**Министерство образования и науки, молодежи и спорта Украины**

**Одесский национальный политехнический университет**

На правах рукописи

УДК 004.942

**МИРГОРОД ВЛАДИМИР ФЕДОРОВИЧ**

**МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ПРОЦЕССОВ УПРАВЛЯЕМОГО ИЗМЕНЕНИЯ СОСТОЯНИЯ СИЛОВЫХ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК**

01.05.02 – Математическое моделирование и

вычислительные методы

Диссертация на соискание ученой степени доктора

технических наук

Научный консультант:

Гогунский Виктор Дмитриевич,

доктор технических наук, профессор

ОДЕССА – 2012

СОДЕРЖАНИЕ

ПЕРЕЧЕНЬ УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ 8

ВВЕДЕНИЕ 12

ГЛАВА 1. МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ПРОЦЕССОВ УПРАВЛЯЕМОГО ИЗМЕНЕНИЯ И КОНТРОЛЯ СОСТОЯНИЯ СИЛОВЫХ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК 24

1.1. Особенности процессов управляемого изменения состояния силовых и энергетических установок 26

1.2. Формальная постановка задачи построения математических моделей процессов управляемого изменения состояния силовых и энегетических   
установок 30

1.3. Общая характеристика применяемых математических моделей процессов управляемого изменения состояния силовых и энегетических установок 36

1.4. Методы и средства математического моделирования процессов управляемого изменения состояния силовых и энегетических установок 41

1.4.1. Средства модельной поддержки при разработке силовых и энегетических установок и систем управления, контроля и диагностики 41

1.4.2. Применяемые СМП и их краткая характеристика. 42

1.5. Математические модели процессов контроля состояния силовых и энергетических установок 47

1.6. Математические модели процессов управляемого изменения и контроля состояния объектов энергетики в составе бортовых систем с полной ответственностью 50

ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 1 60

ГЛАВА 2. КОМПЛЕКС МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ПРОЦЕССОВ УПРАВЛЯЕМОГО ИЗМЕНЕНИЯ И КОНТРОЛЯ СОСТОЯНИЯ СИЛОВЫХ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК И МЕТОДЫ ИХ ПОСТРОЕНИЯ 63

2.1. Особенности математических моделей процессов управляемого изменения и контроля состояния силовых и энергетических установок 65

2.2. Линеаризованные математические модели управляемого изменения состояния силовых и энергетических установок 68

2.2.1. Метод линеаризации и математические модели процессов управляемого изменения состояния силовых и энергетических установок в пространстве состояний 68

2.2.2. Кусочно-линейные динамические модели процессов управляемого изменения состояния силовых и энергетических установок 71

2.2.3. Марковские модели процессов управляемого изменения состояния силовых и энергетических установок 75

2.2.4. Модели с неопределенными собственными значениями для процессов управляемого изменения состояния силовых и энергетических установок 78

2.3. Создание комплекса математических моделей процессов управляемого изменения и контроля состояния силовых и энергетических установок в форме Гаммерштейна и в виде следящих систем 81

2.3.1. Предпосылки создания и требования к форме представления перспективных математических моделей процессов управляемого изменения и контроля состояния силовых и энергетических установок 81

2.3.2. Линеаризация параметризованной математической модели 84

2.3.3. Математические модели процессов управляемого изменения и контроля состояния в форме Гаммерштейна и в виде следящих систем 88

2.3.4. Математические модели траекторий собственных значений процессов управляемого изменения и контроля состояния силовых и энергетических установок 92

2.3.5. Представление математических моделей процессов управляемого изменения и контроля состояния силовых и энергетических установокв виде интегральных уравнений 94

2.4. Математические модели процессов контроля состояния силовых и энергетических установок в процессе эксплуатации 96

2.4.1. Общая характеристика задач контроля состояния силовых и энергетических установок в процессе эксплуатации 96

2.4.2. Математические модели оценки координат состояния силовых и энергетических установок 97

2.4.3. Регрессионные математические модели оценки состояния силовых и энергетических установок 100

2.4.4. Математические модели контроля состояния силовых и энергетических установок 104

ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 2 107

ГЛАВА 3. МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ПРОЦЕССОВ УПРАВЛЯЕМОГО ИЗМЕНЕНИЯ СОСТОЯНИЯ СИЛОВЫХ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК В ВИДЕ ИНТЕГРАЛЬНЫХ   
УРАВНЕНИЙ 109

3.1. Типовые математические модели динамических объектов и систем в виде интегральных уравнений 109

3.2. Свойства математических моделей процессов изменения состояния динамических объектов и систем в виде интегральных уравнений   
Вольтерры 110

3.3. Эквивалентные преобразования математических моделей в виде интегральных и дифференциальных уравнений 112

3.4. Исследование свойств интегральных моделей Вольтерры с сепарабельным ядром 124

3.5. Обобщение методов аналитического решения интегральных уравнений Вольтерры ІІ-го рода 128

3.6. Математическая модель процессов управляемого изменения состояния СУ на базе газотурбинных двигателей в виде интегральных уравнений Вольтерры 134

3.7. Дискретные аналоги интегральных уравнений Вольтерры ІІ рода 140

3.8. Моделирование измерительных каналов с иррациональными передаточными функциями на основе интегральных уравнений 147

ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 3 149

ГЛАВА 4. ИССЛЕДОВАНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ПРОЦЕССОВ УПРАВЛЯЕМОГО ИЗМЕНЕНИЯ И КОНТРОЛЯ СОСТОЯНИЯ СИЛОВЫХ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК В ФОРМЕ ГАММЕРШТЕЙНА 151

4.1. Математические модели в   
форме Гаммерштейна и в виде следящих систем. Математическое описание, эквивалентные формы, свойства, ошибки моделирования 151

4.1.1. Математические модели процессов управляемого изменения состояния силовых и энергетических установок в виде следящих систем 151

4.1.2. Линеаризованная математическая модель в виде следящей   
системы 153

4.1.3. Математическая модель в форме Гаммерштейна и в виде следящей системы 155

4.1.4. Уравнения компьютерной реализации ММСС 157

4.1.5. Устойчивость, управляемость и наблюдаемость ММСС 160

4.1.6. Оценки ошибок моделирования 164

4.2. Математические модели с аппроксимацией траекторий собственных значений 173

4.3. Регрессионные математические модели оценки выходных переменных СиЭУ 184

4.4. Оценка вычислительной сложности реализации математических моделей 188

ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 4 192

ГЛАВА 5. МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ КОНТРОЛЯ СОСТОЯНИЯ СИЛОВЫХ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК В ЭКСПЛУАТАЦИИ 194

5.1. Особенности методов и средств контроля состояния силовых и энергетических установок в процессе эксплуатации 194

5.2. Математические модели контроля состояния силовых и энергетических установок в эксплуатации 196

5.2.1. Математические модели контроля состояния силовых и энергетических установок эксплуатации и способы их применения 196

5.2.2. Задачи контроля состояния силовых и энергетических установок в эксплуатации и их особенности 198

5.2.3. Взаимосвязь моделей и задач контроля состояния силовых и энергетических установок в динамике и в процессе эксплуатации 201

5.3. Математические модели контроля состояния силовых и энергетических установок в динамических режимах 203

5.3.1. Задачи контроля состояния силовых и энергетических установок в динамических режимах и методы их решения 203

5.3.2. Оценка состояния на основе математических моделей в виде следящих систем 204

5.3.3. Оценка вычислительной сложности и пути упрощения решения задач контроля состояния 212

5.4. Модели процессов контроля состояния в эксплуатационный период 216

5.4.1. Статистические модели порождения данных 216

5.4.2. Методы трендового контроля при оценке технического состояния силовых и энергетических установок 220

5.4.3. Результаты тестирования трендовых статистик в системах диагностики 223

5.4.4. Вероятностные характеристики интервальных и трендовых статистик в системах диагностики при негаусовских распределениях 224

5.4.5. Методы трендового контроля и анализа состояния силовых и энергетических установок 230

5.4.6. Разработка новых методов трендового анализа технического состояния силовых и энергетических установок 235

ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 5 254

ГЛАВА 6. СРЕДСТВА КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ И   
РЕШЕНИЕ ПРИКЛАДНЫХ ЗАДАЧ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ УПРАВЛЯЕМОГО ИЗМЕНЕНИЯ И КОНТРОЛЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ СИЛОВЫХ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК 256

6.1. Компьютерное моделирование процессов управления силовой установкой на основе турбовального ГТД 256

6.2. Моделирование процессов изменения температурного режима ГТД с обучением модели по экспериментальным данным 263

6.3. Обучение модели процессов управляемого изменения состояния авиационного ГТД на выборках баз экспериментальных данных стендовых испытаний 271

6.4. Виртуальный стенд моделирования процесссов управляемого изменения состояния силовых и энергетических установок для авиационных   
двигателей 275

6.5. Математическое моделирование процессов синхронизации турбовальной двухдвигательной СУ 283

6.5.1. Математическая модель турбовальной двухдвигательной силовой установки 283

6.5.2. Синхронизация работы 2-х двигательной силовой установки 286

6.5.3. Моделирование процессов в двухдвигательной силовой установкес учетом динамики трансмиссии и винтовой группы (крутильной жесткости валов и моментов инерции) 288

6.5.4. Моделирование процессов синхронизации двухдвигательной силовой установки с реальной трансмиссией 292

6.6. Оценка технического состояния СУ газоперекачивающего агрегата 294

6.7. Математическое и компьютерное моделирование оценки технического состояния ГТД в составе авиационных силовых установок 302

ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 6 306

ВЫВОДЫ 308

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ 313

ПРИЛОЖЕНИЯ (ОтдельнЫЙ ТОМ)

**ПЕРЕЧЕНЬ УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ**

АД – авиационный двигатель;

АСД – автоматизированная система диагностики;

АСК – автоматизированная система контроля;

АСКД – автоматизированная система контроля и диагностики;

АСУ – автоматизированная система управления;

БД – базы данных;

БРТ – бортовой регулятор температуры;

В – вентилятор;

ВД – высокое давление;

– ветроэлектростанцияn;

– ветродизельная электростанцияn;

ВСК – встроенная система контроля;

БСКД – бортовая система контроля и диагностики;

n;

ГК – главная компонента;

ГМЧ – гидромеханическая часть;

ГТД – газотурбинный двигатель;

ГТП – газотурбинный привод;

ГПА – газоперекачивающий агрегат;

ДП – диагностический параллелепипед;

2-ДСУ – 2-х двигательная силовая установка;

ДУ – дифференциальное уравнение;

– дизельная электростанцияn;

ИК – измерительный канал;

ИКМ – измеритель крутящего момента;

ИУ – интегральное уравнение;

КВД – компрессор высокого давления;

КЛДМ – кусочно-линейная динамическая модель;

КНД – компрессор низкого давления;

КПА – контрольно-поверочнаая аппаратура;

КТГП – косвенно измеряемые термогазодинамические параметры;

ЛА – летательный аппарат;

МГК – метод главных компонент;

МДУ – маршевая двигательная установка;

ММ – математическая модель;

ММДК – математическая модель с динамической коррекцией;

ММПС – математическая модель пространства состояний;

ММСС – математическая модель в виде следящей системы;

МНК – метод наименьших квадратов;

МПВ – многомерная плотность вероятности;

МСХ – муфта свободного хода;

МФА – метод факторного анализа;

НД – насос-дозатор;

ОВНА – органы входных направляющих аппаратов;

ОС – операционная система;

ОУ – объект управления;

ОЭ – объект энергетики;

ПВ – плотность вероятности;

ПО – программное обеспечение;

ПТК – программно-техничекский комплекс;

РДЦ – регулятор двигателя цифровой;

РУД – рычаг управления двигателем;

РЭ – Руководства по эксплуатации;

САУ – система автоматического управления;

с.а.у. – стандартные атмосферные условия;

СВ – случайная величина;

СИ – стендовые испытания;

СИД – система измерения давлений;

СМ – статистическая модель;

СМП **–** средства модельной поддержки;

СП – случайный процесс;

СТ – свободная турбина;

СУ – силовая установка;

СХ – статическая характеристика;

ТВД – турбина высокого давления;

ТГП – термогазодинамические параметры;

ТЗ – техническое задание;

ТК – турбокомпрессор;

ТиВГ – трансмиссия и винтовая группа;

ТП – термопара;

ТУ – технические условия;

УУ – управляющее устройство;

ЭСУ – электронная система управления;

ЕАSА – Европейское агентство авиационной безопасности;

nнд – частота вращения ротора низкого давления, об/мин;

nсд – частота вращения ротора среднего давления, об/мин;

nвд – частота вращения ротора высокого давления, об/мин;

нд – ускорение ротора низкого давления, об/мин/с;

сд – ускорение ротора среднего давления, об/мин/с;

вд – ускорение ротора высокого давления, об/мин/с;

πК – суммарная степень повышения давления воздуха в компрессоре;

T\*тнд – температура газа за турбиной низкого давления, К;

Gт – расход топлива, кг/ч;

MП – относительная скорость полета (число Маха);

ΔTН – отклонение температуры наружного воздуха от температуры стандартной атмосферы, град;

P\*Н – давление заторможенного потока воздуха на входе в двигатель, Па;

T\*Н – температура заторможенного потока воздуха на входе в двигатель, К;

*ntk*– частота вращения ротора турбокомпрессора, об/мин;

*nst* – частота вращения ротора свободной турбины, об/мин;

*Pк* – давление воздуха за компрессором, Па;

*Tg* – температура газа за камерой сгорания, К;

*Tt* − температура газа за свободной турбиной, К;

*δKy* – запас устойчивости компрессора, %;

*Nst* – мощность на валу свободной турбины, Вт

**ВВЕДЕНИЕ**

**Актуальность темы.** Совершенствование процессов управляемого изменения состояния на основе математических моделей и новых технологий позволило создать новое поколение энергетических объектов, удовлетворяющих требованиям технико-экономической эффективности и экологической безопасности.

Состояние силовых и энергетических установок (СиЭУ) определяется по их выходным переменным, наиболее важные из которых (располагаемая мощность, тяга, запас газодинамической устойчивости и др.) недоступны для непосредственного измерения в эксплуатационных условиях. Оценки таких переменных могут быть получены только методами математического моделирования, для реализации которых в современных технических средствах управления, контроля и диагностирования состояния необходимы соответствующие математические модели (ММ).

Требования к таким моделям обусловлены также необходимостью их реализации непосредственно в составе бортовых и наземных технических средств, а именно:

– ошибки моделирования должны быть сопоставимы с ошибками измерительных каналов (ИК) для непосредственно измеряемых переменных (параметров);

– временной такт выдачи данных (время моделирования) не должен превышать временной такт указанных цифровых ИК.

Таким образом, указанные ММ должны давать возможность получения оценок переменных, недоступных для непосредственного измерения, с допустимыми ошибками и в масштабе времени, близкому к реальному.

Известные теоретические математические модели, которые основаны на нелинейных уравнениях сохранения и равновесия, позволяют получить требуемые оценки при обеспечении необходимой точности, однако вычислительная сложность численной реализации таких моделей ограничивает возможность их применения в системах реального времени. Кроме того, теоретические (“точные”) математические модели в виде нелинейных уравнений численно реализуются в виде громоздких и сложных рекуррентных процедур, то есть нуждаются в значительных вычислительных ресурсах. Указанные математические модели требуют задания априорных значений большого количества входных параметров, которые часто невозможно задать или определить непосредственно.

Известные феноменологические математические модели, основанные на линеаризации нелинейных уравнений, позволяют получить требуемые оценки с достаточным быстродействием, однако для рассматриваемого класса объектов ошибки моделирования при компьютерной реализации таких моделей многократно превышают допустимые ошибки ИК для непосредственно измеряемых переменных. В современных методах исследования процессов изменения состояния, управления, контроля и диагностирования силовых и энергетических установок широко используются кусочно-линейные математические модели, однако, такие модели:

* не всегда могут быть получены путем регрессионного анализа, поскольку требуют данных экспериментов в области значений параметров, где проведение эксперимента либо невозможно, либо опасно;
* обладают недостаточной точностью (в самом принципе линеаризации предполагается малость отклонений в окрестности установившегося режима, как по переменным состояния, так и по управляющим воздействиям, хотя такая малость отклонений для управляющих воздействий в СиЭУ на практике не имеет места, что и обуславливает значительные ошибки моделирования).

Известные математические модели не разрешают существующее противоречие между необходимой и достижимой (на их основе) точностью воспроизведения недоступных для непосредственного измерения выходных переменных, что обеспечивает реализацию исследования процессов изменения состояния, перспективных методов управления, контроля и диагностирования технического состояния объектов, а также противоречие между вычислительной сложностью ММ и возможностями их реализации в бортовых и наземных средствах.

В связи с этим тема диссертации имеет важное научное и практическое значения, поскольку она направлена на решение актуальной научно-технической проблемы, сущность которой заключается в разрешении указанного противоречия путем создания комплекса математических моделей, предназначенных для компьютерной реализации непосредственно в составе бортовых и наземных средств реального времени для управления, контроля состояния и диагностирования силовых и энергетических установок, которые обеспечивают получение оценок переменных, недоступных для непосредственного измерения.

**Связь работы с научными программами, планами, темами.** Работа связана с “Государственной комплексной программой развития авиационной промышленности в Украине до 2010 года”, утвержденной Постановлением Кабинета министров Украины от 12.12.2001г. № 1665-25 . Исследования выполнены соответственно НИР, которые являются базовыми для диссертации, а именно: НИОКР № 0107U010221 “Модернизация и введение в эксплуатацию программно-технических комплексов ПТК**–**148 для обеспечения сертификационных и необходимых для проведения валидации испытаний двигателей Д**–**436**–**148 и АИ**–**450-МС, в соответствии с требованиями CS**–**21”, № 0107U010220 “Разработка мобильного аппаратно-программного комплекса для проведения испытаний, комплексного моделирования и диагностирования технического состояния силовых установок на базе газотурбинных двигателей”, по договорам АО “Элемент” с Минпромполитики Украины, ряда НИОКР по договорам с ЗМКБ “Івченко**–**Прогрес”,АО “Мотор**–**Січ”, НПФГ “Конкорд”, по госбюджетным НИР в Одесском национальном политехническом университете НИР № 0102U002514 “Теория, математические модели и методы реализации прямых и обратных задач в энергетике и неразрушающем контроле” и № 0105U002186 “Теоретические основы построения математических моделей в системах с полной ответственностью для управления, контроля состояния и диагностики объектов энергетики”. В указанных работах автор был ответственным исполнителем.

**Цель и задачи исследования.** Целью работы являются создание комплекса математических моделей процессов управляемого изменения состояния силовых и энергетических установок, предназначенных для компьютерной реализации непосредственно в составе бортовых и наземных средств реального времени для управления, контроля состояния и диагностирования, которые обеспечивают получение оценок переменных, недоступных для непосредственного измерения, в условиях существующих технологических ограничений.

Для решения поставленной научно-технической проблемы, в диссертации были сформулированы и разрешены такие задачи:

1. Критический анализ, сравнение известных и обоснование требования к необходимым математическим моделям процессов управляемого изменения состояния силовых и энергетических установок, а также обоснование направления исследований по их созданию.
2. Обоснование подхода и методов создания комплекса новых математических моделей процессов управляемого изменения состояния силовых и энергетических установок, позволяющих получать математическое описание таких процессов на основе учета априорной информации о виде статических характеристик (взаимозависимостей переменных в установившихся режимах).
3. Разработка новых математических моделей процессов управляемого изменения состояния СиЭУ в виде дифференциальных уравнений пространства состояний и в эквивалентном виде интегральных уравнений Вольтерры ІІ**–**го рода. Установление оценок ошибок предлагаемых моделей и необходимых вычислительных ресурсов для их реализации. Обоснование методов рационального упрощения ММ с использованием априорной информации о координатах состояния, измеряемых непосредственно.
4. Обоснование статистической модели изменения состояния силовых и энергетических установок в длительной эксплуатации по регистрируемым данным в виде временных рядов на основе предлагаемых моделей, а также путем разработки новых методов многомерного трендового анализа.
5. Создание программных средств компьютерного моделирования процессов управляемого изменения состояния силовых и энергетических установок. Решение прикладных задач моделирования процессов управляемого изменения и контроля технического состояния силовых установок транспортного и энергетического назначения.

***Объектом исследования*** являются процессы управляемого изменения и контроля состояния силовых и энергетических установок.

***Предметом исследования*** являются математические модели процессов управляемого изменения состояния силовых и энергетических установок, методы построения, аппроксимационных и эквивалентных преобразований математических моделей.

**Методы исследования**. При выполнении диссертационной работы использованы: методы теории систем при исследовании процессов управляемого изменения состояния силовых и энергетических установок; методы математического моделирования при обосновании эквивалентных и аппроксимационных преобразований; функциональный анализ и метод пространства состояния при исследовании свойств разработанных моделей; теория дифференциальных и интегральных уравнений при нахождении решений и оценке их точности; методы прикладной статистики при решении задач трендового анализа и контроля; методы компьютерного моделирования при решении конкретных прикладных задач.

**Научная новизна полученных результатов.** На основе выполненных теоретических и экспериментальных исследований получено решение научно-технической проблемы разрешения существующего противоречия между необходимой и достижимой точностью воспроизведения недоступных для непосредственного измерения переменных, а также противоречия между вычислительной сложностью известных математических моделей и возможностями компьютерной реализации, путем создания комплекса новых математических моделей, предназначенных для компьютерной реализации непосредственно в составе бортовых и наземных средств реального времени.

В пределах предложенного направления исследований впервые получены такие научные результаты:

1. Предложен подход к решению проблемы создания комплекса новых математических моделей процессов управляемого изменения состояния силовых и энергетических установок для получения оценок переменных, недоступных для непосредственного измерения, с помощью разработанных методов аппроксимационных и эквивалентных преобразований моделей в виде нелинейных дифференциальных уравнений пространства состояний к математической модели в форме Гаммерштейна с линейной частью в виде многомерной следящей системы, что позволило учесть априорную информацию о нелинейных статических характеристиках и динамику отклонений от них и за счет этого уменьшить ошибки моделирования, а также снизить вычислительную сложность реализации математических моделей.

2. Впервые получены математические модели “траекторий собственных значений” на основе полиномиальной аппроксимации матриц линейной части ММ в виде дифференциальных уравнений пространства состояния по режимной переменной и отличающихся от известных моделей представлением их в виде **–**матриц с последующим преобразованием к модальной форме, что позволило исследовать фундаментальные свойства предложенных моделей (устойчивость, управляемость, наблюдаемость).

3. Впервые предложены математические модели процессов управляемого изменения состояния динамических объектов в виде интегральных уравнений Вольтерры ІІ-го рода, отличающиеся от известных отысканием решения интегрального уравнения относительно резольвенты для векторно-матричных ядер сепарабельного вида, предложен и обоснован новый метод эквивалентных преобразований математических моделей в форме Гаммерштейна к моделям в виде интегральных уравнений с правой частью в виде нелинейных статических характеристик, что позволяет использовать известные и предлагаемые эффективные методы их вычислительной реализации.

4. Впервые получены аналитические решения уравнений, связывающих ядро и резольвенту интегральных уравнений Вольтерры ІІ**–**го рода и их дискретных аналогов для ряда типов ядер, что позволяет решать новые классы интегральных уравнений указанного типа с различной правой частью, а также использовать нерекурсивные быстродействующие алгоритмы решения таких интегральных уравнений, применяемых в качестве моделей процессов управляемого изменения состояния силовых и энергетических установок

5. Впервые получены аналитические решения уравнений, связывающих ядро и резольвенту интегральных уравнений Вольтерры ІІ**–**го рода и их дискретных аналогов для ряда типов ядер, что позволяет решать новые классы интегральных уравнений указанного типа с различной правой частью, а также использовать нерекурсивные быстродействующие алгоритмы решения таких интегральных уравнений, применяемых в качестве моделей процессов управляемого изменения состояния силовых и энергетических установок

6. Впервые предложены новые типы математических моделей оценки состояния (наблюдателей состояния), в том числе на основе математических моделей в виде интегральных уравнений, исследованы их свойства и обоснованы способы сокращения размерности путем декомпозиции структуры и использования априорной информации об измеряемых координатах состояния, что обеспечивает получение оценок неизмеряемых координат состояния СиЭУ в динамических режимах.

7. Выдвинуто и подтверждено следующее научное положение: математические модели деградации статических характеристик СиЭУ в длительной эксплуатации в виде трендов отклонений от исходных (либо эталонных), совместно с трендами вибропараметров, позволяют установить статистически обоснованный уровень контроля их состояния. На этой основе предложен и обоснован подход к построению математических моделей изменения состояния СиЭУ, предусматривающий последовательные этапы формирования полиномиальных регрессионных математических моделей статики и трендовых статистических моделей эксплуатационной динамики для оценки отклонений параметров от установленных регрессионных, что позволяет выявить изменения технического состояния в ходе эксплуатации.

8. Предложены новые и усовершенствованы известные методы трендового анализа многомерных временных рядов данных регистрации технического состояния СиЭУ на основе сингулярного разложения обоснованными способами сформированных многомерных массивов (параллелепипедов) из траекторных матриц, позволяющие разделить выборку измеренных переменных на трендовую, циклическую (сезонную) и шумовую компоненты на заданном уровне значимости.

9. Получил дальнейшее развитие метод эквивалентных преобразований математических моделей, в частности, установлена эквивалентность интегральных уравнений Вольтерры ІІ**-**го рода с сепарабельным ядром Гамильтоновой системе дифференциальных уравнений, что позволяет установить взаимосвязь фундаментальной матрицы таких уравнений с ядром и резольвентой.

10. Получил дальнейшее развитие метод статистического оценивания данных измерений и анализа временных рядов, в частности, установлен аналитический вид ряда интервальных и трендовых статистик при негауссовой форме распределений исходных данных, заданных отрезком ряда Грама**–**Шарлье, что позволяет учесть в интервальных статистиках третий и четвертый моменты распределения, а в трендовых **–** установить чувствительность критериев тренда к указанным моментам распределения.

**Практическое значение полученных результатов.** Научное использование и практическое применение получили следующие результаты исследований:

– разработаны и реализованы в виртуальных компьютерных стендах и стенде-имитаторе предложенные в диссертации математические модели процессов управляемого изменения состояния ряда силовых установок (СУ) на базе ГТД, которые позволили осуществить разработку, отладку и испытания систем для контроля и управления такими установками;

– разработаны и реализованы в виртуальном компьютерном стенде и стенде-имитаторе междисциплинарные математические модели процессов управляемого изменения состояния впервые созданных энергетических установок (ветроустановок (ВЭУ) турбогенераторного типа ВЭУ–750, ВЭУ–1000 и ветродизельной электростанции ВДЭС–2000), которые позволили исследовать динамические режимы, осуществить разработку, отладку и испытания информационно-измерительных и управляющих систем, обеспечивающих их функционирование;

– впервые разработана и реализована динамическая математическая модель СУ, состоящей из двух турбовальных двигателей АИ–450, трансмиссии и винтовой группы, учитывающая крутильную жесткость валов, процессы синхронизации и динамику топливо-регулирующей аппаратуры, которая позволила исследовать процесс синхронизации двигателей, обосновать и реализовать алгоритмы управления процессом синхронизации;

– разработаны и внедрены “Методика определения и параметризации статической модели ГТД по результатам испытаний” МУ ПТК–148.1.1–07, “Методика определения и параметризации статической модели ГТД по результатам испытаний при стационарном и нестационарном изменении параметров двигателя” МУ ПТК–148.1.2–07, Методические указания “Применение математических моделей в программно-технических комплексах испытаний ГТД, в системах управления и диагностирования их технического состояния” МУ “Энергия”–1–2009, которые позволили обосновать составные части методического, алгоритмического и программного обеспечение для получения, верификации и применения математических моделей процессов управляемого изменения состояния СиЭУ на всех этапах жизненного цикла указанных объектов.

Результаты исследований, разработанные модели и программные продукты их численной реализации использованы: при разработке и создании в АО “Элемент” и внедрении в ЗМКБ “Івченко – Прогрес” опытных образцов первой отечественной системы с полной ответственностью РДЦ**–**450 для управления, контроля параметров и диагностики двухдвигательной СУ вертолетов Ка**–**226 и Ми**–**2м; при разработке и создании в АО “Элемент” опытных образцов цифровой системы БРТ для ограничения температурного режима ГТД АИ**–**25**–**ТЛШ СУ самолетов Л**–**39М и турбовальных двигателей семейства ТВ3**–3**-117; при сертификационных испытаниях и серийном производстве созданной в АО “Элемент” по заказу ЗМКБ “Івченко – Прогрес” опытных и серийных образцов системы измерения давления СИД**–**3 двигателей Д436**–**148, Д**–**436**–**Т1 самолетов Ан**–**148 и Ту**–**334; при разработке и создании в АО “Элемент” по заказу АО “Мотор**–**Січ” программно-технических комплексов для испытаний СУ на основе ГТД; при разработке и создании в АО “Элемент” опытных образцов информационно-измерительных и управляющих систем для ВЭУ и ВДЭС острова Змеиный (акты внедрения Головной организации Минпромполитики Украины АО “Елемент” от 09.12.10 г. и ЗМКБ “Ивченко – Прогрес” от 10.07.12 г.).

**Личный вклад соискателя.** Основное содержание диссертационной работы и ее результаты полностью отображены в опубликованных научных работах автора. Все теоретические и практические результаты, которые составляют основное содержание диссертационной работы и выносятся на защиту, получены лично автором и опубликованы в 64 научных работах, из них в 45 научных профильных изданиях Украины по техническим наукам. В работах, опубликованных в соавторстве, личный научный вклад соискателясоставляет: в работах [133,155–157,159,166,172] автором предложены математические модели в виде интегральных уравнений и их дискретных аналогов, методы эквивалентных преобразований и резольвентных решений, в работах [17,21,36,53,58,136,148, 153,154,163**–**165,167,168,207] автором предложены, обоснованы и исследованы новые математические модели управляемых процессов изменения состояния силовых установок энергетического и транспортного назначения, в работах [92,140**–**143,145,146,151,152,158,169,170,171,208] автором разработаны методы, методики и алгоритмы оценки контроля состояния исследуемых силовых и энергетических установок, модели и методы трендового контроля и анализа данных регистрации их технического состояния, в работах [50,56,57,59,209,211] автором решены на основе предложенных моделей ряд задач исследования процессов управляемого изменения и контроля состояния конкретных СиЭУ. В совместных работах [52,54,135,138,144,147,162,173–177,186,210,212,261]автору принадлежат постановки и решения задач, вывод основных уравнений и соотношений, анализ результатов и формулировка выводов.

**Апробация работы.** Основные положения и результаты работы апробированы в полном объеме, докладывались и обсуждались на II Международной научно-технической конференции “Авиадвигатели XXI века” (Москва, ЦИАМ, 2005); Научно-техническом конгрессе по двигателестроению (НТКД–2010, Москва, ЦИАМ, 2010); 10–16 Международных конгрессах двигателестроителей (Рыбачье); Международных научно-технических конференциях “Датчики, приборы и системы” в 2005 и 2006 г.г., 10,11,16 и 17 Международных конференциях по автоматическому управлению: “Автоматика**–**2003” (Севастополь, 2003), “Автоматика**–**2004” (Киев, 2004);“Автоматика**–**2009” (Черновцы, 2009);“Автоматика**–**2010” (Харьков, 2010); Международных научно-технических конференциях “Искусственный интеллект. Интеллектуальные и многопроцессорные системы” в 2006-2011 г.г. (Кацивели); Международной научной конференции “Интеллектуальные системы принятия решений и прикладные аспекты информационных технологий” в 2005 г. (Евпатория), Международных научных конференциях “Интеллектуальные системы принятия решений и проблемы вычислительного интеллекта” в 2008-2012 г.г. (Евпатория); Международных научно-технических конференциях “Моделирование–2006”, “Моделирование–2008”, “Моделирование–2010” и “Моделирование–2012”, (Киев); Международной научно-технической конференции “Интегральные уравнения–2009” (Киев, ИПМЭ, 2009), а также на НТС научной организации АО “Элемент”.

**Публикации.** Основные научные результаты диссертации опубликованы в 45 статьях в профильных научных журналах и сборниках научных трудов и в 17 других научных изданиях, материалах и тезисах научных конференций, заявке на изобретение.

Диссертационная работа выполнялась на кафедре информационных систем и в научно-исследовательской лаборатории компьютеризованных информационных систем научно-исследовательской части Одесского национального политехнического университета, прикладная ее часть – в научно-исследователькой организации АО «Элемент» в 1999 –2011 годах.

Автор выражает благодарность заместителю проректора по научной работе Одесского национального политехнического университета Г.В. Костровой и Директору – Главному конструктору АО «Элемент» Г.С. Ранченко за поддержку и помощь в выполнении работы.

Соискатель выражает признательность научному консультанту, Заслуженному деятелю науки и техники Украины, доктору технических наук, профессору Гогунскому Виктору Дмитриевичу, а также профессорам, докторам технических наук: заведующему кафедрой информационных систем Антощук Светлане Григорьевне, заведующему кафедрой прикладной математики Крылову Виктору Николаевичу за проявленное внимание и ценные замечания в процессе выполнения и оформления представленной работы.

Автор также выражает признательность руководству Военной академии (г. Одесса), в частности, полковнику, кандидату педагогических наук Маслию Олегу Николаевичу, за внимание и поддержку при работе над диссертацией.

Автор выражает глубокую признательность своим учителям: первому научному руководителю, професору Пичугину Евгению Дмитриевичу, а также доктору технических наук, профессору Верланю Анатолию Федоровичу, благодаря многолетнему сотрудничеству с которыми получены основные научные результаты работы.

Автор выражает благодарность доктору технических наук Гвоздевой Ирине Маратовне, без помощи и поддержки которой диссертационная работа не могла бы состояться.

В диссертационной работе получены новые научно обоснованные результаты, которые в совокупности разрешают важную научно-техническую проблему, которая состоит в создании комплекса новых математических моделей процессов управляемого изменения состояния силовых и энергетических установок, предназначенных для компьютерной реализации непосредственно у бортовых и наземных средств реального времени для управления, контроля и диагностирования, которые обеспечивают получение оценок переменных, недоступных для непосредственного измерения, с допустимыми погрешностями, в условиях существующих технологических ограничений.

Полученны новые научные и практические результаты работы, которые имееют существенные преимущества по сравнению с существующими, и состоят в следующем.

1. Обоснованы требования к математическим моделям процессов управляемого изменения и контроля состояния силовых и энергетических установок для применения при разработке и в составе бортовых и наземных средствах управления, контроля и диагностирования.

2. Обоснован теоретически и экпериметально подтвержден подход к решению проблемы получения новых математических моделей управляемого изменения состояния силовых и энергетических установок на основе разработанных методов аппроксимационных и эквивалентных преобразований моделей, представленных в общем виде нелинейных дифференциальных или интегральных уравнений к математической модели в форме Гаммерштейна, в которой нелинейный оператор воспроизводит статические характеристики объекта, а линейная часть организована в виде астатической многомерной следящей системы, что обеспечивает уменьшение ошибок моделирования, а также сокращение вычислительных ресурсов, необходимых для компьютерной реализации.

3. На основе параметризации математической модели в виде дифференциальных уравнений пространства состояний путем полиномиальной аппроксимации элементов матриц таких моделей (по режимной переменной) и представления их в виде -матриц, выполнено преобразование к эквивалентной модальной форме, что позволило установить траектории и явление бифуркации собственных значений, исследовать фундаментальные свойства (устойчивость, управляемость инаблюдаемость) на различных режимах.

4. Предложены и исследованы нерекурсивные регрессионные формы математических моделей, в которых координаты состояния (обороты турбин) заменяются измеренными значениями, а косвенно-измеряемые и неизмеряемые выходные переменные формируются в виде суммы статических значений и линейной комбинации (регрессии) отклонений координат состояния от статических значений, что позволяет получить оценки моделируемых параметров в в реальном времени, а также выполнить замену координатного базиса при параметрическом отказе измерительных каналов.

5. Предложены, обоснованы и исследованы математические модели СиЭУ в виде интегральных уравнений Вольтерры ІІ-го рода, разработан метод эквивалентных преобразований математических моделей в виде дифференциальных уравнений к моделям в виде интегральных уравнений, что позволяет использовать известные эффективные методы их численного решения. Установлены новые свойства таких уравнений, в частности, эквивалентность уравнений Вольтерры ІІ-го рода с сепарабельным ядром Гамильтоновой системе дифференциальных уравнений, а также взаимосвязь фундаментальной матрицы таких уравнений с ядром и резольвентой.

6. Сформулированы и доказаны утверждения о виде аналитических решений интегрального уравнения, связывающего ядро и резольвенту уравнений Вольтерры ІІ-го рода и их дискретных аналогов для ряда типов ядер, что позволяет отыскать решения новых классов интегральных уравнений указанного типа, а также упростить компьютерную реализацию таких моделей.

7. Определены пути решения задач контроля состояния силовых и энергетических установок в краткосрочной динамике путем синтеза, на основе разработанных, новых математических моделей оценки состояния. Выполнено исследование свойств таких ММ и оценка необходимых вычислительных ресурсов при компьютерной реализации, предложены ММ оценки состояния сокращенной размерности, в которых используется априорная информация об измеряемых координатах состояния и достигается упрощение компьютерной реализации.

8. Установлено, что статистически обоснованный уровень контроля состояния силовых и энергетических установок в длительной эксплуатации обеспечивается анализом меры деградации статических (дроссельных) характеристик в виде трендов отклонений от исходных (либо эталонных) характеристик совместно с трендами вибропараметров. На этой основе предложен и обоснован подход к построению математических моделей контроля состояния, предусматривающий последовательные этапы формирования полиномиальных регрессионных математических моделей статики (установившихся режимов) и многомерных трендовых моделей отклонений параметров объектов от установленных регрессионных, что позволяет выявить изменения технического состояния в жизненном цикле.

9. Предложены новые и выполнено усовершенствование известных методов трендового анализа временных рядов данных регистрации технического состояния силовых и энергетических установок на основе формирования многомерных массивов из траекторных матриц и их сингулярного разложения, позволяющие разделить выборки на трендовые, циклические (сезонные) и шумовые компоненты на заданном уровне значимости.

10. Выполнено усовершенствование и развитие методов статистического оценивания данных измерений и исследования временных рядов, в частности, установлен аналитический вид ряда интервальных и трендовых статистик при негауссовой форме распределений исходных данных, заданных отрезком ряда Грама-Шарлье, что позволяет учесть в интервальных статистиках третий и четвертый моменты распределения, а в трендовых **–** установить чувствительность критериев тренда к указанным моментам распределения.

11. Созданы программные средства и получены решения ряда прикладных задач моделирования и оценки состояния силовых установок на основе газотурбинных двигателей различных схем, а также энергогенерирующих ветроустановок:

* разработаны и реализованы усовершенствованные математические модели силовых установок на основе газотурбинных двигателей, включая модели элементов топливной автоматики и измерительных каналов, в частности**:** АИ-450 и АИ-25-ТЛШ что позволило обеспечить разработку и создание первой отечественной системы с полной ответственностью РДЦ-450, разработку и создание цифровой системы БРТ для ограничения температурного режима двигателя;
* впервые получена и численно реализована динамическая математическая модель процессов управления силовой установкой, состоящей из двух турбовальных двигателей АИ-450, трансмиссии и винтовой группы, учитывающая крутильную жесткость трансмиссии и валов, процессы синхронизации приводов и динамику топливорегулирующей аппаратуры, что позволило решить задачу создания и отработки алгоритмов синхронизации и управления двигателями;
* впервые получена и численно реализована многодисциплинарная динамическая математическая модель ветроэнергетических установок большой единичной мощности нового турбогенераторного типа ВЭУ-750(1000), что позволило создать комплекс информационно-управляющих систем, отработать алгоритмы регулирования и исследовать перегрузочные режимы, в том числе аварийные;
* решен ряд прикладных задач оценки состояния силовых установок: самолета Ил-76 на базе двигателя ПС-90А, трехвальных авиационных ГТД, двигателя Д-336 в составе силовой установки газоперекачивающего агрегата.

Таким образом достигнутая цель исследования, которая заключается в создании комплекса математических моделей процессов управляемого изменения состояния силовых и энергетических установок, предназначенных для компьютерной реализации непосредственно в составе бортовых и наземных средств реального времени для управления, контроля состояния и диагностированиея, которые обеспечивают получение оценок переменных, недоступных для непосредственного измерения.

**СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ**

1. Айвазян С.А. Прикладная статистика. Основы моделирования и первичная обработка данных / С.А. Айвазян, И.С. Енюков, Л.Д. Мешалкин. – М.: Финансы и статистика, 1983. – 422 с.
2. Айвазян С.А. Прикладная статистика. Исследование зависимостей / С.А. Айвазян, И.С. Енюков, Л.Д. Мешалкин. – М.: Финансы и статистика, 1985. – 488 с.
3. Айвазян С.А. Прикладная статистика. Классификация и снижение размерности / С.А. Айвазян, В.М. Бухитабер, И.С. Енюков, Л.Д. Мешалкин. – М.: Финансы и статистика, 1988. – 607 с.
4. Анисимов А.М. Комплексная система контроля и диагностики двигателя ПС–90А на самолетах ИЛ–96–300, ТУ–204, ТУ–214, ИЛ– 76 МФ / А.М. Анисимов, В.Л. Ступников, Ю.А. Трубников и др. // Авиационно–космическая техника и технология. – 2001. – Вып. 26. – С. 213–214.
5. Арьков В.Ю. Полунатурное моделирование отказов ГТД для испытательных систем контроля и диагностики двигателя / В.Ю. Арьков, Г.Г. Куликов, С.В. Епифанов, И.И. Минаев // Авиационно–космическая техника и технология. – 2004. – №7(15). – С. 167 – 173.
6. Арьков В.Ю. Идентификация динамических моделей САУ ГТД и их элементов статистическими методами: Дис.... д-ра техн. наук : 05.13.01. Уфа., 2002. 372 с.
7. Ахмедзянов А.М. Проектирование авиационных  ГТД / А.М. Ахмедзянов, В.П. Алаторцев, Х.С. Гумеров, А.П. Рыжов и др. – Уфа: УАИ, 1987. – 227 с.
8. Ахмедзянов А.М. Диагностирование состояния ВРД по термогазодинамическим параметрам / А.М. Ахмедзянов, А.П. Тунаков. – М.: Машиностроение, 1993. – 206с.
9. Aхмедзянов А.М. Анализ методов организации вычислительных процессов при формировании математических моделей сложных технических объектов / А.М. Ахмедзянов, Д.Г. Кожинов // Изв. вузов. Авиационная техника. – 1994. – №3. – С. 77 – 79.
10. Aхмедзянов Д.А. Прямая и обратная задачи расчета переходных (неустановившихся) режимов авиационных ГТД / Д.А. Ахмедзянов, Х.С. Гумеров, И.В. Иванов // Известия вузов. Авиационная техника. – 1996. – № 3. – С. 86–90.
11. Aхмедзянов Д.А. Математические модели авиационных двигателей произвольных схем (компьютерная среда DVIG): Учеб. пособие; под ред. А.М. Ахмедзянова / Д.А. Ахмедзянов, И.М. Горюнов, Х.С. Гумеров, И.А. Кривошеев и др. – Уфа: УГАТУ, 1998. – 127 с.
12. Aхмедзянов А.М. О месте функциональных приложений ГРАД, ПАРАД, DVIG, САМСТО  в CAE-технологии / А.М. Ахмедзянов, А.П. Тунаков, Д.Г. Кожинов, Н.Ш. Сагитов // Изв. вузов. Авиационная техника. – 2000. – №2. – С. 71–73.
13. Aхмедзянов А.М. Информационная технология разработки авиационных двигателей: состояние и перспективы / А.М. Ахмедзянов, И.А. Кривошеев // Изв. вузов. Авиационная техника. – 2000. – №4. – С. 70–73.
14. Ахмедзянов Д.А. Термогазодинамический анализ рабочих процессов ГТД в компьютерной среде DVIGwp / [Д.А. Ахмедзянов, И.А. Кривошеев, Х.С. Гумеров и др.]. – Уфа: Уфим. гос. авиац. техн. ун-т., 2003. **–** 162 с.
15. Ахмедзянов Д.А. Моделирование совместной работы авиационных ГТД и элементов топливной автоматики на переходных режимах в компьютерной среде DVIGw / Д.А. Ахмедзянов, Х.С. Гумеров, И.А. Кривошеев // Изв. вузов, сер. “Авиационная техника”. – 2002. – №1. – С. 43–46.
16. Ахмедзянов Д. А.Термогазодинамический анализ рабочих процессов ГТД в компьютерной среде DVIGw / Д.А. Ахмедзянов, И.А. Кривошеев и др. – Уфа: Изд. Уфимск. гос. авиац. техн. ун-та. – 2003. – 162 с.
17. Багаутдинов Н.Д. Реализация и внедрение методов и аппаратно-программных средств комплексного моделирования, управления и диагностирования технического состояния силовых и энергетических установок на базе газотурбинных двигателей / Н.Д. Багаутдинов, Д.И. Волков, С.В. Епифанов, В.Ф. Миргород и др. // Авіаційно-космічна техніка і технологія. – 2007. – № 7(43). – С. 147–151.
18. Барбашин  Е.А. Введение в теорию устойчивости / Е.А. Барбашин. – М.: Наука, 1967. – 223 с.