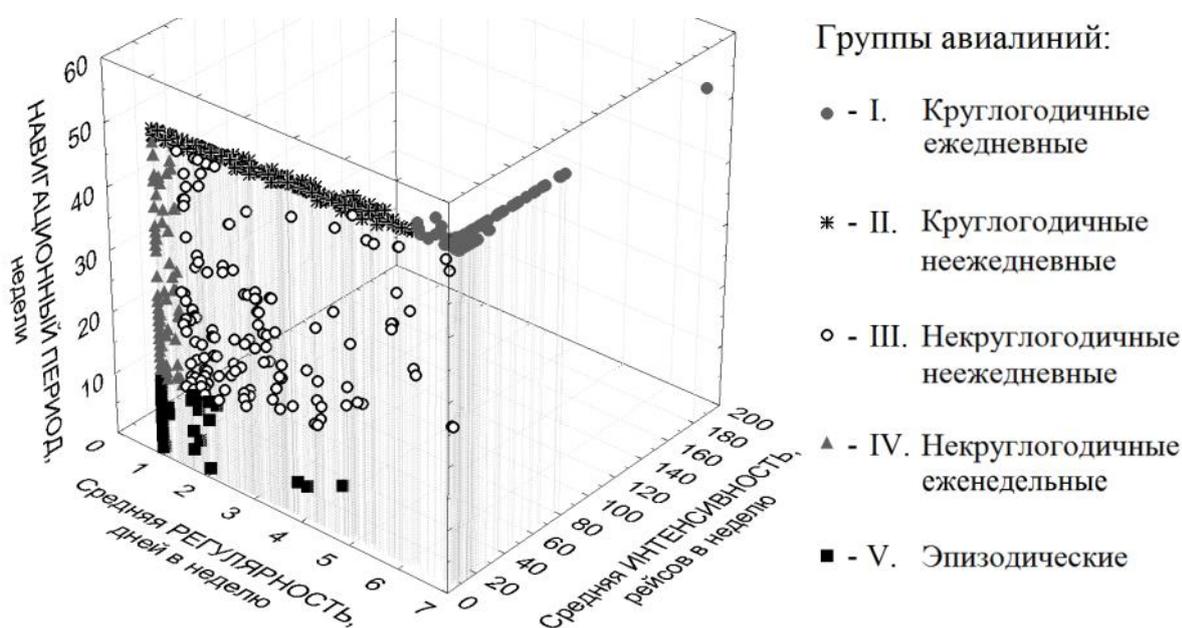


Рис. 2 – Авиалинии в пространстве показателей состояния в течение года

Отмечено, что одновременно в структуре сети присутствуют авиалинии, находящиеся на разных этапах развития. Присутствие авиалинии (прямого авиасообщения между городами) в структуре сети не может быть определено однозначно без учёта этапа её развития. При разработке метода необходимо использовать нечёткое понятие «авиалиния существует».

## Глава 2. Задача прогнозирования развития сети внутрироссийских магистральных авиалиний

Решение данной задачи позволит дать ответ на вопрос о будущем составе сети – определить те пары городов, которые в будущем будут связаны прямым авиационным

сообщением (авиалинией). В основе предлагаемого подхода лежит гипотеза о том, что *существуют универсальные* (не зависящие явно от времени и не привязанные к конкретной паре городов) *правила, определяющие существование авиалинии* (прямого авиасообщения между двумя городами) *или её отсутствие в зависимости от характерного только для данной пары городов сочетания значений ограниченного количества измеряемых переменных*. Далее эти правила будут называться «условиями существования» авиалинии (УСА). Выявление таких универсальных правил позволит ответить на вопрос о существовании данной авиалинии при изменении значений переменных в будущем. Перебор всех пар городов, имеющих аэропорты из состава магистральной сети, позволит сделать вывод об изменении структуры сети в будущем.

Для решения поставленной задачи предлагается разработать *информационную модель* УСА методом «чёрного ящика» на основе доступных статистических данных о расписаниях полётов ВС и об одновременно наблюдаемых переменных для пар городов. Важным преимуществом информационных моделей перед математическими является отсутствие ограничений на сложность (например, нелинейный характер или многомерность) исследуемой связи, а также способность информационной модели сохранять свою адекватность в условиях неопределённости – в случаях нечёткости или неточных значений измеряемых переменных. При разработке информационной модели определяющую роль играет правильный выбор состава и качество содержания исходной информации.

## 2.1 Формализация понятия «авиалиния существует»

Для задания значений выходной переменной модели УСА выполнена формализация нечёткого понятия «авиалиния существует». Для этого на основе информации о движении ВС с 2005 по 2007 гг. для каждой авиалинии были подготовлены данные о суммарном количестве вылетов ВС в 2005, 2006 и 2007 гг., было определено количество лет из трёх, в которых данная авиалиния присутствует. Стабильность состояния авиалинии в течение рассматриваемых трёх лет оценена углом  $\alpha$ , вычисляемым по формуле

$$\cos \alpha = \cos(\vec{a} \wedge \vec{b}) = \frac{\vec{a} \times \vec{b}}{|\vec{a}| \times |\vec{b}|} = \frac{1 \cdot x_{2005} + 1 \cdot x_{2006} + 1 \cdot x_{2007}}{\sqrt{1^2 + 1^2 + 1^2} \times \sqrt{x_{2005}^2 + x_{2006}^2 + x_{2007}^2}}, \quad \text{где вектор}$$

$\vec{a}(1; 1; 1)$  соответствует стабильной авиалинии (с неизменным суммарным количеством

вылетов ВС за год в течение трёх лет), а вектор  $\vec{b}(x_{2005}; x_{2006}; x_{2007})$  соответствует рассматриваемой авиалинии, где  $x_{2005}$ ,  $x_{2006}$  и  $x_{2007}$  – суммарное количество вылетов ВС на авиалинии за соответствующий год. Значение выходной переменной  $y$  для каждой авиалинии определено по количеству лет наличия авиасвязи, а в случае наличия авиасвязи во всех трёх годах – по принадлежности к одному из диапазонов значений угла  $\alpha$  (табл. 1)

Табл. 1 – Определение значения выходной переменной  $y$

Кол-во лет наличия авиасвязи	Диапазон значений угла $\alpha$	Значение выходной переменной $y$	Интерпретация значения $y$
3 года	$[0^\circ \div 10^\circ)$	1	«Существующая» авиалиния
	$[10^\circ \div 20^\circ)$	0.9	
	$[20^\circ \div 35^\circ)$	0.8	
2 года	$[35^\circ \div 55^\circ)$	0.6	«Несуществующая» авиалиния
1 год	$[55^\circ \div 90^\circ)$	0.4	
0 лет	$[90^\circ]$	0	

На основе данных табл. 1 сформирована кусочно-постоянная *функция принадлежности* выходной переменной  $y$ . Принято авиалинии, имеющие значение выходной переменной  $< 0.5$ , интерпретировать как «несуществующие». Авиалинии, имеющие значение выходной переменной  $\geq 0.5$ , интерпретировать как «существующие». Предложенный способ формализации понятия «авиалиния существует» позволяет учесть стабильность состояния, направление и темп развития авиасвязи, подойти обоснованно и взвешено к заданию значения выходной переменной  $y$  и повысить качество модели УСА.

## 2.2 Параметры, определяющие существование прямого авиасообщения между городами

Проблеме исследования и прогнозирования спроса на пассажирские авиаперевозки на протяжении последних трёх десятилетий в ряде организаций, и в первую очередь в ГосНИИ ГА, был посвящён ряд исследований, рассматривающих влияние различных факторов на показатели пассажирских авиаперевозок. Анализ этих исследований показал, что процессы, происходящие как внутри авиатранспортной системы, так и во внешней среде, могут быть охарактеризованы системой нескольких факторов, выраженных через значительно большее (по сравнению с количеством факторов) число измеряемых переменных.

Современный уровень развития информационных технологий позволяет работать с большими по объёму и составу массивами исходных данных, чем это было возможно 20-30 лет назад, а также – с неполными и нечёткими данными. На основе опыта исследований последних трёх десятилетий, а также проведённого анализа тенденций развития и принципов построения современной сети (глава 1) в работе к рассмотрению предлагается следующая система факторов, определяющих условия существования авиалинии: «генерационные возможности города», «целевой потенциал города», «возможности транспортной инфраструктуры пары городов». Факторы предлагается выразить через измеряемые параметры следующим образом:

- «генерационные возможности города» (Г) через – *численность населения, отнесённую к данному городу, и отнесённый к данному городу валовой региональный продукт, пересчитанный в соответствии с прожиточным минимумом (ВРП')*;
- «целевой потенциал города» (Ц) через – *статус города и число мест коллективного размещения*, отнесённое к данному городу;
- «возможности транспортной инфраструктуры пары городов» (И) через – *наличие железнодорожного (ж.-д.) сообщения между двумя данными городами и потенциал авиасвязи (определяемый по типам отправляемых/ принимаемых ВС)*.

На основе доступных данных государственной статистики за 2006 год подготовлена база значений измеряемых параметров для 123 городов, а также 6871 пары из этой совокупности городов.

### **2.3 Методы и программные технологии для реализации модели «условий существования» авиалинии**

Измеряемые параметры носят статистический характер и могут быть неточны. Само понятие «существование авиалинии» имеет нечёткий характер, а определение значений выходной переменной модели УСА основано на приблизительных оценках статистических данных об авиаперевозках. Кроме того, процесс формирования модели УСА характеризуется следующими аспектами неопределённости: неопределённость состава входных переменных модели УСА; неопределённость значений этих переменных в прогнозируемом периоде; неопределённость правил, на основании которых делается вывод о существовании или отсутствии авиалинии. Указанные особенности процесса

формирования модели УСА определяют необходимость использования технологии *нечёткого моделирования*.

Неопределённость правил (условий существования авиалинии) делает невозможным непосредственное применение процедур системы нечёткого вывода. Определить набор правил можно на основе имеющихся исходных данных в процессе генерации структуры и обучения *нейронной сети* (НС) в рамках *адаптивной системы нейро-нечёткого вывода* (ANFIS). Для реализации модели УСА как информационной модели выбрана технология нечёткого нейросетевого программирования. Используются программные средства среды программирования MatLab.

### **Глава 3. Разработка нечёткой нейросетевой модели «условий существования» авиалинии**

Последовательность процесса разработки нечёткой нейросетевой модели УСА, как и любой нейросетевой модели, включает следующие основные этапы: формирование обучающей выборки, генерацию структуры и обучение НС, анализ точности и адекватности построенной НС. Способность НС к обобщению определяется: размером обучающей выборки, её представительностью, архитектурой НС и физической сложностью рассматриваемой задачи. Важнейшим этапом разработки НС является этап её обучения.

#### **3.1 Формирование обучающей выборки**

Качество процесса обучения и, следовательно, качество нейросетевой модели в значительной степени определяется информативностью обучающей выборки, которая формируется в результате целенаправленного отбора элементов из общей совокупности исходных данных. Под *информативностью обучающей выборки* понимается совокупность следующих свойств: сохранение информации, содержащейся в исходных данных, посредством включения в обучающую выборку разнообразных элементов, в том числе статистически редко встречающихся в исходных данных; равномерность распределения элементов обучающей выборки в пространстве признаков, позволяющая выровнять влияние всех элементов обучающей выборки на процесс обучения. При формировании обучающей выборки необходимо определиться как с числом и составом входных переменных модели, так и с составом элементов обучающей выборки. Число входных переменных определяет сложность архитектуры НС. Состав входных переменных, а также

состав элементов обучающей выборки определяют качество обучения НС и, соответственно, её обобщающие свойства.

В работе рассмотрены четыре варианта формирования состава входных переменных модели вида  $(I, \Gamma', \Psi')$ , где  $\Gamma'$ ,  $\Psi'$  – генерационные возможности и целевой потенциал, характеризующие пару городов А и Б. Рассматриваемые варианты отличаются друг от друга только способом формирования пары  $(\Gamma', \Psi')$ :

1.  $(\Gamma_A + \Gamma_B, \Psi_A + \Psi_B)$ ,
2.  $(\Gamma_A \cdot \Gamma_B, \Psi_A \cdot \Psi_B)$ ,
3.  $(\Gamma_{\max \Gamma(A,B)}, \Psi_{\min \Gamma(A,B)})$ ,
4.  $(\Gamma_{\min \Psi(A,B)}, \Psi_{\max \Psi(A,B)})$ ,

где  $\max \Phi(A,B)$  – город с наибольшим значение фактора  $\Phi$  в паре городов А,Б. Для каждого варианта разработаны предварительные модели. Исходя из результатов моделирования существующих и несуществующих авиалиний, в качестве наиболее перспективного варианта выбран вариант 4. Далее город с наибольшим целевым потенциалом ( $\max \Psi(A,B)$ ) будет называться *главным* городом.

Исходное множество обучающих данных состоит из 6963 элементов (в 92 парах городов (из 6871) не удалось определить главный город, для этих пар рассматриваются авиалинии в обоих направлениях). Для формирования обучающей выборки и её оценки в работе используется программный инструмент «самоорганизующейся карты Кохонена» (Self-organizing map), реализованный в системе STATISTICA. Использование этого инструмента позволяет сформировать «обучающую» выборку (для построения (обучения) НС), содержащую сравнительно небольшое количество элементов обучающих данных (564 из 6963), но сохраняющую информативность и кластерную структуру исходного множества обучающих данных. Остальные элементы распределены между «тестовой» (3222) и «проверочной» (3177) выборками.

### **3.2 Построение нейросетевой модели**

Модель УСА реализована с помощью нечёткой нейронной продукционной сети типа ANFIS (сеть Такаги-Сугэно-Канга). При создании структуры гибридной системы нечёткого вывода используется процедура субтрактивной кластеризации (Sub. clustering), которая позволяет создать достаточно компактную структуру НС, требующую приемлемых вычислительных ресурсов. В результате варьирования параметров

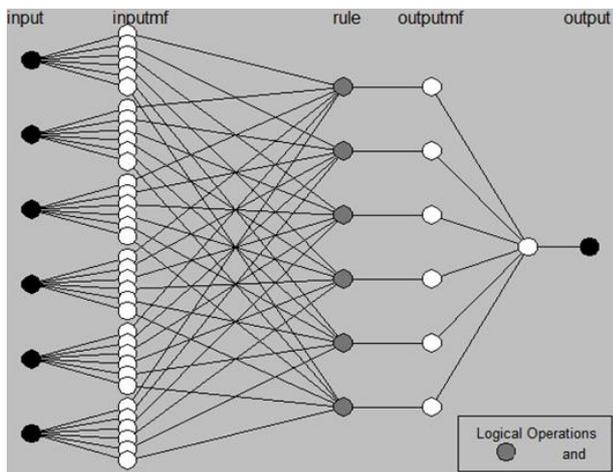


Рис. 3 – Структура НС для модели УСА

субтрактивной кластеризации получены НС различной структуры. Наименьшая ошибка моделирования исходного множества обучающих данных получена для НС с 6 нейронами в скрытом слое, что соответствует 6 нечётким правилам системы нечёткого вывода (рис. 3). Правила имеют вид «ЕСЛИ *предпосылка*, ТО *заключение*», где предпосылка правила является нечётким высказыванием, а заключение – чётким значением, заданным функцией.

Математически модель УСА можно представить следующим образом. Пусть  $X = (x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6)$  – вектор входных нормированных переменных, где  $x_1$  – потенциал авиасвязи пары городов;  $x_2$  – наличие ж.-д. сообщения;  $x_3$  – ВРП субъекта РФ неглавного города;  $x_4$  – численность населения, отнесённого к неглавному городу;  $x_5$  – число мест коллективного размещения, отнесённое к главному городу;  $x_6$  – статус главного города,  $y$  – результат нечёткого вывода (значение выходной переменной). Тогда зависимость  $y = f(X)$ , задаваемая системой нечёткого вывода типа Сугэно, имеет следующий вид:

$$y(X) = \sum_{j=1}^6 \left( \frac{\prod_{i=1}^6 \exp\left(-\frac{1}{2} \left(\frac{x_i - c_{ji}}{\sigma_{ji}}\right)^2\right)}{\sum_{k=1}^6 \prod_{i=1}^6 \exp\left(-\frac{1}{2} \left(\frac{x_i - c_{ki}}{\sigma_{ki}}\right)^2\right)} \times (b_{j0} + \sum_{i=1}^6 b_{ji} x_i) \right),$$

где  $j$  – номер правила,  $i$  – номер входной переменной,  $c_{ji}$  и  $\sigma_{ji}$  – параметры субтрактивной кластеризации,  $b_{ji}$  – коэффициенты нечёткой НС, настраиваемые в процессе её обучения.

Определены лингвистические значения факторов, определяющих существование прямого авиасообщения между городами. С их помощью дана содержательная интерпретация предпосылок правил (рис. 4, цифрой указан номер правила, стрелкой показано направление авиасвязи в главный город). Проанализировано расположение в проекции факторного пространства пар городов полностью удовлетворяющих предпосылке какого-либо правила. Отмечено,

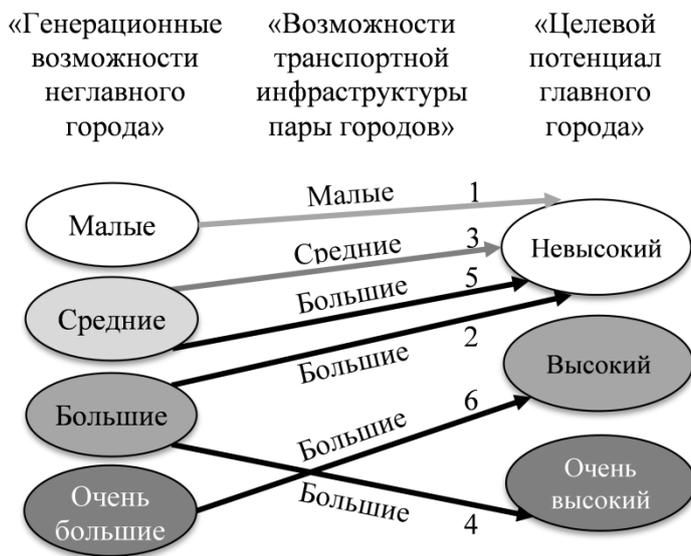


Рис. 4 – Предпосылки нечётких правил

что пары городов сгруппированы в факторном пространстве, а соответствующие им значения выходной переменной располагаются в некотором диапазоне (диапазоны могут пересекаться). Фактически результат нечёткого вывода отражает степень существования авиалинии и может быть интерпретирован представленным на рис. 5 образом.

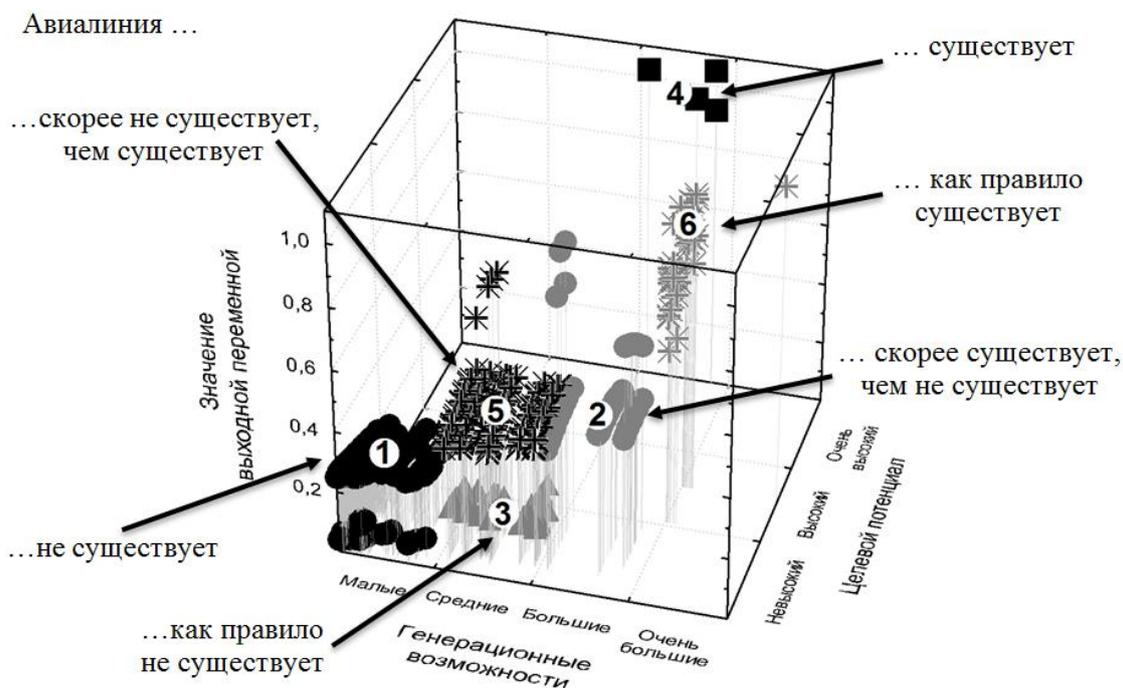


Рис. 5 – Содержательная интерпретация результата нечёткого вывода по каждому из правил

### 3.3 Точность и адекватность модели

Анализ результатов моделирования показал, что имеется диапазон значений выходной переменной, при которых авиалиния моделируется неоднозначно, – так называемая *зона нечувствительности модели*. Для сформированной модели УСА эта зона определена как диапазон значений выходной переменной (0.3; 0.7] (на рис. 6 он выделен серым цветом). В

него попадают 32% авиалиний (2239) от общего числа (6963). Среди оставшихся авиалиний (4724) правильно моделируются 83% существующих и 96% несуществующих в 2006 г. авиалиний. На правильно моделируемые авиалинии приходится 90% годового пассажиропотока. Следовательно, модель УСА адекватно отражает структуру коммуникационного ядра рассматриваемой сети.

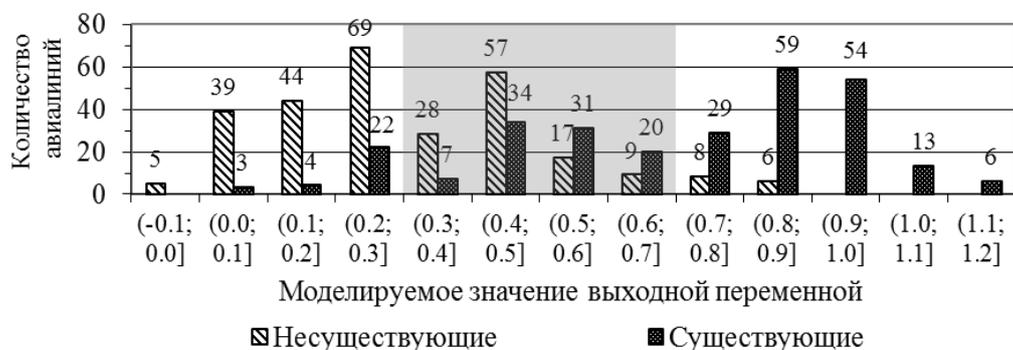


Рис. 6 – Распределение авиалиний по моделируемым значениям выходной переменной (обучающая выборка)

Модель УСА обладает высокой точностью и очень хорошим качеством. Как бинарный классификатор (на данных обучающей выборки) она практически одинаково хорошо выявляет как существующие (85%), так и несуществующие авиалинии (92%) (точность моделирования 88%). Модель УСА обладает высокой прогностической ценностью: не создаёт большого количества ложно-существующих и ложно несуществующих авиалиний (авиалинии, моделируемые как «существующие», реально существуют в 92% случаев; авиалинии, моделируемые как «несуществующие», реально не существуют в 84% случаев).

#### Глава 4. Прогноз развития сети внутрироссийских магистральных авиалиний

Прогноз развития сети внутрироссийских магистральных авиалиний опирается на прогнозы более высокого уровня – макроэкономические, социально-экономические, демографические – параметры этих прогнозов содержатся в документах государственного стратегического планирования. В соответствии с Концепцией долгосрочного социально-экономического развития РФ на период до 2020 года рассматриваются три основных сценария долгосрочного социально-экономического развития страны: инерционный, энерго-сырьевой и инновационный.

#### **4.1 Формирование вариантов развития сети внутрироссийских магистральных авиалиний**

Предложен метод прогнозирования развития сети внутрироссийских магистральных авиалиний. В основе метода лежит модель «условий существования» авиалинии. Метод предполагает ряд последовательных действий:

- анализ документов государственного стратегического планирования с целью выявления общих целевых ориентиров государства и оценки влияния реализации того или иного сценария социально-экономического развития страны на численность населения, уровень его доходов, развитие транспортной системы в целом и воздушного транспорта в частности;
- выявление общих целевых ориентиров государства;
- оценка влияния реализации каждого сценария на показатели социально-экономического развития страны;
- выявление возможных изменений в списках регионов и городов, участвующих в магистральных авиаперевозках;
- анализ изменений значений параметров городов и пар городов, участвующих в магистральных авиаперевозках;
- формирование массива векторов значений входных переменных модели УСА для всех пар городов, участвующих в магистральных авиаперевозках;
- построение прогнозной сети внутрироссийских магистральных авиалиний на основании заключений модели УСА о существовании прямого авиасообщения для каждой пары городов, участвующих в магистральных авиаперевозках.

Метод опробован на данных 2010 г. На основе данных об изменении значений входных переменных для 2010 г. относительно значений 2006 г. (согласно данным государственной статистики) была сформирована модельная сеть 2010 г. Сравнение результатов моделирования с реальной сетью 2010 г. показало, что предложенный метод позволяет адекватно моделировать коммуникационное ядро сети.

С помощью метода сформированы три варианта развития коммуникационного ядра сети внутрироссийских магистральных авиалиний к 2020 г. по основным сценариям долгосрочного социально-экономического развития страны (табл. 2).

Табл. 2 – Результаты моделирования развития сети к 2020 г. (кол-во авиалиний)

Вариант сети	Авиалиния «будет существовать»	Авиалиния «не будет существовать»	Авиалиния «прогнозируется неоднозначно»
Инерционный	509	4533	2167
Энерго-сырьевой	609	4435	2165
Инновационный	784	4302	2123

#### **4.2 Анализ результатов прогнозирования развития сети внутрироссийских магистральных авиалиний**

По сравнению с сетью, моделируемой для 2006 г. (389 существующих авиалиний), во всех трёх вариантах прогнозируется значительное увеличение количества авиалиний. Новые авиалинии появятся, главным образом, в направлениях: из Приволжского и из Уральского ФО, а также в направлении Южного ФО. Но в целом структура сети внутрироссийских магистральных авиалиний не претерпит существенных изменений. В сети по-прежнему будет доминировать ядро сильносвязанных концентраторов авиалиний – городов, являющихся крупными административными или курортными центрами.

#### **Основные результаты и выводы диссертации**

На основании проведённых исследований и разработок можно сделать следующие выводы:

1. Методология долгосрочного прогнозирования авиаперевозок предполагает формирование прогнозных сценариев авиаперевозок с учётом изменений в структуре авиалиний – структуре прямого авиасообщения между городами. Предложен новый подход к решению задачи прогнозирования развития сети магистральных авиалиний, основанный на гипотезе о том, что существование прямого авиасообщения между городами определяется набором универсальных правил, не зависящих явно от времени и не привязанных к конкретной паре городов. Традиционные подходы, использующие трендовые, регрессионные или эмпирические методы, предполагают построение модели на основе заранее известных классов функций. Применение методов нечёткой логики и технологий нейросетевого программирования позволяет определить систему правил, основываясь только на статистических данных об измеряемых параметрах городов, пар городов и информации о наличии между ними прямого авиасообщения. [3, 6, 7, 10].

**2.** Анализ современного состояния и особенностей развития сети внутрироссийских магистральных авиалиний позволил выявить этапы развития авиалиний. Показано, что авиалинии в сети находятся на разных этапах развития, и, следовательно, их присутствие в структуре авиатранспортной сети страны не может быть определено однозначно. Предложен способ формализации понятия «авиалиния существует», позволяющий учитывать стабильность существования авиалинии и темп её развития. Также показано, что сеть внутрироссийских магистральных авиалиний имеет безмасштабную природу. Процесс её развития подчиняется законам развития безмасштабных графов: для сети характерны механизмы предпочтительного присоединения и ассортативности при образовании новых связей. В процессе своего развития сеть будет оставаться безмасштабной. [2, 5, 9, 12, 14].

**3.** Разработана модель «условий существования» авиалинии (модель УСА) на базе имеющихся статистических данных о движении воздушных судов на внутрироссийских магистральных авиалиниях и данных о социально-экономическом развитии регионов страны. Как система нечёткого вывода модель состоит из 6 нечётких правил. Дана содержательная интерпретация предпосылок нечётких правил. Определена система из 6 лингвистических значений, описывающих результат нечёткого вывода. Для окончательного вывода о существовании прямого сообщения между городами необходимо использование всех правил модели. Как бинарный классификатор модель УСА одинаково хорошо выявляет как существующие, так и несуществующие авиалинии (точность моделирования более 85%), не создаёт большого количества ложно-существующих и ложно-несуществующих авиалиний (прогностическая ценность около 90%). Модель УСА предназначена для долгосрочного прогнозирования развития коммуникационного ядра сети внутрироссийских магистральных авиалиний (авиалиний, на которые приходится основная часть объёма авиаперевозок). [1, 3 – 5, 8, 12, 15].

**4.** Разработан метод долгосрочного прогнозирования развития сети внутрироссийских магистральных авиалиний. Он позволяет учитывать возможные изменения социально-экономических параметров регионов страны и целевые параметры развития инфраструктуры наземного и воздушного транспорта. Осуществлено прогнозирование развития сети внутрироссийских магистральных авиалиний к 2020 году на основе социально-экономических и демографических прогнозов развития страны по трём сценариям. Моделирование прямого авиасообщения между городами страны в 2020 г.

показало значительное расширение сети (по сравнению с 2006 г.): на 30% для инерционного, на 56% – энерго-сырьевого и на 100% – инновационного сценариев. Согласно сделанным прогнозам расширение сети будет происходить в основном за счёт увеличения концентрации новых авиалиний в городах с высоким уровнем целевого потенциала (т.е. в соответствии с механизмами развития безмасштабных сетей). [4, 11, 13, 14].

### **Основное содержание диссертации отражено в следующих публикациях:**

#### **Статьи в журналах Перечня ВАК РФ**

1. *Балашов В.В., Смирнов А.В., Цейтлина Т.О.* Моделирование сети магистральных авиалиний // Мир транспорта. – 2012. – № 3. – С. 14-23.
2. *Балашов В.В., Смирнов А.В., Цейтлина Т.О.* Исследование сети магистральных авиалиний России // Научный Вестник МГТУ ГА. – 2013. – № 190 (4). – С. 16-21.
3. *Балашов В.В., Смирнов А.В., Цейтлина Т.О.* Формирование нечёткой нейросетевой модели «условий существования» внутрироссийских магистральных авиалиний // Научный Вестник МГТУ ГА. – 2013. – № 190 (4). – С. 10-15.
4. *Балашов В.В., Смирнов А.В., Цейтлина Т.О.* Прогнозирование развития сети магистральных авиалиний России // Вестник КГТУ им. А.Н.Туполева. – 2013. – № 3. – С. 146-152.

#### **Статья в зарубежном издании, индексируемом в базе данных Scopus**

5. *Tseytлина T., Balashov V., Smirnov A.* The Problem of Modelling a Trunk Air Route Network // Aviation, Vilnius: Technika. – 2013. – Vol. XVII. – №1. – P. 1-8.

#### **Другие публикации**

6. *Цейтлина Т.О.* Прогнозирование пассажирских перевозок на магистральных авиалиниях России // Материалы Международной молодёжной научной конференции «XVII Туполевские чтения», 26-28 мая 2009 г.: Том V. – Казань: Изд-во Казан. гос. техн. ун-та, 2009. – С. 222-223.
7. *Tseytлина T., Smirnov A., Balashov V.* Analysis and Development Forecast of Russian Trunk Airline Network // Материалы международной конференции «Research and Education in Aircraft Design (READ'2010)», Польша, Варшава, 2010 г. – Warsaw: Warsaw University of Technology, 2010. – Volume 2010. – ISSN 1425-2104. [Электронный ресурс]. – опт. диск (CD-ROM), 5 с.

8. *Цейтлина Т.О.* Проблемы исследования и прогнозирования развития сети внутрироссийских магистральных авиалиний // *Материалы Международной молодёжной научной конференции «XVIII Туполевские чтения»*, 26-28 мая 2010 г.: Том IV. – Казань: Изд-во Казан. гос. техн. ун-та, 2010. – С. 414-416.
9. *Балашов В.В., Смирнов А.В., Цейтлина Т.О.* Рассмотрение сети внутрироссийских магистральных авиалиний в качестве безмасштабного графа // *Материалы XLV Научных чтений памяти К.Э. Циолковского.* – Калуга: ИП Кошелев А.Б. (Издательство «Эйдос»), 2010. – С. 210-211.
10. *Балашов В.В., Смирнов А.В., Цейтлина Т.О.* Моделирование пассажирских перевозок на магистральных авиалиниях России // *Материалы XLVI Научных чтений памяти К.Э. Циолковского.* – Калуга: Издательство «Эйдос», 2011. – С. 157-159.
11. *Tseytlina T., Smirnov A., Balashov V.* Problem of Forecasting the Development of Russia's Trunk Air Routes // *Материалы международной конференции «Research and Education in Aircraft Design (READ'2012)»*, Чешская Республика, Брно, 2012 г. – Brno: Brno University of Technology, 2012. – Volume 2012. – ISSN 1425-2104. – С. 22.
12. *Цейтлина Т.О.* Моделирование сети внутрироссийских магистральных авиалиний // *Сб. материалов IV Международной молодёжной научной конференции «Гражданская авиация: XXI век»*, 12-13 апреля 2012 г. – Ульяновск: УВАУ ГА (И), 2012. – С.125-126.
13. *Балашов В.В., Смирнов А.В., Цейтлина Т.О.* Исследование и прогнозирование развития сети магистральных авиалиний России // *Материалы XLVII Научных чтений памяти К.Э. Циолковского.* – Калуга: Издательство «Эйдос», 2012. – С. 216-218.
14. *Балашов В.В., Смирнов А.В., Цейтлина Т.О.* Предсказательное моделирование развития сети магистральных авиалиний России // *Тр. VII Московской международной конференции по исследованию операций (ORM'2013)*. Москва, 15-19 октября 2013 г. Том II, ISBN 978-5-91601081-7. – М.: Вычислит. центр им. А.А. Дородницына РАН, 2013. – С. 196, 197.
15. *Балашов В.В., Смирнов А.В., Цейтлина Т.О.* Нейросетевые технологии в задачах исследования и прогнозирования развития сети внутрироссийских магистральных авиалиний // *Материалы XLIX Научных чтений памяти К.Э. Циолковского.* – Калуга: Авторы докладов, 2014. – С.121,122.

Множительный центр МАИ (НИУ)

Заказ от «7» апреля 2015 г.

Тираж 100 экз.

