

1558504

На правах рукописи

ЛЕДЯКОВА АННА БОРИСОВНА

**СТОХАСТИЧЕСКОЕ ОЦЕНИВАНИЕ НАКОПЛЕНИЯ ПОВРЕЖДЕНИЙ
ПРИ ПЕРЕМЕННОМ РЕЖИМЕ НАГРУЖЕНИЯ**

05.13.16 - Применение вычислительной техники, математического
моделирования и математических методов в научных исследованиях

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук



Москва 1998

Работа выполнена в Московском государственном техническом
университете имени Н.Э. Баумана

Научный руководитель - кандидат физико-математических наук,
доцент Белов В.Н.

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Темис Ю.М.

кандидат технических наук, с.н.с

Давыдов Э.Т.

НТБ МГТУ им. Н.Э. Баум



1558504

Ледякова А.Б. Стохас

Ведущая организация - ГНЦ НАМИ

Защита диссертации состоится "9" июня 1998 г. в 11.00 час. на
заседании диссертационного совета Д053.15.12 при Московском государственном
университете имени Н.Э. Баумана по адресу : 107005 Москва, 2-я

хранится в библиотеке МГТУ имени Н.Э.Баумана.

мая 1998 г.

1558504

представлен в одном экземпляре , заверенный печатью
по адресу: 107005 Москва, 2-я Бауманская ул., д.5.,
секретарю диссертационного совета.

Волков И.К.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы

Испытания на долговечность, в результате которых определяются основные показатели надежности, для невосстанавливаемых изделий с большим сроком службы часто становятся сложной проблемой. Сокращения продолжительности испытаний можно добиться различными способами.

В данной диссертации рассматриваются вопросы, связанные с ускоренными испытаниями, основанными на статистических методах прогнозирования.

Большое количество публикаций в нашей стране и за рубежом посвящено методам априорного вероятностного анализа и статистической оценке по результатам испытаний, а также вопросам определения коэффициента ускорения испытаний и обоснованию возможности использования результатов предварительных исследований для новых партий изделий. Решены многие задачи, связанные с принципами планирования и проведения ускоренных, в том числе форсированных испытаний, предполагающих функционирование изделия в более жестком по сравнению с указанным в нормативно-технической документации режиме. Отметим здесь исследования Карташова, Кордонского, Перроте, Пешеса, Степановой, Седякина, Благовещенского, Тескина, Сингпурвалла, Нельсона, Кокса и др.

Различают структурные (ориентированные на структуру конкретного материала) и феноменологические (результат обобщений экспериментальных данных) модели накопления повреждений (МНП).

Многие предложенные в настоящее время методики ускоренных испытаний основаны на известных в теории надежности феноменологических МНП. За последние десятилетия разработано сотни таких моделей, но до сих пор не существует четкого разграничения областей применения и корректного обоснования правомерности их использования. Применение широкого ряда таких моделей зачастую, особенно при переменном нагружении, дает результаты, противоречащие данным эксперимента. Попытки создать универсальную модель приводят к формализованным схемам, далеким от конкретных приложений. Фактически речь идет об описании экспериментальных данных без учета реальных деградационных физико-химических процессов, протекающих в изделии. В ряде случаев требуемая для практических целей точность достигается путем введения

НЕ УБИДАЕТСЯ НА ДОМ

пяти-шести параметров. Этим недостатком обладают и модели кумулятивного накопления повреждений на основе цепи Маркова.

Целью работы, таким образом, является создание достаточно общей стохастической модели, позволяющей естественным образом учесть специфику процессов деградации конкретного материала или конструкции, в том числе многостадийность процесса накопления повреждений.

Основные задачи исследований:

1. Выявление общей природы линейных и нелинейных моделей накопления повреждений, а также классификации существующих МНП на основе стохастического подхода.
2. Разработка многостадийной стохастической модели систем, нагружаемых в переменном режиме.
3. Разработка методов обработки результатов ускоренных испытаний, основанных на предлагаемой модели.
4. Исследование долговечности изделий при переменном нагружении по данным о долговечности этого изделия при постоянных нагрузках.
5. Исследование на основе предложенного подхода зависимости между циклической долговечностью и различными характеристиками надежности изделия, получаемыми в результате кратковременных испытаний.
6. Экспериментальное подтверждение инвариантности существующих зависимостей между ненаблюдаемыми одновременно характеристиками надежности систем.

Научная новизна работы заключается в оценивании многостадийного процесса накопления повреждений при переменном нагружении с точки зрения стохастического подхода, разработке методов оценивания инвариантных функциональных зависимостей между ненаблюдаемыми одновременно характеристиками надежности систем по результатам испытаний только в переменных режимах нагружения, а также в получении с их помощью и исследовании таких зависимостей.

Основные результаты, выносимые на защиту:

1. Разработана многостадийная стохастическая МНП циклически нагружаемых изделий в переменном режиме. В основу модели положена зависимость между различными характеристиками надежности изделия, полученными в результате долговременных и сокращенных испытаний.
2. Исследован универсальный критерий выполнимости феноменологических

МНП, свидетельствующий об их общей природе и являющийся естественным классификатором этих моделей.

3. Предложены и исследованы два метода оценивания такой функциональной зависимости (см. п.1)
 - статистический, основанный на анализе маргинальных функций распределения отказов;
 - численно-аналитический метод поиска функциональной зависимости с использованием ортогональных разложений, позволяющий прогнозировать долговечность изделия в стационарном режиме по данным в переменных режимах.
4. На основе многостадийной стохастической модели разработан алгоритм прогнозирования долговечности изделия в переменном режиме по долговечности этого же изделия в заданных стационарных режимах, а также указан алгоритм обратного пересчета.
5. Создана методика обработки результатов ускоренных испытаний, использующих такие функциональные зависимости, реализованная в виде прикладного программного обеспечения "Кварц 1.0".
6. Предложенная модель апробирована на представительных данных усталостных испытаний на долговечность образцов из конструкционных и композиционных материалов и др.

Достоверность и обоснованность научных положений подтверждается сравнением результатов расчетов, полученных на их основе, с представительными данными усталостных испытаний образцов из конструкционных и композиционных материалов. Причем частные выводы диссертации, сделанные на основе анализа результатов прогноза долговечности изделия в заданном режиме, совпадают с известными выводами теории усталости.

Практическая ценность работы состоит в том, что проведенные исследования дали возможность существенно повысить точность прогнозирования долговечности изделия в заданном режиме, а также позволили отойти от интегральных оценок при прогнозе и оценивать долговечность конкретного образца по данным о поведении того же изделия при переменных нагрузках.

Разработана ориентированная на использование вычислительной

техники методика обработки результатов ускоренных испытаний, использующих функциональную зависимость между характеристиками надежности одного и того же изделия при разных нагрузках (если она существует). Методика реализована в рамках программного приложения “Кварц 1.0” под операционную оболочку WINDOWS 95, а также адаптированного под операционную систему MS-DOS. Приложение включает интегрированную среду исследователя, систему управления базой данных (СУБД) результатов усталостных испытаний и экспертную систему, позволяющую давать рекомендации по выбору исследуемой функциональной зависимости.

Результаты работы внедрены в АО “Телеком” (г. Москва) и Калужском НИИ телемеханических устройств, что подтверждено соответствующими актами.

Апробация работы и публикации: основные результаты работы обсуждались на Российской НТК “Автоматизация исследования, проектирования и испытаний сложных технических систем” (г. Калуга, 1993 г.), межрегиональной научно-технической конференции “Энерго- и ресурсосберегающие экологически чистые технологии, повышение конструктивно-технологических показателей качества промышленной продукции народного хозяйства РФ” (г. Фрязино, 1995 г.), НТК МГТУ им.Н.Э.Баумана, посвященной 165-летию МГТУ им.Н.Э.Баумана (Москва, 1995 г.), региональной НТК “Социально-экономические проблемы управления производством, создание прогрессивных технологий, конструкций и систем в условиях рынка” (г. Калуга, 1996 г., 1997 г.), IV Всероссийской НТК “Состояние и проблемы технических измерений” (Москва, 1997 г.), областной научно-методической конференции “Новые технологии в промышленности и высшем образовании” (г. Камышин, 1995 г., 1998 г.),

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 78 наименований, четырех приложений и изложена на 195 страницах, включая 28 листов иллюстраций и 64 таблицы. Объем приложений - 36 страниц.

Работа была выполнена при научной консультации д.т.н., профессора, академика Международной славянской академии Карташова Г.Д., за что автор выражает ему свою благодарность.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе проведен обзор литературы по теме исследований, дана постановка задач диссертационной работы.

Вводятся понятия и определения, на основе которых будет дано описание единого подхода к стохастическому оцениванию НП при переменном нагружении. Указывается, что изделие в теории надежности рассматривается как физическая система, характеризуемая набором конструктивных параметров $\bar{\omega}$, технических параметров $\bar{X} = \bar{X}(\bar{\omega}_0, t, \varepsilon)$, а также моментом отказа $\xi = \xi(\bar{\omega}_0, \varepsilon)$, $t \geq 0, \varepsilon \in E$ (E – множество режимов функционирования изделия).

Проводится обзор ряда известных в настоящее время моделей накопления повреждений. Цель такого обзора – выявление общей природы и последующей классификации огромного числа МНП, предложенных исследователями-практиками. Рассматриваются результаты исследований в области структурных моделей прочности, а также МНП, созданные на основе полуэмпирического (феноменологического) подхода. Обсуждаются критерии выполнимости феноменологических МНП и некоторые проблемы, связанные с проверкой адекватности тех или иных моделей. В частности указывается, что аддитивно-марковские МНП (модели Пальмгрена-Майнера, Пешеса-Степановой, Козлова-Серенсена, Седякина), обладающие свойством линейного суммирования повреждений, выполнимы тогда и только тогда, когда между моментами отказов изделий ξ_1 и ξ_2 в разных режимах функционирования ε_1 и ε_2 существует линейная связь вида

$$\xi_1 = K(\varepsilon_1, \varepsilon_2) \cdot \xi_2, \quad (1)$$

где $K(\varepsilon_1, \varepsilon_2)$ – коэффициент ускорения испытаний. Этот факт на основе достаточно общих предположений доказан Карташовым Г.Д.

Формулируется принцип инвариантности Карташова, положенный в основу разрабатываемой стохастической МНП. Принцип инвариантности утверждает, что существует такой набор конструктивных параметров $\bar{\omega}$, при котором производство не может изменить функций $\xi = \xi(\bar{\omega}_0, \varepsilon)$ и $\bar{X} = \bar{X}(\bar{\omega}_0, t, \varepsilon)$, $\bar{\omega}_0 \in \Omega_0$ (Ω_0 – множество возможных значений) или в краткой формулировке: функции $\xi = \xi(\bar{\omega}_0, \varepsilon)$ и $\bar{X} = \bar{X}(\bar{\omega}_0, t, \varepsilon)$ инвариантны (неизменны) в процессе производства.

Излагаются основные результаты работ по оцениванию стохастической, а также функциональной зависимостей между ненаблюдаемыми одновременно характеристиками надежности изделий.

В заключение главы 1 анализируются основные проблемы, возникающие при стохастическом оценивании накопления повреждений при переменном режиме нагружения. Это существенные ошибки в прогнозе долговечности при использовании моделей, не учитывающих реальных физико-химических деградационных процессов, протекающих в изделии. Кроме того, при описании многостадийного процесса накопления повреждений трудно корректно разграничить стадии, что также приводит к значительным ошибкам в прогнозе именно при переменном нагружении. В связи с этим, формулируются основные цели настоящего исследования, позволяющие решить эти проблемы.

Во второй главе определяются и формулируются предпосылки создания многостадийной стохастической нелинейной МНП:

- 1) в обоих режимах ε_1 и ε_2 имеет место общий доминирующий процесс деградации;
- 2) до момента достижения деградационным процессом одной точки в разных условиях ε_1 и ε_2 время изменяется по нелинейному закону;
- 3) если между моментами отказов изделия ξ_1 и ξ_2 в режимах ε_1 и ε_2 существует функциональная зависимость, то она является общей для многих стадий процесса накопления повреждений.

На их основе разрабатывается многостадийная стохастическая модель накопления повреждений и исследуется критерий ее выполнимости. Указывается, что при соответствующем преобразовании информативного параметра (время, число циклов нагружения) нелинейное критериальное уравнение может быть преобразовано в линейное.

Рассматриваются модели накопления повреждений в общей формулировке

$$\frac{E\tau_1}{E\xi_1} + \frac{E\psi(\tau_2)}{E\psi(\xi_2)} = 1 \quad (2)$$

для испытаний в двухступенчатом режиме

$$\tilde{\varepsilon}_{12} = \begin{cases} \varepsilon_1, 0 \leq t \leq \tau_1, \\ \varepsilon_2, t > \tau_1, \end{cases} \dots$$

где τ_1 – наработка на ступени ε_1 , τ_2 – наработка на ступени ε_2 конкретного изделия при испытании их по программе $\tilde{\varepsilon}_{12}$, ξ_i – наработка до отказа в стационарном режиме $\varepsilon_i, i = 1, 2$.

С использованием новой шкалы счета $\xi_3 = \psi(\xi_2)$ и $\tau_3 = \psi(\tau_2)$ соотношение (2) преобразуется к виду

$$\frac{E\tau_1}{E\xi_1} + \frac{E\tau_3}{E\xi_3} = 1, \quad (3)$$

что совпадает с формулировкой принципа Пальмгрена-Майнера в стохастической интерпретации.

Показано, что при наличии стохастической зависимости между моментами отказов изделия ξ_1 и ξ_2 , описываемой распределением $Q_{12}(t|\tau) = P\{\xi_2 < t | \xi_1 = \tau\}$, имеет место аналогичная стохастическая зависимость $Q_{13}(t|\tau)$ между моментами отказов изделия ξ_1 и $\xi_3 = \psi(\xi_2)$. Тогда в предположении, что существует $Q_{12}(t|\tau)$, модель (2) справедлива тогда и только тогда, когда

$$\xi_1 = K(\varepsilon_1, \varepsilon_2) \cdot \psi(\xi_2) \quad (4)$$

Соотношение (4) свидетельствует об общей природе линейных и нелинейных МНП и является их естественным классификатором: если в (4) $\psi(\xi_2) \equiv \xi_2$, то следует использовать аддитивно-марковские МНП, а если функция $\psi(\xi_2)$ относится к классу нелинейных – соответственно нелинейные МНП.

Указывается существенная практическая значимость (4) – соотношение (4) позволяет не только находить однозначную зависимость между наработками ξ_1 и ξ_2 , но и согласно принципу инвариантности эта зависимость имеет место для всех партий изделий.

Показано также, что зависимость (4) описывает все стадии накопления повреждений.

На основе (2) и (4) формулируется стохастическая многостадийная модель накопления повреждений, позволяющая осуществлять прогноз долговечности изделия при переменном нагружении.

Разрабатывается использующая предложенную МНП процедура расчета наработок до отказа в переменном режиме по данным наработок до отказа в стационарных режимах в нелинейном случае, а также предлагается схема обратного пересчета.

Третья глава посвящена созданию методов обработки результатов ускоренных испытаний, основанных на предложенной в главе 2 модели.

Предлагается алгоритм экспериментальной проверки адекватности этой МНП. Указывается, что расчетная выборка, необходимая для реализации алгоритма, формируется на основе зависимости между различными показателями надежности изделия, полученными в результате длительных и кратковременных испытаний (моменты отказов изделия в форсированном и эксплуатационном режимах). Причем эти показатели являются ненаблюдаемыми одновременно параметрами.

Разрабатывается статистический подход к оцениванию такой функциональной зависимости, являющейся развитием метода равных вероятностей, из которого следует

$$P_2(t) = P(\xi_2 \geq t) = P(\varphi(\xi_2) \geq \varphi(t)) = P_1(\varphi(t)), \quad (5)$$

где ξ_2 – момент отказа в режиме ε_2 , $P_i(t)$ – вероятность безотказной работы изделия за время t в режиме $\varepsilon_i, i=1,2$. На основе (5) определяется класс функций, к которым относится исследуемая зависимость. Оцениваются ее неизвестные параметры в предположении, что экспериментальные зависимости описываются одним из наиболее используемых в этой области теоретических распределений (таблица 1).

Показано, что оценки параметров, полученные в соответствии со статистическим методом (таблица 1), совпадают с оценками, полученными по методу максимального правдоподобия.

Таблица 1

Маргинальные распределения отказов	Вид зависимости	Оценки параметров
<u>Описываемое степенной функцией</u> $F_i(t) = 1 - \left(1 - \frac{t}{\alpha_i}\right)^{\beta_i}$	$\xi_1 = \gamma_1 - \alpha(\gamma_2 - \xi_2)^\beta$	$\hat{\alpha} = \frac{\hat{\alpha}_1}{\hat{\alpha}_2^{\hat{\beta}_2/\hat{\beta}_1}}, \hat{\beta} = \hat{\beta}_2/\hat{\beta}_1$ $\hat{\gamma}_1 = \hat{\alpha}_1, \hat{\gamma}_2 = \hat{\alpha}_2,$ $\hat{\alpha}_i, \hat{\beta}_i, \hat{\gamma}_i$ – выборочные оценки параметров распределения соответствующих выборок
<u>Распределение Вейбулла</u> $F_i(t) = 1 - e^{-\frac{(t-\gamma_i)^{\beta_i}}{\alpha_i}}$ трехпараметрическое двухпараметрическое параметры сдвига $\gamma_1 = \gamma_2 = 0$ однопараметрическое параметры формы равны: $\beta_1 = \beta_2$ (однопараметрическое экспоненциальное)	$\xi_1 = \alpha(\xi_2 - \gamma_2)^\beta + \gamma_1$ $\xi_1 = \alpha \xi_2^\beta$ $\xi_1 = K(\varepsilon_1, \varepsilon_2) \cdot \xi_2$	$\hat{\alpha} = \frac{\hat{\alpha}_1}{\hat{\alpha}_2^{\hat{\beta}_2/\hat{\beta}_1}}, \hat{\beta} = \hat{\beta}_2/\hat{\beta}_1, \hat{\alpha}_i, \hat{\beta}_i, \hat{\gamma}_i -$ выборочные оценки параметров распределения соответствующих выборок $\hat{K}(\varepsilon_1, \varepsilon_2) = \frac{\hat{\mu}_1}{\hat{\mu}_2}, \hat{\mu}_i, i = 1, 2 - \text{выборочные средние соответствующих выборок}$
<u>Логарифмически нормальное распределение</u> $F_i(t) = \frac{1}{\sigma_i \sqrt{2\pi}} \int_0^t e^{-\frac{(\ln(x-\gamma_i)-\mu_i)^2}{2\sigma_i^2}} \cdot x^{-1} dx$ для $x > \gamma_i$, трехпараметрическое двухпараметрическое $\gamma_1 = \gamma_2 = 0$ однопараметрическое параметры формы равны: $\beta_1 = \beta_2$	$\xi_1 = \alpha(\xi_2 - \gamma_2)^\beta + \gamma_1$ $\xi_1 = \alpha \xi_2^\beta$ $\xi_1 = K(\varepsilon_1, \varepsilon_2) \cdot \xi_2$	$\hat{\alpha} = e^{(\hat{\mu}_1 - (\hat{\sigma}_1/\hat{\sigma}_2)\hat{\mu}_2)}, \hat{\beta} = \hat{\sigma}_1/\hat{\sigma}_2,$ $\hat{\mu}_i, \hat{\sigma}_i$ – выборочные средние и дисперсии случайных величин $\ln \xi_i$ соответствующих выборок $\hat{K}(\varepsilon_1, \varepsilon_2) = e^{(\hat{\mu}_1 - \hat{\mu}_2)}, \hat{\mu}_i, i = 1, 2 - \text{выборочные средние соответствующих выборок}$

Получение наиболее точного прогноза долговечности изделия возможно, когда имеет место функциональная зависимость между наработками изделия до отказа в форсированном (жестком) ε_1 и эксплуатационном (нормальном) ε_2 режимах

$$\xi_1 = \phi(\xi_2), \quad (6)$$

а также обратная ей функция

$$\xi_2 = \phi^{-1}(\xi_1) = \psi(\xi_1). \quad (7)$$

Но оценивание исследуемых зависимостей (6), (7) по результатам испытаний только в переменных режимах $\varepsilon_{12}, \varepsilon_{21}$ (без данных о наработках до отказа в стационарных режимах) оказывается достаточно сложной задачей.

Для ее решения предложен численно-аналитический метод, основанный на разложении функций (6), (7) по ортогональному базису (функции Уолша, многочлены Чебышева, Лежандра и другие ортонормированные системы).

Аналитическая часть предлагаемого метода заключается в описании исследуемой функциональной связи, инвариантной для всех партий изделий, посредством системы нелинейных уравнений

$$\begin{cases} \xi_1^i = \tau_1^i + \phi(\xi_{12}^i), i = 1, \dots, N_1, \\ \xi_2^j = \tau_2^j + \phi^{-1}(\xi_{21}^j), j = 1, \dots, N_2, \end{cases} \quad (8)$$

где τ_i – наработка на ступени ε_i , а ξ_{ij} – наработка на ступени ε_j конкретного изделия при испытании их по программе ε_{ij} , ξ_i – наработка до отказа в стационарном режиме $\varepsilon_i, i = 1, 2$, N_1, N_2 – объемы выборок, испытанных соответственно по программам $\varepsilon_{12}, \varepsilon_{21}$. Каждое уравнение (8) соответствует испытанию конкретного образца

Показано, что исходная задача может быть сведена к эквивалентной задаче, решаемой с помощью метода наименьших квадратов.

Посредством ортогонального разложения функций (6), (7) такая система была представлена в виде переопределенной системы линейных алгебраических уравнений

$$Ax = b. \quad (9)$$

Причем вектор-столбец x включает неизвестные коэффициенты разложения по выбранному ортонормированному базису исследуемых функций (6), (7).

Сравнивается эффективность различных ортогональных базисов применительно к решению этой задачи. Рекомендуется использовать при решении данной задачи базис многочленов Лежандра.

Подход апробируется на конкретных экспериментальных данных усталостных испытаний стальных образцов, нагружаемых циклически.

Указывается, что при идентификации зависимости по результатам испытаний только в переменных режимах задача оказывается некорректно

поставленной: оценки неизвестных вектор - функций могут сильно изменяться под влиянием малых погрешностей в измерениях. Проводится выбор регуляризирующего алгоритма, позволяющего получать устойчивые относительно возмущений оценки неизвестных параметров (рис.1).

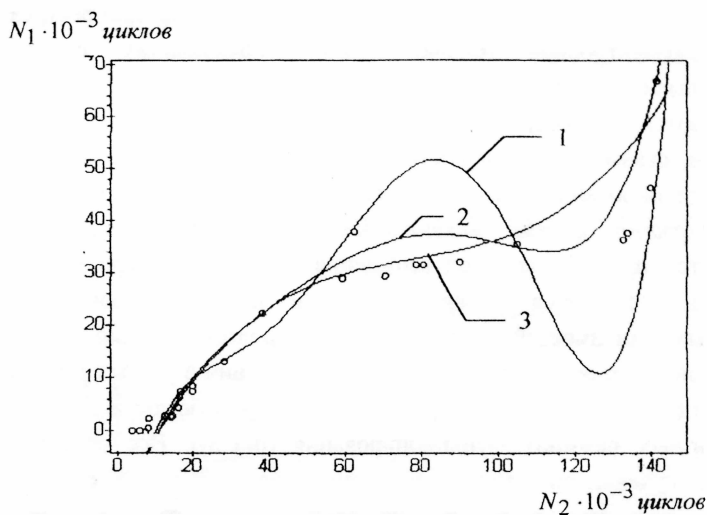


Рис. 1. Сравнение эффективности регуляризирующих алгоритмов

1. Регуляризация с помощью сингулярного анализа;
 2. Комбинированный метод, использующий удаление переменных, прямую регуляризацию и приписывание дополнительных строк;
 3. Приписывание дополнительных строк;
- ° - экспериментальные данные .

Предложенные методы (статистический и численно-аналитический) сравниваются по критерию вычислительной сложности и границам применимости. Статистический метод проще в вычислительном плане. Однако численно-аналитический метод не только не требует знания теоретической функции распределения, описывающей моменты отказов, но и позволяет оценивать долговечность изделия в стационарном режиме по данным о его долговечности только при переменном нагружении.

На основе этих методов разрабатывается методика оценивания функциональной зависимости между характеристиками надежности систем в разных режимах функционирования.

Четвертая глава посвящена экспериментальной апробации предложенной модели, использующей исследуемую функциональную зависимость. Апробация проводилась на широко известных результатах усталостных испытаний, связанных с накоплением повреждений в конструкционных материалах (стальные образцы), композиционных материалах (пьезокерамические образцы), а также с расходом ресурса в изделиях радиоэлектронной техники (лампы накаливания, сложные радиоэлектронные системы).

Описываются исследуемые изделия, выделяются инвариантные характеристики, связывающие скорость накопления повреждений в разных режимах функционирования. В частности, оцениваются выборочные функции распределения отказов, а также - механических характеристик изделий.

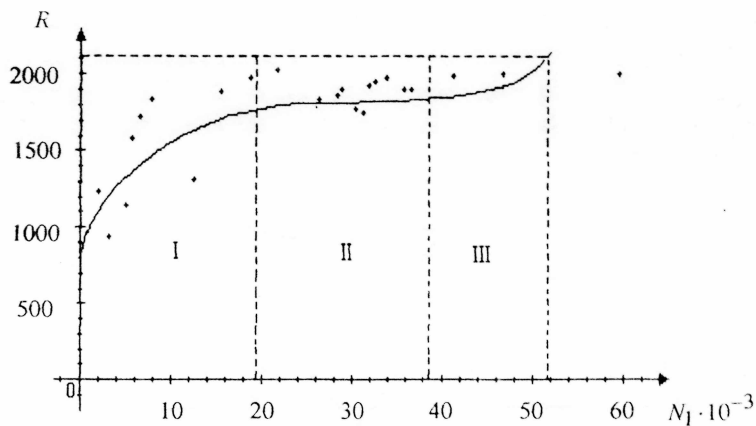
Проводится практическое подтверждение принципа инвариантности. В том числе исследуется инвариантность в процессе производства функциональных зависимостей между циклической долговечностью изделия и его остаточной прочностью для результатов испытаний в разных режимах однотипных изделий (рис.2 а), б)), а также между наработками до отказа объектов в разных режимах функционирования (рис.3)). Все оцененные зависимости получены по данным испытаний разных серий образцов. Зависимости относятся к классу четырехпараметрических степенных функций и отражают многостадийность процесса накопления повреждений.

Обоснована возможность прогноза одной характеристики надежности изделия по данным о другой.

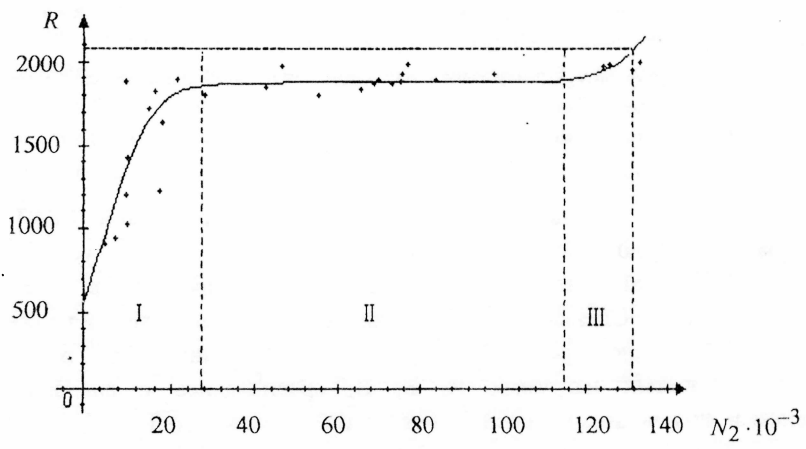
На основе предложенных методов изучается взаимозависимость различных механических характеристик конструкционных и композиционных материалов.

Исследуется функциональная зависимость между нижним пределом текучести стали L и начальной прочностью образцов R . Зависимость относится к классу степенных функций ($L = a(R - c)^b$, a, b, c - параметры зависимости). Подтверждается возможность прогноза нижнего предела текучести стальных образцов в заданном режиме по данным испытаний в другом эксплуатационном режиме.

Подтверждена также возможность прогнозирования долговечности пьезокерамических образцов τ по данным об их остаточной прочности, полученной при динамическом нагружении σ . Исследуемая зависимость имеет вид $\tau = \exp(\alpha \sigma^\beta - N_0)$, α, β, N_0 - некоторые действительные константы.



а)



б)

Рис.2. Зависимость динамической прочности образца (МПа)
от циклической долговечности образца (в циклах)
а) от долговечности, измеренной при нагрузке S_1 (666.7 МПа);
б) от долговечности, измеренной при нагрузке S_2 (533.3 МПа);
+ - экспериментальные данные.

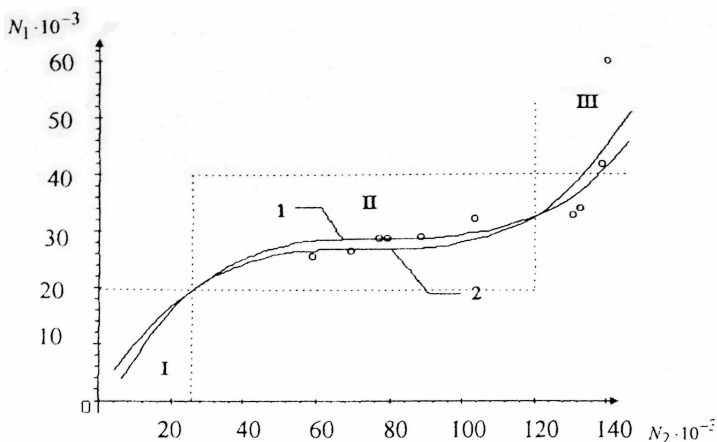


Рис. 3. Функциональная связь между долговечностями N_1 и N_2 образцов (в циклах) в разных режимах функционирования

- 1 - зависимость $N_1 = \varphi(N_2)$, полученная на основе анализа зависимостей $R = \phi^{-1}(N_1)$ и $R = \psi^{-1}(N_2)$;
 2 - зависимость $N_1 = \varphi(N_2)$, полученная на основе численно-аналитического метода, изложенного в главе 3;
 о - экспериментальные данные.

Проверена адекватность предложенной стохастической МНП при программном (блочном) нагружении для конкретных данных усталостных испытаний образцов из стали 20Х (эксперимент проведен в Институте машиноведения). Оценки математического ожидания долговечности образца в эксплуатационном режиме, полученные по данным при различных многоступенчатых нагрузках А, Б, В, сравнивались с аналогичными оценками, полученными на основе известных линейных МНП (таблица 2).

Таблица 2

I (контрольная)	$MO_{III-I} \cdot 10^{-3}$	$MO_{IV-I} \cdot 10^{-3}$	$MO_{V-I} \cdot 10^{-3}$	Примечание
$MO = 289.0 \cdot 10^3$ (в циклах)	301.3 +4.5%	289.3 +0.1%	238.9 -17.6%	Нелинейная (4)
	280.0 -3.5%	371 -32.6%	70.1 -75.5%	Пальмгрена-Майнера
	297.0 +2.7%	218.3 -24.5%	106.3 -63.3%	Серенсена-Козлова

В приложении приводятся описания результатов усталостных испытаний, а также программного обеспечения “Кварц 1.0”, реализующего методику, разработанную в главе 3.

В заключении обобщаются результаты диссертационной работы, формулируются выводы и основные положения, выносимые на защиту.

ВЫВОДЫ

На основании проведенных исследований можно сделать следующие научные выводы и практические предложения:

1. Проведенный анализ широко известных данных усталостных испытаний подтверждает, что между моментами отказов одного и того же изделия в разных режимах, как правило, существует функциональная зависимость. В большинстве случаев она относится классу двух - четырехпараметрических степенных функций.
2. Показано, что такая зависимость инвариантна в процессе производства и во времени.
3. Полученные зависимости отражают многостадийность процесса накопления повреждений. В связи с этим, графики зависимостей могут быть условно разделены на две или более стадий, на каждой из которой участок кривой (4) может быть аппроксимирован прямой (1). В этом случае можно говорить о выполнимости аддитивно-марковских моделей на исследуемой стадии (в частности, при прогнозировании остаточного ресурса).
4. Статистический анализ подтвердил, что при снятии нагрузки с испытываемого образца имеет место известный из теории усталости “эффект упрочнения”, а при приложении нагрузки приблизительно равной пределу выносливости образца - эффект “разупрочнения”. Причем на основе предложенного подхода можно количественно оценить влияние этих эффектов на процесс накопления повреждений.
5. Появляется возможность создания банка определяющих соотношений между моментами отказов в разных режимах для различных технических изделий, что позволило бы корректно разграничивать области применимости той или иной МНП с целью повышения точности прогнозирования остаточного ресурса.
6. Получение наиболее точного прогноза долговечности изделия при переменном нагружении по результатам ускоренных испытаний возможно, когда имеет место функциональная зависимость между наработками изделия до отказа в эксплуатационном режиме и некоторой характеристикой надежности изделия (например, остаточной прочностью,

полученной при динамическом нагружении). Подтвердив существование такой зависимости, инвариантной для всех партий изделий, и, зная расчетную прочность конкретного образца, можно уже на стадии проектирования прогнозировать его долговечность. Таким образом, исследования зависимостей между различными характеристиками надежности одного и того же изделия являются перспективными.

РАБОТЫ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Ледякова А.Б. О некоторых подходах к решению плохо обусловленных линейных систем // Автоматизация исследования, проектирования и испытания сложных технических систем: Тез. докл. Российской НТК.- Калуга, 1993. - С. 62.
2. Белов В.Н., Ледякова А.Б. Прогнозирование надежности изделий в условиях нелинейного суммирования повреждений // Новые технологии в промышленности и высшем образовании : Тез. докл. областной научно-методической конференции. - Камышин, 1995. - С. 27-28.
3. Ледякова А.Б. Зависимость между показателями надежности изделий в разных температурных режимах // Тез. докл. НТК МГТУ им.Н.Э.Баумана, посвященной 165-летию МГТУ им.Н.Э.Баумана. - М., 1995.-Часть II.- С.163.
4. Домрачев В.В., Ледякова А.Б. Об оценке показателей надежности систем на основе распределения вероятностей // Оптимизация и моделирование в автоматизированных системах: межвуз. сб. научн. трудов. - Воронеж, 1995. - С.202-209.
5. Белов В.Н., Ледякова А.Б. Оценивание функций связи между показателями надежности систем в разных режимах функционирования при блочном нагружении // Надежность и контроль качества. Статистические методы. - 1996. - №1. - С.26-32.
6. Ледякова А.Б. О многостадийной стохастической модели накопления повреждений // Социально-экономические проблемы управления производством, создание прогрессивных технологий, конструкций и систем в условиях рынка: Тез. докл. межрегиональной НТК. - Калуга, 1997. - С.42.
7. Белов В.Н., Ледякова А.Б. Классификация моделей накопления повреждений по областям применения на основе стохастического подхода // Состояние и проблемы технических измерений: Тез. докл. IV Всероссийской НТК. - М., 1997. - С.293.
8. Ледякова А.Б. Метод прогнозирования долговечности изделия в стационарном режиме по результатам испытаний в двухступенчатых режимах нагружения // Состояние и проблемы технических измерений: Тез. докл. IV Всероссийской НТК. - М., 1997. - С. 294.

Подписано к печати 26.04.98 г. Зак. 81. Объем 1.0 п.л. Тираж 100 экз.

Типография МГТУ им.Н.Э. Баумана