**Дмитриева Светлана Петровна. Разработка и исследование алгоритмов прогнозирования состояния многопараметрических технических систем: диссертация ... кандидата Технических наук: 05.13.18 / Дмитриева Светлана Петровна;[Место защиты: ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики»], 2017.- 173 с.**

**САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, МЕХАНИКИ И ОПТИКИ**

На

**Дмитриева Светлана Петровна**

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ АЛГОРИТМОВ  
ПРОГНОЗИРОВАНИЯ СОСТОЯНИЯ МНОГОПАРАМЕТРИЧЕСКИХ

ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

**Специальности 05.13.18 - «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ»**

ДИССЕРТАЦИЯ НА СОИСКАНИЕ УЧЁНОЙ СТЕПЕНИ  
КАНДИДАТА ТЕХНИЧЕСКИХ НАУК

**Научный руководитель: доктор технических наук, профессор Демин А.В.**

Санкт-Петербург

2017г.

**ОГЛАВЛЕНИЕ**

[Оглавление 2](#bookmark1)

[СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ 4](#bookmark2)

[ВВЕДЕНИЕ 5](#bookmark4)

[I JIA15 A I. МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ОЦЕНКИ СОСТОЯНИЯ МНОГОПАРАМЕТРИЧЕСКИХ ДИНАМИЧЕСКИХ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ 11](#bookmark7)

1. [Классификация многопараметрических динамических технических систем на](#bookmark8)

основании физических законов (по целевой функции) 11

1. [Параметрическое описание многопараметрических динамических технических](#bookmark11)

систем на основании физических законов 14

1. [Обобщённая структурная схема и модель многопараметрических](#bookmark14)

[динамических технических систем на основании физических законов ....20](#bookmark14)

1. [Структурно-функциональная модель прогнозной функции](#bookmark16)

многопараметрических динамических технических систем 27

[ВЫВОДЫ ПО ПЕРВОЙ ГЛАВЕ 35](#bookmark18)

[ГЛАВА 2. МЕТОДОЛОГИЯ И АЛГОРИТМ ПОСТРОЕНИЯ ПРОГНОЗНОЙ МОДЕЛИ МНОГОПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ ДИНАМИЧЕСКОЙ ТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ 36](#bookmark22)

1. [Методы прогнозирования поведения (состояния) многопараметрических](#bookmark21)

динамических технических систем 36

1. [Методология построения прогнозной модели многопараметрических](#bookmark33)

динамических технических систем 54

1. [Точность построения прогнозной модели многопараметрических](#bookmark35)

динамических технических систем 67

1. [Алгоритм построения прогнозной модели многопараметрических](#bookmark38)

динамических технических систем 71

[ВЫВОДЫ ПО ВТОРОЙ ГЛАВЕ 77](#bookmark39)

[ГЛАВА 3. ПОСТРОЕНИЕ ПРОГНОЗНЫХ МОДЕЛЕЙ МНОГОПАРАМЕТРИЧЕСКИХ ДИНАМИЧЕСКИХ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ НА ОСНОВАНИИ АПРИОРНОЙ ИНФОРМАЦИИ 78](#bookmark42)

1. [Анализ и обработка данных эксперимента 78](#bookmark43)
2. [Методы представления априорных данных в аналитический вид 82](#bookmark46)
3. [Алгоритм представления априорных данных в аналитический вид 85](#bookmark48)
4. [Методы исследования аналитических моделей 90](#bookmark49)
5. [Критерии оценки достоверности прогнозной модели 93](#bookmark52)

[ВЫВОДЫ ПО ТРЕТЬЕ ГЛАВЕ 102](#bookmark56)

[I JIA15 А 4. РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ АЛГОРИТМА](#bookmark58)

[МЕТЕОПРОГНОЗИРОВАНИЯ ПО ДАННЫМ СИСТЕМЫ МОБИЛЬНЫХ МЕТЕОСТАНЦИЙ 103](#bookmark66)

1. [Физическая природа явления поглощения солнечного излучения земной](#bookmark61)

атмосферой и её поверхностью 103

1. [Схема построения системы сбора и обработки метеоинформации 108](#bookmark65)
2. [Алгоритм метеопрогнозирования по данным системы мобильных](#bookmark67)

метеостанций 113

1. [Экспериментальные исследования 115](#bookmark69)

[ВЫВОДЫ ПО ЧЕТВЁРТОЙ ГЛАВЕ 132](#bookmark81)

[ЗАКЛЮЧЕНИЕ 133](#bookmark83)

[СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ 135](#bookmark85)

[ПРИЛОЖЕНИЕ А. Структурная схема метеорологической станции 140](#bookmark88)

[ПРИЛОЖЕНИЕ Б. Прогнозирование метеопараметров 142](#bookmark89)

[ПРИЛОЖЕНИЕ В. Аппроксимация метеопараметров МТДС 152](#bookmark99)

[ПРИЛОЖЕНИЕ Г. Построение прогнозной функции (полиномов 3 степени) 156](#bookmark106)

[ПРИЛОЖЕНИЕ Д. Построение прогнозной функции (полиномов 5 степени) 161](#bookmark108)

[ПРИЛОЖЕНИЕ Е. Компоненты прогнозной функции 166](#bookmark109)

[ПРИЛОЖЕНИЕ Ж. Проверка корректности прогнозной функции 170](#bookmark111)

**СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ**

ДЗ - дистанционное зондирование

БД - база данных

ИМ - имитационная модель

ИНС - искусственные нейронные сети

ИУС - измерительно-управляющая система

КМ - компьютерная модель

ДЗ - дистанционное зондирование

ММП - метод максимального правдоподобия

МНК - метод наименьших квадратов

МНМ - метод наименьших модулей

МДТС - многопараметрическая динамическая техническая система ОЦС - оптико-цифровая система

ОЦСдз - оптико-цифровые системы дистанционного зондирования

ПО - программное обеспечение

ППП - пакет прикладных программ

ТЗ - техническое задание

ТС - техническая система

ЦФ - целевая функция

УДК - универсальная десятичная классификация

**ВВЕДЕНИЕ**

Одним из важнейших моментов обеспечения успешной научно-производственной и социальной деятельности человечества является необходимость прогнозирования

функциональных и параметрических показателей окружающей среды, и технических систем на базе информации о текущем значении этих показателей. Известны различные методы и средства позволяющие прогнозировать состояние техногенных систем с целью повышения надёжности функционирования и возможности предотвращения нежелательных последствий. Наиболее важные подобные системы - это многопараметрические динамические технические системы (МДТС), например атомные электростанции, космические станции, нефте-газопроводы и другие. Технические средства, обеспечивающие текущий контроль показателей качества

функционирования МДТС являются сенсорные устройства, на основе информации получаемых от них может быть определена прогнозная функция. В этой связи в зависимости от объёма априорной информации достоверность и точность прогноза зависит от выбранного метода построения и алгоритма реализации в виде прогнозной функции для МДТС.

Информационно-измерительные и управляющие системы и в частности системы дистанционного зондирования (мониторинга) относятся к классу МДТС при этом одним из важнейших требований, предъявляемым к их характеристикам, является устойчивое их функционирование на период их жизненного цикла в условиях неоднозначности обстановки относительно внешних возмущений. Для обеспечения функциональной устойчивости МДТС в процессе её эксплуатации необходимо проведение периодического тестирования. В этой связи актуально развитие методов построения и алгоритмов его реализации в прогнозирования, как в реальном масштабе времени, так и в виде прогнозной оценки состояния МДТС в соответствии с апостериорными данными.

Проектирование МДТС всегда ведётся в условиях ограничений на материальные, энергетические, временные и прочие виды ресурсов. Для однопараметрических технических систем построение прогнозной модели, как правило, не вызывает больших проблем, однако, для МДТС, работающих в автономном (автоматическом) режиме с продолжительным сроком эксплуатации прогнозирование их функционального состояния является обязательным условием. Особенно это актуально для МДТС мониторинга окружающей среды, работающих в автоматическом режиме, где исходная информация об инспектируемой системе возможна только с помощью оптического или радио диапазона излучения. В этой связи актуально решение следующих основных теоретических и практических проблем:

1. Развитие методов построения и алгоритмов реализации долгосрочного прогнозирования в автономных МДТС при неопределенности воздействия внешних возмущений (изменения давления, температуры, влажности).
2. Получение своевременной информации в реальном масштабе времени о метеоусловиях и дальнейшее прогнозирование метеообстановки, которое позволило бы обеспечить предсказуемость результатов народно-хозяйственной деятельности и безопасность жизнедеятельности.

В диссертации из всего многообразия МДТС разработка и исследование алгоритмов прогнозирования выполняется на примере локальных систем: оптико-цифровой системы типа лидар и автономной малогабаритной метеостанции.

**Целью работы** является разработка и исследование алгоритмов прогнозирования состояния многопараметрической динамической технической оптико-цифровой системы типа лидар и автономной мобильной метеорологической станции, позволяющих при неопределенности воздействия внешних возмущений обеспечить стабильность их функционирования за счет прогнозного управления.

**Задачи исследования**. Для достижения поставленной цели в работе решаются следующие задачи:

1. Разработка структурно-функциональной схемы МДТС и модели её функционирования, позволяющая обеспечить стабильность и повысить эксплуатационные характеристики в пределах допуска ТЗ.
2. Разработка и исследование алгоритма моделирования МДТС, на основании апостериорной информации с последующим прогнозированием её функционально­параметрического состояния.
3. Разработка алгоритма построения прогнозной модели состояния МДТС и оценка её достоверности.
4. Разработка алгоритма и программного обеспечения (ПО) реального и прогнозного состояния МДТС.

**Объектом исследования** являются МДТС, работающие в автономном (автоматическом) режиме в реальных условиях эксплуатации.

**Предметом исследования** являются аналитические и компьютерные методы прогнозирования состояния МДТС, работающих в автономном режиме в реальных условиях эксплуатации.

**Методы исследования** включают в себя методы математического и компьютерного моделирования, методы обработки результатов эксперимента, методы аппроксимации и экстраполяции, теорию систем, информатику и прикладную математику.

**Научную новизну работы** составляют:

1. Обобщенная структурно-функциональная схема МДТС, работающей в автономном

режиме.

1. Обобщенная прогнозная модель МДТС, работающей в автономном режиме.
2. Прогнозная аналитическая и компьютерно-ориентированная модель состояния оптико­цифровой системы типа лидар, работающей в автономном режиме, на основе апостериорной информации.
3. Прогнозная аналитическая и компьютерно-ориентированная модель состояния автономной (автоматической) метеорологической станции, работающей на основании апостериорной информации.

**Теоретическая и практическая значимость работы**. Разработана обобщенная структурно-функциональную схема МДТС, работающей в автономном режиме. Разработаны обобщенный алгоритм прогнозирования и прогнозная модель многопараметрической динамической технической системы, работающей в автономном режиме. Разработан алгоритм и прогнозная аналитическая и компьютерно-ориентированная модель состояния оптико-цифровой системы типа лидар, работающей в автономном режиме, на основании апостериорной информации. Разработан алгоритм и прогнозная аналитическая и компьютерно-ориентированная модель состояния автономной автоматической метеостанции с радиоканалом связи, на основании апостериорных данных.

В рамках внедрения диссертационной работы и по результатам её апробации, проведённые исследования позволили получить необходимые тактико-технические характеристики для оптико-цифрового лидара и автономной (автоматической) мобильной метеорологической станции.

**Практическую ценность** работы составляют:

1. Алгоритм моделирования МДТС, на основании апостериорной информации с последующим прогнозированием её функционально-параметрического состояния на примере оптико-цифрового авиационного лидара и автономной мобильной метеостанции.
2. Алгоритм построения прогнозной модели состояния МДТС и оценка её достоверности.
3. Алгоритм и программное обеспечение (ПО) реального и прогнозного состояния для автономной мобильной метеорологической станции, работающей на основании апостериорной информации.
4. Алгоритм и ПО реального и прогнозного состояния для авиационного лидара, работающего на основании апостериорной информации.
5. Прогнозная аналитическая и компьютерно-ориентированная модель состояния оптико­цифровой системы типа лидар, работающей в автономном режиме, на основании апостериорной информации.
6. Прогнозная аналитическая и компьютерно-ориентированная модель состояния автономной мобильной метеорологической станции, работающей на основании апостериорной информации.

В ходе решения охарактеризованных задач сформулированы **положения, выносимые на защиту:**

1. Для повышения эксплуатационных характеристик сложной технической системы эффективно использовать численный метод построения прогнозных аналитических моделей МДТС (с выделением базовой, уточняющей и регулирующей компонент процесса) для реальных условий эксплуатации на основании апостериорной информации.
2. Для достижения эксплуатационной устойчивости системы и повышения точности прогнозирования при неопределенности воздействия внешних возмущений следует использовать: алгоритмы: построения прогнозной модели состояния МДТС с оценкой её достоверности и моделирования МДТС на основании апостериорной информации с последующим прогнозированием её функционально-параметрического состояния.
3. Для обеспечения функционально-параметрической стабильности МДТС в пределах регламентированного ТЗ допуска и повышения точности прогнозной оценки на основании апостериорной информации применительно к оптико-цифровой системе типа лидар и мобильной метеорологической станции, работающей в автономном режиме следует использовать прогнозные аналитические и компьютерно-ориентированные модели, а также ПО реального и прогнозного состояния МДТС.

**Достоверность научных результатов и выводов** обусловлена обоснованностью корректного применения математического аппарата при выводе основных уравнений метода, адекватной процедурой идентификации параметров модели на основании обобщенных результатов натурных экспериментов.

**Внедрение результатов работы**. Результаты работы были использованы компаниями ООО "ЛОМО-МЕТЕО", ООО «ОКБ Тест», ООО "АвтоВизус" и в федеральной целевой программе Министерства образования и науки Российской Федерации (грантовое соглашение RFMEFI58716X0031), а также внедрены в учебный процесс на кафедрах ИПМ и ОЦСиТ (базовая) Университета ИТМО путем постановки курса в рамках магистерских образовательных программ.

**Апробация работы**. Полученные результаты обсуждались на 14 международных и всероссийских конференциях:

* X Международная научная конференция «Интеграция науки и практики как механизм эффективного развития современного общества» (г.Москва, Россия, 2013г.);
* IX Международная научная конференция «Тенденции и перспективы развития современного научного знания» (г.Москва, Россия, 2013 г.);
* X Международная научная конференция «Теоретические и практические аспекты развития современной науки», (г.Москва, Россия, 2013 г.);
* Всероссийский конгресс молодых ученых (г.С-Петербург, Россия, 2014г.);
* The V international practical conference «Science and Education» (Munich, Germany 2014);
* The IV international research-practical conference «Science, Technology and Higher Education» January (Westwood, Canada, 2014);
* Конгресс пo интеллектуальным системам и информационным технологиям "IS&IT' 14"(г.Геленджик-Дивноморское, Россия, 2014г.)
* Конгресс пo интеллектуальным системам и информационным технологиям "IS&IT' 15" (г.Геленджик-Дивноморское, Россия, 2015г.);
* VII международная научно-техническая конференция «Низкотемпературные и пищевые технологии в XXI веке» (г.С-Петербург, Россия, 2015г.);
* Всероссийский конгресс молодых ученых (г.С-Петербург, Россия, 2015г.);
* Международная научная конференция «Инновационная наука и современное общество» (г.Уфа, Россия, 2015г.);
* Международная научная конференция «Инновационное развитие современной науки» (г.Уфа, Россия, 2015г.);
* ICUMT 2015 - «The 7-th International Congress on Ultra-Modern Telecommunications and Control Systems» (Brno, Czech Republic, 2015);
* CSNT 2016 - «The International Conference on Communication Systems and Network Technologies 2016» (Chandigarth City, India, 2016).

**Публикации**. По материалам диссертации опубликовано 27 печатных работ, в том числе 4 научных работы - в изданиях, индексируемых ВАК, SCOPUS, 3 учебных пособия, монография в двух частях (на русском и английском языках). Оформлен 1 Грант Правительства г.С-Петербурга.

**Личный вклад автора** в работах, выполненных в соавторстве, заключается в следующем: выполнение аналитического обзора в проблемной области диссертационной работы, аналитическое и компьютерное исследование моделей и алгоритмов. Из работ, выполненных в соавторстве, в диссертационную работу включены результаты, соответствующие личному вкладу автора:

1. Разработанная классификация МДТС по функции её целевого назначения для построения прогнозной модели и декомпозиционного моделирования технических процессов.
2. Разработанная обобщенная структурно-функциональная схема МДТС, работающей в автономном режиме с функцией прогнозного управления, позволяющая повысить

эксплуатационные характеристики сложной технической системы.

1. Разработанный принцип композиции и декомпозиции МДТС с неизвестными и сложными законами функционирования на основании экспериментальных данных, с различной степенью детализации применительно к автономной мобильной метеостанции, используемый в процессе моделирования ее параметров.
2. Разработанный алгоритм моделирования МДТС, на основании апостериорной информации с последующим прогнозированием её функционально-параметрического состояния на примере оптико-цифрового авиационного лидара и автономной мобильной метеостанции, позволяющий при неопределенности воздействия внешних возмущений достичь более высокой эксплуатационной стабильности системы.
3. Разработанный алгоритм построения прогнозной модели МДТС с оценкой достоверности результатов прогнозирования.
4. Разработанный алгоритм и ПО реального и прогнозного состояния применительно к авиационному лидару, работающее на основании апостериорной информации, с точностью прогнозирования в пределах 70-80%, позволяющий при неопределенности воздействия внешних возмущений достичь состояния функциональной-параметрической стабильности системы.
5. Прогнозные аналитические и компьютерно-ориентированные модели состояния оптико­цифровой системы типа лидар и автономной мобильной метеостанции на основании апостериорной информации, с точностью прогнозирования их параметров в пределах 70-80%.
6. Реализация эффективного численного метода построения прогнозных аналитических моделей МДТС для реальных условий эксплуатации на основании апостериорной информации применительно к автономным мобильным малогабаритным метеорологическим комплексам.
7. Разработанный алгоритм реализации проблемно-ориентированных программ для проведения вычислительного эксперимента.
8. Реализация эффективного численного метода оценки достаточности и достоверности полученных результатов прогнозирования параметрического состояния МДТС.

**Структура и объем работы**. Диссертационная работа состоит из перечня сокращений, введения, 4 глав, заключения и списка литературы. В список использованной литературы входит 86 наименований. Диссертация содержит 138 страниц машинописного текста, включая 68 рисунков и 13 таблиц.

**ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

**В заключении представлены основные результаты диссертационной работы.**

В ходе выполнения диссертационной работы автором лично был выполнен аналитический обзор проблемной области, аналитическое и компьютерное исследование моделей и алгоритмов оптико-цифровой системы типа лидар и автономной мобильной метеорологической станции по апостериорным данным. В процессе решения данной задачи были получены следующие результаты:

1. Для повышения эксплуатационных характеристик сложной технической системы разработан и исследован численный метод построения прогнозных аналитических моделей МДТС для реальных условий эксплуатации с выделением базовой (универсальной), уточняющей и регулирующей компонент процесса на основании апостериорной информации.
2. Для достижения эксплуатационной устойчивости системы и повышения точности прогнозирования ее состояния при неопределенности воздействия внешних возмущений разработаны алгоритмы: построения прогнозной модели состояния МДТС с оценкой её достоверности и моделирования МДТС на основании апостериорной информации с последующим прогнозированием её функционально-параметрического состояния.
3. Для обеспечения функционально-параметрической стабильности МДТС в пределах регламентированного ТЗ допуска и повышения точности прогнозной оценки на основании апостериорной информации применительно к оптико-цифровой системе типа лидар и мобильной метеорологической станции, работающей в автономном режиме разработаны и исследованы прогнозные аналитические и компьютерно-ориентированные модели, а также ПО реального и прогнозного состояния МДТС.

Полученные результаты в области математического моделирования, численных методов и комплексов программ соответствуют п.4 «Реализация эффективных численных методов и алгоритмов в виде комплексов проблемно-ориентированных программ для проведения вычислительного эксперимента», п.5 «Комплексные исследования научных и технических проблем с применением современной технологии математического моделирования и вычислительного эксперимента» и п.6 «Разработка новых математических методов и алгоритмов проверки адекватности математических моделей объектов на основе данных натурного эксперимента» согласно паспорта специальности 05.13.18 «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ».

**Общий вывод.** Использование результатов диссертационного исследования позволяет при неопределенности воздействия внешних возмущений обеспечить стабильность функционирования МДТС за счет прогнозного управления внутренними техническими процессами системы. Результаты работы были использованы компаниями ООО "ЛОМО- МЕТЕО", ООО «ОКБ Тест» и ООО "АвтоВизус". Таким образом, совокупность полученных выводов и научных положений показывает, что поставленные задачи по разработке и исследованию алгоритмов моделирования МДТС, на основании апостериорной информации с последующим прогнозированием её функционально-параметрического состояния выполнены.