

А.С. ГИШВАРОВ, С.А. ТИМАСHEB

---

**Т**еоретические основы  
ускоренной оценки  
и прогнозирования  
надежности  
технических систем



---

Екатеринбург - 2012

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК  
УРАЛЬСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ

НАУЧНО-ИНЖЕНЕРНЫЙ ЦЕНТР  
«НАДЕЖНОСТЬ И РЕСУРС  
БОЛЬШИХ СИСТЕМ И МАШИН»

*А.С. Гишваров, С.А. Тимашев*

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ  
УСКОРЕННОЙ ОЦЕНКИ  
И ПРОГНОЗИРОВАНИЯ НАДЕЖНОСТИ  
ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

УДК 620.178  
ББК 34.47  
Г11

Ответственный редактор  
докт. техн. наук, профессор **А.С. Гишваров**

Рецензенты: докт. техн. наук, профессор **А.И. Белоусов**  
докт. техн. наук, профессор **В.С. Жеряков**

**Гишваров А.С., Тимашев С.А.**

Г11 Теоретические основы ускоренной оценки и прогнозирования надежности технических систем. Екатеринбург: УрО РАН, 2012. – 184 с.  
ISBN 978-5-7691-2250-7

Систематизированы и изложены теоретические основы ускоренных ресурсных испытаний и их приложения при решении задач по оценке и прогнозированию состояния технических систем, надежность которых характеризуется одновременно несколькими «критичными» элементами узлов и параметрами расхода ресурса. Обоснование ускоренных ресурсных испытаний технических систем проводится на базе обобщенного подхода к выбору оптимальных значений объема, режимов и длительности испытаний с учетом основных показателей и критериев, определяющих их эффективность. Рассмотрены вопросы математического моделирования ускоренных ресурсных испытаний, особенности применения априорной информации при их разработке, новые подходы к оценке надежности технических систем, когда условие эквивалентности ускоренных и длительных испытаний не выполняется, и другие вопросы.

Для научных работников и специалистов НИИ и КБ, занимающихся разработкой и проведением испытаний при решении задач по оценке и прогнозированию надежности и ресурса технических систем в авиации, ракетостроении, судостроении, энерго- и общем машиностроении.

УДК 620.178  
ББК 34.47



ISBN 978-5-7691-2250-7

© НИЦ «НиР ВСМ», 2012 г.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

---

---

<b>Предисловие</b> .....	3
<b>Глава 1. Состояние и основные задачи проблемы ускоренных ресурсных испытаний технических систем</b> .....	6
1.1. Актуальность проблемы и классификация ускоренных ресурсных испытаний ..	6
1.2. Методы обоснования ускоренных ресурсных испытаний .....	9
1.3. Основные направления развития методов ускоренных ресурсных испытаний ..	20
Выводы .....	33
<b>Глава 2. Теоретические основы ускоренных эквивалентных испытаний</b> .....	35
2.1. Условие эквивалентности испытаний для отдельного элемента изделия .....	35
2.2. Условие эквивалентности испытаний для изделия в целом .....	37
2.3. Моделирование ускоренных испытаний .....	39
2.3.1. Методы моделирования ускоренных испытаний .....	39
2.3.2. Основные предпосылки (принципы) моделей расходования ресурса .....	40
2.3.3. Обобщенная модель расходования ресурса .....	42
2.3.4. Область реализации режимов ускоренных испытаний .....	44
2.3.5. Формирование обобщенной модели расходования ресурса .....	46
2.4. Критерии эффективности ускоренных испытаний .....	47
2.5. Целевая функция, реализующая условие эквивалентности ускоренных и длительных испытаний .....	48
2.6. Выбор режимов и длительности ускоренных испытаний в детерминированной постановке .....	50
2.6.1. Последовательность выбора режимов и длительности ускоренных испытаний .....	50
2.6.2. Принятие решений в случаях, когда условие эквивалентности ускоренных и длительных испытаний не выполняется .....	55
2.6.3. Экспериментальная проверка эффективности ускоренных испытаний, разработанных с применением обобщенного метода .....	55
2.7. Выбор режимов и длительности ускоренных испытаний в стохастической постановке .....	59
2.7.1. Целевая функция .....	59
2.7.2. Пример выбора режимов и длительности ускоренных испытаний в стохастической постановке .....	62
Выводы .....	65
<b>Глава 3. Модели расходования ресурса</b> .....	68
3.1. Принципы расходования ресурса .....	68
3.2. Модели долговечности при статическом механическом нагружении .....	72
3.3. Модели долговечности при циклическом нагружении .....	81
3.4. Модели долговечности процессов старения .....	84
3.5. Модели диффузии .....	88
3.6. Модели износа, эрозии и коррозии .....	91
3.7. Модели других физико-химических процессов .....	98
Выводы .....	99

<b>Глава 4. Моделирование процессов расходования ресурса с применением теории оптимального эксперимента</b> .....	100
4.1. Модель выбора оптимального плана эксперимента .....	100
4.2. Критерии оптимальности плана эксперимента .....	101
4.3. Планирование эксперимента .....	104
4.3.1. Планирование эксперимента для модели, включающей фактор времени ..	104
4.3.2. Планирование эксперимента при моделировании скорости расходова- ния ресурса .....	105
4.3.3. Планирование эксперимента при моделировании долговечности .....	107
4.3.4. Последовательность выбора оптимального плана эксперимента .....	107
4.3.5. Пример моделирования износа щеток генератора постоянного тока ...	110
4.4. Совмещенное планирование эксперимента .....	112
4.4.1. Понятие совмещенного планирования эксперимента и критерии его оптимальности .....	112
4.4.2. Нормирование и приведение критериев оптимальности плана .....	115
4.4.3. Целевая функция выбора оптимального совмещенного плана экспери- мента .....	116
4.4.4. Пример моделирования теплового состояния турбогенератора .....	118
4.5. Планирование эксперимента в критериальной форме .....	123
Выводы .....	126
<b>Глава 5. Методы сокращения длительности ресурсных испытаний</b> .....	129
5.1. Прогнозирование ресурса по времени и режиму нагружения испытаниями по G- и Q-оптимальным планам эксперимента .....	132
5.2. Оценка долговечности путем испытаний или за счет эквивалентных и «раз- упрочненных» материалов .....	136
5.2.1. Испытания эквивалентных материалов .....	136
5.2.2. Испытания «разупрочненных» материалов .....	141
5.2.3. Экспериментальное исследование ускоренных испытаний с примени- ем «разупрочненного» материала .....	142
5.3. Форсирование нагрузки целенаправленной сборкой изделия .....	147
5.4. Сокращение длительности ресурсных испытаний варьированием соотноше- ния и очередности видов нагружения .....	149
5.5. Испытания моделированием влияния рабочей и окружающей сред .....	152
5.6. Испытания на эквивалентных нагрузках .....	155
5.7. Ускоренное моделирование газовой коррозии лопаток турбин .....	156
5.7.1. Моделирование коррозионной стойкости .....	156
5.7.2. Ускоренный метод моделирования коррозионной стойкости .....	158
5.7.3. Комплексное ускоренное моделирование прочности лопаток в условиях коррозионно-активной среды .....	160
5.8. Оценка долговечности элементов узлов изделия по косвенным параметрам ..	162
5.9. Совместная реализация нескольких методов сокращения длительности ресурсных испытаний .....	165
Выводы .....	170
<b>Список литературы</b> .....	173