

Д. С. ЕРШОВ, Р. З. ХАЙРУЛЛИН

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕТРОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ

И «Инфра-Инженерия»

Д. С. Ершов, Р. З. Хайруллин

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
МЕТРОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ**

Монография

Москва Вологда
«Инфра-Инженерия»
2025

УДК [006.91+004]
ББК 30.10
Е80

Рецензенты:

д. т. н., ведущий научный сотрудник научно-исследовательского испытательного отдела
ФГБУ «Главный научный метрологический центр» Министерства обороны РФ

В. В. Супрунук;

д. т. н., профессор, профессор кафедры ФГБВОУ ВО «Академия гражданской защиты
Министерства РФ по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации
последствий стихийных бедствий имени генерал-лейтенанта Д. И. Михайлика»

К. П. Латышенко

Ершов, Д. С.

Е80 Математическое моделирование метрологических систем : монография / Д. С. Ершов, Р. З. Хайруллин. – Москва ; Вологда : Инфра-Инженерия, 2025. – 168 с. : ил., табл.
ISBN 978-5-9729-2418-9

Содержит общие положения, принципы и методы математического моделирования метрологических систем.

Для научных работников, специалистов и руководителей предприятий, работающих в области обеспечения единства измерений, занимающихся вопросами метрологического обеспечения. Может быть полезна аспирантам и студентам, обучающимся по направлению подготовки 27.03.01 «Стандартизация и метрология», профили «Метрологическое обеспечение производств», «Цифровая метрология».

УДК [006.91+004]
ББК 30.10

ISBN 978-5-9729-2418-9

© Ершов Д. С., Хайруллин Р. З., 2025

© Издательство «Инфра-Инженерия», 2025

© Оформление. Издательство «Инфра-Инженерия», 2025

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	6
1. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РАБОЧЕГО МЕСТА ПО ПОВЕРКЕ СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ КАК НЕСТАЦИОНАРНАЯ СИСТЕМА ОБСЛУЖИВАНИЯ	13
1.1. Обзор литературы по теории нестационарных систем обслуживания	13
1.2. Постановка задачи.....	15
1.3. Базовая модель.....	16
1.4. НСО с относительными приоритетами.....	18
1.5. Результаты численного моделирования НСО с ОП	20
1.6. Модель НСО с ОП в матричной форме	26
1.7. Модель НСО с ОП как модель управления вероятностями нахождения в различных состояниях системы	28
1.8. Моделирование динамики поступления и обслуживания заявок с разными приоритетами	28
1.9. Исследование пиковых, полупиковых и базовых нагрузок на РМ при постоянных значениях интенсивностей обслуживания.....	30
1.10. Моделирование управления пиковыми нагрузками с помощью кусочно-линейных управляющих функций	32
1.11. Моделирование функционирования РМ в штатном режиме (при ненулевых начальных условиях)	33
1.12. Оценка трудоемкости моделирования	34
1.13. Выводы по разделу 1	35
2. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ МЕТРОЛОГИЧЕСКИХ ЛАБОРАТОРИЙ В РАЗЛИЧНЫХ РЕЖИМАХ ВЫПОЛНЕНИЯ ПОВЕРКИ СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ	37
2.1. Постановка задачи.....	37
2.2. Модели процессов функционирования метрологических лабораторий в различных режимах выполнения поверки средств измерений.....	38
2.3. Методика расчета производительности метрологических лабораторий в различных режимах выполнения поверки средств измерений.....	45
2.4. Результаты численного моделирования процессов функционирования метрологических лабораторий в различных режимах выполнения поверки средств измерений.....	47
2.5. Выводы по разделу 2.....	56

3. МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ПРОЦЕССОВ ЭКСПЛУАТАЦИИ, ОБНОВЛЕНИЯ И ДЕГРАДАЦИИ ПАРКА СЛОЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ С МЕТРОЛОГИЧЕСКИМ ОБЕСПЕЧЕНИЕМ	57
3.1. Обзор литературы по вопросам моделирования процессов эксплуатации сложных технических систем.....	57
3.2. Модели эксплуатации СТС	59
3.2.1 Классическая модель	59
3.2.2 Модель эксплуатации парка СТС с полностью восстанавливаемым ресурсом.....	72
3.2.3 Модель эксплуатации парка СТС с частично восстанавливаемым ресурсом.....	76
3.3. Выводы по разделу 3.....	84
4. ПРИМЕНЕНИЕ БАЙЕСОВСКОГО ПОДХОДА ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ МЕТРОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ	85
4.1. Применение байесовского подхода в задачах построения статистических оценок при обработке результатов испытаний измерительной техники	85
4.1.1 Логическая схема байесовского подхода	85
4.1.2 Определение и условие существования априорных распределений, сопряженных с наблюдаемой генеральной совокупностью.....	88
4.1.3 Условие существования сопряженного семейства априорных распределений	88
4.1.4 Построение априорных сопряженных распределений.....	90
4.1.5 Методика расчета конкретных значений параметров в сопряженных априорных распределениях	92
4.1.6 Пересчет значений параметров при переходе от априорного сопряженного распределения к апостериорному	93
4.1.7 Примеры задач на точечное и интервальное байесовское оценивание параметров модели.....	94
4.2. Применение метода байесовских сетей для установления причинно-следственных связей	98
4.3. Построение доверительных интервалов и областей для модели множественной линейной регрессии с использованием байесовского подхода	102
4.3.1 Метод решения задачи.....	103
4.3.2 Построение и исследование модели множественной линейной регрессии	105
4.3.3 Результаты моделирования	112
4.4. Выводы по разделу 4.....	116

5. ВЕРОЯТНОСТНО-ФИЗИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ	
МЕТРОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ	118
5.1. Трехпараметрическая диффузионная модель отказов измерительной техники	118
5.2. Диффузионная модель дрейфа метрологических характеристик измерительной техники	129
5.3. Модель эксплуатации измерительной информационной системы с цифровой обработкой сигналов	135
5.4. Применение риск-ориентированного подхода в задачах метрологического обеспечения парка средств измерений	142
5.5. Об одной термодинамико-метрологической аналогии	149
5.6. Выводы по разделу 5.....	154
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	156
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	158