

М 498414

Министерство РСФСР по науке, высшей школе  
и технической политике

Московский ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции  
и ордена Трудового Красного Знамени государственный  
технический университет им. Н.Э.Баумана

---

На правах рукописи  
УДК 668.562

Криволапов Сергей Яковлевич

ПРИМЕНЕНИЕ МОДЕЛЕЙ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ  
С ПЕРЕМЕННЫМ РЕЖИМОМ  
К ЗАДАЧАМ КОНТРОЛЯ ДОЛГОВЕЧНОСТИ  
ТЕХНИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ

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

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

*С.Я.Криволапов*

МОСКВА - 1991

Работа выполнена в Конструкторском бюро  
Автотранспортного оборудования

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор  
Тескин О.И.

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,  
профессор Анисимов В.В.  
кандидат физико-математических наук  
Тимонин В.И.

Ведущая организация - Институт проблем управления  
АН СССР, г.Москва

зас  
гос  
адр

в II часов на  
ри Московском  
Э.Баумана по

ке МГТУ

Сове

ИН А.Г.

М 498414

Актуальность темы. Высокие требования к качеству современных технических изделий, в частности к их безотказности и долговечности, породили проблему подтверждения этих требований как на ранних этапах проектирования, так и на этапах конструкторских, доводочных и приемосдаточных испытаний. Для завершения этих испытаний в отведенные на разработку нового изделия сроки неизбежно приходится проводить так называемые "ускоренные испытания". Принято такие испытания подразделять на а) ускоренные в нормальном режиме (т.е. в режиме, соответствующем усредненным условиям эксплуатации, заданным в ТУ) и б) форсированные, когда режим испытаний является более жестким по сравнению с заданным в ТУ, в силу чего удается довести изделие до отказового состояния за более короткий срок (в сравнении с заданным сроком работы в ТУ). Второй способ позволяет существенно сократить сроки испытаний (до 10 и более раз), но требует глубокого инженерного анализа механизма отказов и обоснования моделей пересчета результатов испытаний с форсированного режима на нормальный.

Необходимость пересчета результатов испытаний возникает также в ситуации, когда номинальный режим эксплуатации является переменным во времени (детерминированным или случайным) и не представляется возможным воспроизвести этот режим при испытаниях.

Обоснования моделей пересчета проводятся в каждом конкретном случае применительно к конкретному классу изделий. Вместе с тем выбор методики обоснования и моделей пересчета должен опираться на достаточно общие принципы и математические модели. Разработке таких принципов и моделей посвящено большое число работ. Это, прежде всего, работы Г.Д.Карташова и его учеников, работы А.И.Перроте, Н.М.Седякина, Л.Я.Пешеса, М.Д.Степановой, В.Багдонавичюса, А.Н.Яврияна, Р.С.Судакова, М.Г.Акопова, М.П.Каминского, Е.С.Переверзева, Д.Кокса, Н.Сингпурваллы, У.Нельсона. Однако в этой области остается еще много



нерешенных проблем. Основной поток работ в области форсированных испытаний ориентирован на обработку результатов уже проведенных испытаний. Между тем для практики большой интерес представляют задачи планирования объемов контрольных испытаний в форсированных режимах. В этом направлении можно отметить лишь работы В.С.Переверзева, Р.С.Судакова, О.И.Тескина, которые не исчерпывают всей проблематики и лишь обозначают направление исследований.

Обычный подход к планированию объемов ускоренных испытаний состоит в том, что определяется коэффициент ускорения  $K$ , с помощью которого по времени испытаний  $t_0$  в нормальном режиме определяется время испытаний в форсированном режиме  $t_* = t_0/K$ . После этого используются методы планирования испытаний в нормальном режиме.

Имеются многочисленные примеры технических изделий, изготавливаемых малыми сериями или в единичных экземплярах (космическая техника, изделия атомной энергетики и др.). Для таких изделий не применим упомянутый метод планирования испытаний в форсированных режимах, так как при подтверждении высоких требований по надежности он требует большого числа испытываемых образцов. Вместе с тем, представляется целесообразным использовать наличие определенного запаса по надежности, обычно имеющегося у таких изделий для уменьшения количества испытываемых образцов за счет дополнительного увеличения режима нагружения.

Целью работы является разработка методов планирования контрольных испытаний на надежность технических изделий, номинальный режим функционирования которых является переменным во времени, при следующих предположениях:

а) наработка до отказа изделия в постоянном режиме принадлежит классу распределений с возрастающей в среднем функцией интенсивности;

б) номинальный режим функционирования является либо детерминированным, либо допускает представление в виде гауссовского случайного процесса.

Научная новизна. Получена формула, позволяющая вычислять доверительные границы показателей надежности (ПН) стареющих систем в нормальном переменном режиме работы по результатам испытаний в форсированном режиме. Установлена связь между средним значением случайного стационарного режима и эквивалентным режимом для случая, когда скорость расходования ресурса является выпуклой функцией. Доказана асимптотическая нормальность интеграла от нелинейной функции для некоторых классов нестационарных гауссовских процессов. Разработаны методы планирования контрольных испытаний на надежность для стареющих систем и изделий с параметрической моделью отказа, а также для случая, когда номинальный режим функционирования задается гауссовским случайным процессом. Для предложенных методов планирования испытаний доказано, что они обеспечивают заданные значения риска заказчика.

Достоверность результатов, полученных в работе, обеспечивалась за счет использования строгих теоретических результатов.

Практическая ценность. Цель диссертационной работы и все проведенные в ней теоретические исследования носят непосредственно прикладную направленность. Они призваны содействовать созданию эффективных методик контрольных испытаний на надежность технических изделий различного назначения. Полученные в диссертационной работе результаты были использованы:

- отделом надежности НПО "Орион" для оценки надежности радиовлектронной аппаратуры по результатам испытаний в ступенчатых режимах и для выбора допустимого переменного режима эксплуатации;

- отделом надежности КВ Автотранспортного оборудования для планирования испытаний опытных образцов электромеханических и гидравлических систем и для оценки остаточного ресурса систем, находящихся в эксплуатации при определении возможности продления назначенных показателей долговечности.

На защиту выносятся:

1. Метод вычисления доверительных границ показателей надежности изделий с возрастающей в среднем функцией интенсивности в нормальном режиме работы по результатам испытаний в форсированном режиме.

2. Установление связи между средним значением стационарного режима и эквивалентным режимом для случая, когда скорость расходования ресурса является выпуклой функцией.

3. Результат об асимптотической нормальности интеграла от нелинейной функции для некоторых классов нестационарных гауссовских процессов.

4. Методы планирования испытаний при контроле долговечности технических изделий с переменным режимом функционирования для изделий с возрастающей в среднем функцией интенсивности и изделий с параметрической моделью отказа.

5. Метод планирования испытаний на надежность технических изделий, режим эксплуатации которых описывается гауссовским случайным процессом.

Апробация работы. Результаты диссертации докладывались на Всесоюзном семинаре "Расчет и управление надежностью больших механических систем" (Ташкент, 1988); на 3-ей Всесоюзной конференции "Моделирование отказов и имитация статистических испытаний на ЭВМ ИМС и их элементов" (Суздаль, 1989); на 4-ой Всесоюзной научно-технической конференции "Применения многомерного статистического анализа в экономике и оценке качества продукции" (Тарту, 1989); на Всесоюзной научно-технической конференции "Применение статистических методов в производстве и управлении" (Пермь, 1990); на семинаре по прикладным методам теории вероятностей и математической статистики лаборатории статистических методов МГУ; на семинаре по прикладным методам теории надежности кабинета надежности Политехнического музея (Москва); на семинаре по надежности ИПУ АН СССР.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 11 печатных работ.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введе-

ния, четырех глав с выводами, заключения и библиографического списка из 90 наименований. Она содержит 89 страниц текста.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность выбранной темы, приведен обзор литературы, определена цель диссертационной работы. Представлен краткий обзор полученных результатов, данные об апробации и внедрении. Дана характеристика работы по главам.

В первой главе диссертации представлен обзор публикаций по теории форсированных испытаний применительно к задачам планирования испытаний на надежность, сформулированы модели зависимости долговечности от режима, в рамках которых осуществляется исследование. Описаны методы проверки исходных допущений по результатам испытаний.

Предполагается, что контроль надежности изделий по результатам испытаний производится по схеме с одним контрольным уровнем. В качестве исходных данных для планирования испытаний используются требуемый уровень  $N_T$  надежности и допустимое значение  $\beta$  риска  $\beta_0$  потребителя. Правило подтверждения требований к показателю надежности  $N$  состоит в следующем. Требования считаются выполненными, если

$$N_{1-\beta} \geq N_T, \quad (1)$$

где  $N_{1-\beta}$  - нижняя  $(1 - \beta)$  - доверительная граница показателя  $N$ , определяемая по результатам испытаний;

Правило (1) обеспечивает ошибку второго рода (риск заказчика) не более  $\beta$ :

$$\beta_0 = P\{N_{1-\beta} \geq N_T / N < N_T\} \leq \beta$$

В качестве показателей надежности (ПН) рассматриваются вероятность безотказной работы (ВБР)  $P(t_0, \tilde{\epsilon}_0)$  за требуемую наработку  $t_0$  в нормальном режиме функционирования  $\tilde{\epsilon}_0$  и гам-

ма-процентный ресурс  $t_p(\tilde{E}_0)$ .

Метод пересчета результатов испытаний с форсированного режима нагружения на нормальный основан на использовании модели аддитивного накопления повреждений, в которой отказ изделия при работе в переменном режиме  $\tilde{E} = \tilde{E}(t)$ ,  $\tilde{E}(t) \in E \subset R^n$ , происходит в момент времени  $\tau(\tilde{E})$ , такой, что

$$\int_0^{\tau(\tilde{E})} r[\tilde{E}(t')] dt = R,$$

где  $r(E)$  — положительная функция, имеющая смысл скорости расходования ресурса изделия при работе в режиме  $E$ ;

$R$  — предельный ресурс изделия, — случайная величина, распределение которой не зависит от режима  $\tilde{E}$ .

Оценивание функции  $r(E)$  основано на ее связи с  $\gamma$ -процентным ресурсом  $t_p(E)$  изделия в режиме  $E$ :

$$r(E) = C / t_p(E)$$

и использовании моделей зависимости  $\gamma$ -процентного ресурса различных типов изделий от факторов нагружения.

Вторая глава диссертации посвящена описанию моделей испытаний для детерминированных режимов нагружения. Приведены методы доверительного оценивания показателей надежности (ПН) в нормальном режиме работы по результатам испытаний в форсированном режиме для стареющих систем и изделий с параметрической моделью отказа.

#### Т е о р е м а 2...

Пуст наработка до отказа изделия в постоянном режиме принадлежит классу распределений с возрастающей в среднем функцией интенсивности. Если по результатам испытаний в форсированном режиме  $\tilde{E}_*$  получена нижняя  $q$ -доверительная граница  $P_q(t_*, \tilde{E}_*)$  вероятности безотказной работы (ВБР) за время  $t_*$ , то нижняя  $q$ -доверительная граница  $P_q(t_0, \tilde{E}_0)$  ВБР за время  $t_0$  в нормальном режиме  $\tilde{E}_0$  определяется по формуле

$$\frac{\mu(t_0, \tilde{E}_0)}{\mu(t_*, \tilde{E}_*)} \quad (2)$$

$$\underline{P}_q(t_0, \tilde{E}_0) = \underline{P}_q(t_*, \tilde{E}_*)$$

где

$$\mu(t_*, \tilde{E}_*) \geq \mu(t_0, \tilde{E}_0):$$

$$\mu(t, \tilde{E}) = \int_0^t r[\tilde{E}(\tau)] d\tau \quad (3)$$

- ресурс, выработанный изделием за время  $t$  в режиме  $\tilde{E}$ .

В теоремах 2.2 и 2.3 результат теоремы 2.1 распространен на случай, когда функция  $r(E)$  оценивается по результатам испытаний.

Рассматривается параметрическая модель отказа, в которой определяющий параметр в каждый момент времени имеет нормальное распределение, а скорость изменения параметра имеет постоянное математическое ожидание и дисперсию. Данная модель приводит к обратному гауссовскому распределению и к DM - распределению для наработки до отказа.

#### Л е м м а 2.1.

Если наработка до отказа подчинена обратному гауссовскому распределению или DM - распределению, то функция ускорения линейна тогда и только тогда, когда коэффициент вариации  $\sqrt{}$  скорости изменения определяющего параметра (ОП) от режима нагружения не зависит. Если выполнена модель АНП с ресурсной функцией  $r(E)$ , то функция  $\alpha(E)$ , описывающая скорость изменения ОП в режиме  $E$ , с точностью до константы совпадает с функцией  $r(E)$ .

#### Т е о р е м а 2.4.

Для DM - распределения нижняя  $q$ -доверительная оценка  $\underline{P}_q(t_0, E_0)$  ВБР за время  $t_0$  в режиме  $E_0$  определяется по формуле

$$\underline{P}_q(t_0, E_0) = \Phi\left(\frac{1 - \underline{a} t_0}{\sqrt{\underline{a} t_0}}\right),$$

где величина  $\underline{a}$  находится из уравнения

$$P_q(t_*, \varepsilon_*) = \Phi\left(\frac{1 - k(\varepsilon_0, \varepsilon_*) \underline{a} t_*}{\sqrt{k(\varepsilon_0, \varepsilon_*) \underline{a} t_*}}\right)$$

Т е о р е м а 2.5. Для обратного гауссовского распределения нижняя  $q$  - доверительная граница  $P_q(t_0, \varepsilon_0)$ . ВБР  $P(t_0, \varepsilon_0)$  за время  $t_0$  в режиме  $\varepsilon_0$  определяется по формуле

$$P_q(t_0, \varepsilon_0) = \Phi\left(\frac{1 - \underline{a} t_0}{\sqrt{\underline{a} t_0}}\right) - \exp\left(-\frac{2}{j^2}\right) \cdot \Phi\left(-\frac{\underline{a} t_0 + 1}{\sqrt{\underline{a} t_0}}\right)$$

где величина  $\underline{a}$  находится из уравнения

$$\begin{aligned} P_q(t_*, \varepsilon_*) &= \\ &= \Phi\left(\frac{1 - k(\varepsilon_0, \varepsilon_*) \underline{a} t_*}{\sqrt{k(\varepsilon_0, \varepsilon_*) \underline{a} t_*}}\right) - \exp\left(-\frac{2}{j^2}\right) \cdot \Phi\left(-\frac{k(\varepsilon_0, \varepsilon_*) \underline{a} t_* + 1}{\sqrt{k(\varepsilon_0, \varepsilon_*) \underline{a} t_*}}\right) \end{aligned}$$

Третья глава диссертационной работы посвящена обоснованию модели испытаний изделий со случайным режимом функционирования. Для стационарного режима эксплуатации установлена связь между средним значением режима и эквивалентным режимом.

Т е о р е м а 3.1. Пусть  $\tilde{\varepsilon}(t)$  стационарный случайный процесс с математическим ожиданием  $M \tilde{\varepsilon}(t) = m$ ,  $r(\varepsilon)$  - положительная монотонно возрастающая функция, такая, что процесс  $r[\tilde{\varepsilon}(t)]$  - обладает эргодическим свойством,  $\varepsilon^{(t)}$  - эквивалентный на интервале  $(0, t)$  режим. Тогда

а) если  $r(\varepsilon)$  - выпуклая вниз функция, то

$$P\{\varepsilon^{(t)} \geq m\} \xrightarrow[t \rightarrow \infty]{} 1$$

б) если  $r(\varepsilon)$  - выпуклая вверх функция, то

$$P\{\varepsilon^{(t)} \leq m\} \xrightarrow[t \rightarrow \infty]{} 1$$

Для построения модели испытаний используется представление функции надежности изделия при работе в случайном режиме  $\tilde{\varepsilon}$  в виде:

$$P(t, \tilde{E}) = P\{M(t, \tilde{E}) < R\}$$

Распределение случайной величины  $R$  совпадает с распределением величины  $r(E_s) \cdot \tilde{r}(E_s)$  для  $E_s \in E$  и может быть оценено по результатам форсированных испытаний. Случайная величина  $M(t, \tilde{E})$  имеет вид (3), ее распределение зависит от характеристик случайного процесса  $\tilde{E}(\tau)$ . Известно, что для стационарного гауссовского процесса  $\tilde{E}(\tau)$  с корреляционной функцией  $B(t)$ , обладающего свойством убывания корреляций вида

$$\int_0^\infty |B(t)| dt < \infty,$$

величина  $M(t, \tilde{E})$  имеет асимптотически нормальное распределение при  $t \rightarrow \infty$ . Рассматриваются обобщения этого утверждения на нестационарные гауссовские процессы.

**Т е о р е м а 3.2.**

Пусть  $\tilde{E}(\tau)$  - гауссовский процесс с корреляционной функцией  $B(t_1, t_2)$ ,  $r(E)$  - вещественная функция. При выполнении условий 1-6, перечисленных ниже, случайная величина  $M(t, \tilde{E})$  асимптотически нормальна при  $t \rightarrow \infty$ :

$$\frac{\int_0^t r[\tilde{E}(\tau)] d\tau - M\left[\int_0^t r[\tilde{E}(\tau)] d\tau\right]}{\left\{D\left[\int_0^t r[\tilde{E}(\tau)] d\tau\right]\right\}^{1/2}} \xrightarrow[t \rightarrow \infty]{d} N(0, 1) \quad (4)$$

Случайный процесс  $\tilde{E}(t)$  должен удовлетворять следующим условиям:

1.  $M[\tilde{E}(t)] = 0$
2.  $0 < C_1 \leq D[\tilde{E}(t)] \leq C_2$
3.  $\int_0^\infty |B(t_1, t_2)| dt_1 \leq C_3$
4. Существует такое  $t_0 > 0$ , что для всех  $0 < t_2 < t_0$   
 $\int_0^{t_0} B^2(t_1, t_2) dt_1 \geq C_4 > 0$

Функция  $r(\varepsilon)$  должна удовлетворять условиям:

5. Функция  $r(\varepsilon)$  непрерывна всюду на  $(-\infty, \infty)$ , положительна для  $\varepsilon \neq 0$ , строго возрастает при  $\varepsilon > 0$  и строго убывает при  $\varepsilon < 0$ .

6.  $\exists M\{r[\tilde{\varepsilon}(t)]\}$  и  $M\{r^2[\tilde{\varepsilon}(t)]\}$ , причем

$$M\{r^2[\tilde{\varepsilon}(t)]\} \leq C_5 \quad (5)$$

В условиях 1 - 6 величины  $C_i$  означают некоторые положительные константы.

Требования теоремы 3.2 на функцию  $r(\varepsilon)$  удается ослабить при наложении более жестких ограничений на поведение процесса  $\tilde{\varepsilon}(t)$ .

Т е о р е м а 3.3.

Сходимость (4) для гауссовского процесса  $\tilde{\varepsilon}(t)$  и действительной непрерывной функции  $r(\varepsilon)$  имеет место при выполнении следующих условий:

1.  $M[\tilde{\varepsilon}(t)] = C_1$ ;

2.  $D[\tilde{\varepsilon}(t)] = C_2$ ;

3.  $\int_0^\infty B(t_1, t_2) dt_1 \leq C_3$

4. Существует такое  $t_0 > 0$ , что для любого  $t \gg t_0$  и всех  $0 < t_2 < t$

$$\int_0^t B^m(t_1, t_2) dt_1 \gg C_4 > 0,$$

где  $m$  - номер первого отличного от нуля коэффициента разложения функции  $r(\varepsilon)$  в ряд по полиномам Эрмита.

5.  $\exists M\{r[\tilde{\varepsilon}(t)]\}$  и  $M\{r^2[\tilde{\varepsilon}(t)]\}$ .

Доказательство теорем 3.2, 3.3 основано на разложении функции  $r(\varepsilon)$  в ряд по полиномам Вика и использовании диаграммной техники для оценки старших моментов гауссовских распределений.

Четвертая глава диссертационной работы посвящена разработке планов контрольных испытаний в форсированных режимах на

основе моделей испытаний, рассмотренных во второй и третьей главах.

Для стареющих систем, при проведении испытаний в форсированном режиме  $\tilde{E}_*$  по биномиальному плану в течение времени  $t_*$  с допустимым числом отказов  $d_*$ , из (2) выводится условие на требуемое число испытываемых образцов  $n_*$ :

$$[f_2(n_*, d_*, q)]^{\mu(t_0, \tilde{E}_0) / \mu(t_*, \tilde{E}_*)} \geq P_T,$$

где  $f_2(n_*, d_*, q)$  - неполная бета-функция, для которой имеются таблицы;  $q = 1 - \beta$  - доверительная вероятность,  $t_0$  и  $\tilde{E}_0$  - соответственно заданное время и режим эксплуатации.

В случае планирования безотказных испытаний ( $d_* = 0$ ), число образцов  $n_*$  определяется из условия  $n_* \geq n_0 / \alpha$ , где  $n_0 = \ln(1-q) / \ln P_T$  - необходимый объем испытаний в нормальном режиме;  $\alpha = \mu(t_*, \tilde{E}_*) / \mu(t_0, \tilde{E}_0)$  - коэффициент сокращения объема испытаний за счет использования форсированного режима.

Для случая, когда известны стоимость одного испытываемого образца -  $C_1$  и стоимость проведения единицы времени испытаний -  $C_2$ , планирование испытаний осуществляется с использованием следующего утверждения:

#### Т е о р е м а 4.1.

Количество испытываемых образцов  $n_*$  и продолжительность испытаний  $t_*$ , минимизирующие суммарную стоимость проведения испытаний в форсированном режиме  $E_*$ , по подтверждению требуемого значения ВБР  $P_T$  за время  $t_0$  в номинальном режиме  $\tilde{E}_0$ , определяются из условий:

$$t_* = \frac{C_1 \cdot n_0 \cdot \mu(t_0, \tilde{E}_0)}{C_2 \cdot r(E_*) \cdot n_0 \cdot \mu(t_0, \tilde{E}_0)}$$

$$n_* \geq \frac{n_0 \cdot \mu(t_0, \tilde{E}_0)}{t_* \cdot r(E_*)}$$

Для параметрической модели отказа в случае DM - распределения условие приемки изделия по испытаниям в форсированном режиме устанавливается в следующем виде:

$$P_2(t_*, E_*) \geq P_{T*}, \quad (6)$$

где

$$P_{T*} = \Phi \left( \frac{1 - k(E_0, E_*) Q_T t_*}{\sqrt{k(E_0, E_*) Q_T t_*}} \right),$$

$$Q_T = \frac{z_T^2 \nu^2 + 2 - z_T \sqrt{z_T^2 \nu^2 + 4}}{2 t_0},$$

$$z_T = \Phi^{-1}(P_T)$$

Л е м м а 4.1.

Условие (6) определяет ошибку второго рода  $\beta \leq 1 - q$ .

Т е о р е м а 4.2.

При заданном допустимом числе отказов  $d_*$  и известных  $\nu$  и  $k(E_0, E_*)$ , необходимое для испытаний число образцов  $n_*$  определяется из условия

$$f_2(n_*, d_*, q) \geq \Phi \left( \frac{1 - k(E_0, E_*) Q_T t_*}{\sqrt{k(E_0, E_*) Q_T t_*}} \right)$$

При планировании безотказных испытаний величина  $n_*$  определяется из условия

$$n_* \geq \frac{\ln(1 - q)}{\ln \Phi \left( \frac{1 - k(E_0, E_*) Q_T t_*}{\sqrt{k(E_0, E_*) Q_T t_*}} \right)}$$

В случае, когда информация о точном значении коэффициента ускорения  $k(\varepsilon_0, \varepsilon_*)$  отсутствует, однако по результатам предварительных испытаний может быть определена его нижняя  $\tilde{q}$ -доверительная оценка  $\underline{k}_{\tilde{q}}(\varepsilon_0, \varepsilon_*)$ , условие приемки изделия по результатам испытаний в форсированном режиме  $\varepsilon_*$  устанавливается в виде:

$$\underline{P}_{\tilde{q}}(t_*, \varepsilon_*) \geq \bar{P}_{T*}, \quad (7)$$

где

$$\begin{aligned} \bar{P}_{T*} &= \Phi\left(\frac{1 - k_{\tilde{q}}(\varepsilon_0, \varepsilon_*) \cdot Q_T \cdot t_*}{\sqrt{k_{\tilde{q}}(\varepsilon_0, \varepsilon_*) \cdot Q_T \cdot t_*}}\right), \\ \tilde{q} &= \sqrt{q}, \end{aligned}$$

Доказывается, что условие (7) определяет ошибку второго рода  $\beta \leq 1 - q$ .

Аналогичные утверждения доказываются и для обратного гауссовского распределения.

При случайном характере эксплуатационного режима рассматриваются следующие случаи: наработка до отказа изделия в постоянном режиме имеет нормальное и экспоненциальное распределение. Определяется схема испытаний с коэффициентом утяжеления  $\mathcal{X}$ , в которой испытываются  $n_*$  изделий в течение времени  $\mathcal{X} \cdot Z_\alpha / r(\varepsilon_*)$ , где  $Z_\alpha$  - квантиль уровня  $\alpha$  случайной величины  $M(t_0, \tilde{\varepsilon}_0)$ .

Для нормального закона распределения наработки до отказа условие приемки изделия по испытаниям  $n_*$  образцов в режиме  $\varepsilon_*$  для числа зафиксированных отказов  $d_*$  принимается в следующем виде:

$$f_2(n_*, d_*, q) \geq (1 - \alpha) \cdot \bar{P}_{T*}, \quad (8)$$

где

$$P_{T*} = \Phi\left(\frac{\eta_T - x}{\sqrt{\eta_T^2 V_*^2 + x^2 V_0^2}}\right).$$

$$\eta_T = \frac{1 + z_T(V_*^2 + V_0^2 - z_T^2 V_*^2 V_0^2)^{1/2}}{1 - z_T^2 V_*^2}.$$

$V_*$  - коэффициент вариации наработки до отказа в постоянном режиме нагружения,  $V_0$  - коэффициент вариации случайной величины  $M(t_0, \tilde{E}_0)$ ,  $z_T = \Phi^{-1}(P_T)$ .

Л е м м а 4.2. Условие приемки (8) определяет ошибку второго рода  $\beta \leq 1 - q$ .

Из условия (8) выводятся формулы для объема испытаний. Увеличение значения коэффициента утяжеления  $x$  приводит к возрастанию продолжительности испытаний и уменьшению требуемого числа образцов.

Аналогичное лемме 4.2 утверждение доказывается для экспоненциального закона распределения наработки до отказа.

#### ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ РАБОТЫ

1. Разработан метод вычисления доверительных границ показателей надежности стареющих систем в нормальном режиме работы по результатам испытаний в форсированном режиме.

2. Проведен анализ связи между средним значением случайного стационарного режима нагружения и эквивалентным режимом для различных классов функций, задающих скорость расходования ресурса. Полученные результаты показывают, что игнорирование случайного характера режима эксплуатации при назначении объемов испытаний может приводить к необоснованным выводам о соответствии изделия требованиям по надежности.

3. Получен результат об асимптотической нормальности интеграла от нелинейной функции для некоторых классов нестационарных процессов.

нарных гауссовских процессов.

4. На основе полученных соотношений для доверительных границ показателей надежности, разработаны методы планирования испытаний при контроле долговечности технических изделий с переменным режимом функционирования для стареющих систем и изделий с параметрической моделью отказа.

5. Используя доказанную асимптотическую нормальность величины ресурса, израсходованного изделием за время работы, разработан метод планирования испытаний при контроле долговечности технических изделий, режим эксплуатации которых описывается гауссовским случайным процессом.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Тескин О.И., Криволапов С.Я. Использование форсированных испытаний для уменьшения объема выборки при контроле надежности // Расчет и управление надежностью больших механических систем: Тезисы докл. Всесоюзной школы-семинара. - Свердловск, 1988. - С. 191-192.

2. Тескин О.И., Криволапов С.Я. Подтверждение требований к надежности ИМС на основе ускоренных испытаний // Моделирование отказов и имитация статистических испытаний на ЭВМ ИМС и их элементов: Тезисы докл. 3 Всесоюзной конференции. - Суздаль, 1989. - С. 21-22.

3. Тескин О.И., Криволапов С.Я. Интервальное оценивание показателей надежности по результатам форсированных испытаний // Применения многомерного статистического анализа в экономике и оценке качества продукции: Тезисы докл. 4 Всесоюзной научно-технической конференции. - Тарту, 1989. - Ч. II. - С. 336-337.

4. Тескин О.И., Яцко А.И., Криволапов С.Я. Расчет доверительных границ вероятности безотказной работы для параметрической модели отказов изделий по результатам форсированных испытаний // Надежность и контроль качества. - 1989. - № 10. - С. 16-19.

5. Тескин О.И., Криволапов С.Я. Планирование ускоренных испытаний для изделий с возрастающей функцией интенсивности отказов // Статистические методы оценивания и проверки гипотез: Межвузовский сборник научных трудов. - Пермь, 1990. - С. 61-67.

6. Тескин О.И., Криволапов С.Я., Яцко А.И. Планирование объемов ускоренных испытаний при контроле технических изделий для случая параметрических отказов // Надежность и контроль качества. - 1990. - № 2. - С. 12-16.

7. Криволапов С.Я. Контроль надежности по результатам форсированных испытаний со ступенчатым режимом нагружения // Применение статистических методов в производстве и управлении: Тезисы докл. Всесоюзной научно-технической конференции. - Пермь, 1990. - Т. 2. - С. 229-230.

8. Криволапов С.Я. Точечная и интервальная оценка вероятности безотказной работы изделия с учетом распределения нагрузки при его эксплуатации // Надежность и контроль качества. - 1990. - № 5. - С. 8-12.

9. Криволапов С.Я., Коломиец Н.Г. Оценка показателей надежности высоконадежных систем на основе объединения расчетной и экспериментальной информации // Надежность и контроль качества. - 1991. - № 1. - С. 19-23.

10. Криволапов С.Я. Планирование ускоренных испытаний по подтверждению вероятности безотказной работы систем управления при случайной нагрузке // Автоматика и телемеханика. - 1991. - № 6. - С. 158-165.

11. Тескин О.И., Криволапов С.Я. Двухступенчатая процедура оценивания показателей надежности технических изделий по результатам форсированных и эксплуатационных испытаний // Статистические методы оценивания и проверки гипотез: Межвузовский сборник научных трудов. - Пермь, 1991. - С. 42-48.

Подписано к печати 23.12.91г. Заказ 1062

Объем 1.0 п.л. Тир. 100 экз.

---

Типография МГТУ