

На правах рукописи

Фам Дык Хунг

**МЕТОДИКА ОБЕСПЕЧЕНИЯ ОЦЕНКИ
НАДЁЖНОСТИ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ
ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ИСПЫТАНИЙ МАЛЫХ ВЫБОРОК**

Специальность 05.13.01

Системный анализ, управление и обработка информации (информатика)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2006

Работа выполнена в Государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования “Балтийский государственный технический университет “Военмех” им. Д.Ф. Устинова” (г. Санкт-Петербург).

Научный руководитель кандидат технических наук,
доцент Барбашов Геннадий Васильевич.

Официальные оппоненты: доктор технических наук,
профессор Вяценко Юрий Леонидович;

кандидат технических наук,
Вильдттрубе Юрий Николаевич.

Ведущая организация ФГУП “НИИ “Поиск”.

Защита состоится 22 июня 2006 г. в 16 часов на заседании диссертационного совета Д 212.229.18 при ГОУ ВПО “Санкт-Петербургский государственный политехнический университет” по адресу: 195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., д. 29, корпус 9, ауд. 325.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке ГОУ ВПО “Санкт-Петербургский государственный политехнический университет”.

Автореферат разослан 08 июня 2006 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета _____ Шашихин В.Н.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Термодинамические системы управления (ТДСУ) понимаются как широкий класс систем, предназначенных для управления разнообразными физическими процессами с помощью воспламенительных или детонационных импульсов. ТДСУ применяются при обработке материалов взрывом, производстве взрывных работ в горнорудной промышленности и строительстве, при тушении пожаров, в охранных и спасательных системах, фейерверочной технике и т.д.

Актуальность темы диссертации обусловлена следующими причинами:

1. Все более распространяющейся практикой промышленного выпуска сравнительно малочисленных партий изделий. В случае выборочных испытаний таких партий оценка их надёжности сводится к оценке по малым выборкам.

2. Требованиями экономичности испытаний на надёжность, которые могут быть удовлетворены путём испытаний малых выборок при условии достаточной достоверной вероятности оценки надёжности.

3. Необходимостью оценки надёжности ТДСУ именно по малым выборкам вследствие физических особенностей функционирования этих систем, а именно однократности их действия, поскольку их узлы, содержащие огневые и пиротехнические элементы, при испытаниях по проверке их действия и надёжности теряют свою работоспособность без возможности её восстановления.

4. Целесообразностью проведения испытаний малых выборок при оценке надёжности ТДСУ в процессе их длительного хранения для обоснованного допуска их к применению или продления срока хранения, что особенно важно в случае ограниченного восполнения запаса хранящихся изделий, в том числе при хранении этих изделий в тропических условиях Вьетнама.

Целью представленного исследования являются методическое обоснование и обеспечение практической возможности оценки надёжности ТДСУ по результатам испытаний их малых выборок, с учётом особенностей этих систем и определением достоверности получаемой оценки.

Достижение указанной цели позволяет, в рамках решения общих задач по обеспечению качества изделий и технических систем, сокращать объём испытаний в необходимых случаях, когда в принципе оценка надёжности возможна только по малым выборкам, или же в экономически обоснованных случаях, когда допустима оценка по малым выборкам.

Основными задачами исследования, служащими для достижения поставленной цели, являются следующие:

1. Анализ критерия малой выборки при испытаниях ТДСУ на надёжность.

2. Сравнительный анализ возможных методов оценки надёжности изделий по малым выборкам. Выбор наиболее эффективных методов с точки зрения достоверности и экономичности оценки надёжности изделий.

3. Разработка методики оценки надёжности ТДСУ по результатам испытаний их малых выборок с учётом функционально-структурных особенностей этих СУ, дифференцированного подхода к вероятностям выполнения их функций и практическая расчётная реализация этой методики.

4. Установление корреляционных связей между функционально-структурной схемой и конструкцией ТДСУ при синтезе последних, их прогнозируемой надёжностью на этапе проектирования и опытной оценкой их надёжности по малым выборкам.

Предмет исследования - оценка надёжности ТДСУ по результатам их испытаний в ограниченном объёме.

Объект исследования - термодинамические системы управления, главным отличительным признаком которых (в сравнении с другими классами СУ) является однократность их действия, обусловленная наличием в них огневых и пиротехнических элементов.

Основными средствами и методами решения поставленных задач являются методы системотехнического анализа и синтеза, теория надёжности и эффективности систем, методы расчётного определения параметров надёжности, теория и методы оценки надёжности изделий по результатам испытаний, в том числе выборочных, теория проектирования и методы испытаний ТДСУ, а также теория вероятностей и математическая статистика.

Научная новизна диссертационной работы состоит в следующем:

1. Предложена комплексная методика обеспечения оценки надёжности ТДСУ, в том числе автономных, по результатам испытаний их малых выборок от партий изделий с учётом физических особенностей функционирования этих СУ и прежде всего однократности их действия, предъявляемых к ним жёстких требований по технике безопасности, с применением дифференцированного подхода к вероятностям выполнения их функций и установлением корреляционных связей между функционально-структурной схемой термодинамических систем управления, выбираемой при синтезе последних, их прогнозируемой при этом надёжностью и опытной оценкой их надёжности по малым выборкам.

2. Для стадии разработки ТДСУ дано методическое обоснование кратности резервирования функциональных каналов и целесообразности применения блочного метода конструирования ТДСУ, а также иерархических уровней их блоков в расчёте на ожидаемую опытную оценку надёжности по результатам испытаний их малых выборок на этапе ОКР и на последующих стадиях производства и эксплуатации этих систем в зависимости от требуемой достоверности оценки их надёжности.

3. Предложена методика укрупняющего переформирования малочисленных партий ТДСУ, которая позволяет снижать общие затраты на испытания и применять опытную оценку надёжности ТДСУ по истечении сроков хранения, при восстановлении изделий и принятии решения о продлении сроков их хранения по малым выборкам, но всё же при этом с наибольшим возможным объёмом этих выборок.

Достоверность научных результатов и практических рекомендаций базируется на корректной постановке общих и частных задач, использовании известных фундаментальных положений теории вероятностей, математической статистики, теории надёжности, теории выборочных испытаний и на достаточном объёме статистического моделирования и расчётов, результаты которых приведены в таблицах и на графиках.

Достоверность полученных в диссертации материалов также подтверждается в известной мере внедрением предложенной методики при оценке надёжности ТДСУ по результатам испытаний малых выборок.

Практическая ценность диссертационной работы заключается в предназначении предложенной методики для опытной, практической оценки надёжности ТДСУ по результатам испытаний малых выборок. Эта методика позволяет уменьшать объём и время испытаний изделий и таким образом давать экономический эффект как на стадии НИ-ОКР, так и на стадии заводского производства изделий. Методика особенно эффективна в тех случаях, когда необходимо получать оценки и принимать решение о надёжности изделий и ТДСУ в условиях ограниченного числа опытов. Данная методика нашла применение на вьетнамском предприятии – ЗАО “Ту-Кьонг”. Разработанная методика применяется как составная часть учебных курсов “Надёжность и эффективность систем

управления”, “Проектирование и моделирование электромеханических систем” по специальности 220203 “Автономные информационные и управляющие системы” в БГТУ “Военмех”, а также учебных курсов “Проектирование и моделирование высокоэнергетических систем”, “Управление высокоэнергетическими системами” и “Эффективность и надёжность технических систем” в Ханойском государственном техническом университете (ХГТУ) им. Ле Куй Дона (Вьетнам).

Кроме этого, методика позволяет корректировать разработку ТДСУ в расчёте на опытную проверку надёжности ТДСУ по малым выборкам.

Предложенная методика укрупняющего переформирования исходных мелких партий изделий также имеет практическое значение, так как способствует преодолению трудностей, связанных с оценкой надёжности по малым выборкам, снижению затрат на испытания.

Научные положения, выносимые на защиту:

1. Определение объёма малой выборки при испытаниях ТДСУ на надёжность (в зависимости от числа образцов в партиях испытываемого изделия).

2. Сравнительный анализ возможных методов оценки надёжности ТДСУ по малым выборкам. Выбор наиболее эффективных методов по достоверности и экономичности оценивания надёжности.

3. Комплексный подход к разработке методики оценки надёжности ТДСУ по результатам испытаний их малых выборок с учётом функционально-структурных особенностей этих систем, дифференциации вероятностей выполнения их функций, с использованием априорной и апостериорной информации о надёжности систем.

4. Установление корреляционных связей между выбором схмотехнических и конструктивных решений при разработке ТДСУ (в части резервирования их функциональных каналов и структурных элементов, блочного метода конструирования, их составных частей), прогнозированием надёжности ТДСУ на стадии НИОКР и опытной оценкой надёжности по результатам испытаний их малых выборок.

5. Методика укрупняющего переформирования исходных партий ТДСУ (с проверкой однородности новых укрупнённых партий).

6. Оценка экономической эффективности предложенной методики.

Реализация и внедрение. Научные результаты диссертационной работы **внедрены** в производстве ЗАО “Ту-Кьонг” (Вьетнам), а также при выполнении госбюджетной НИР № У-16-3504 в БГТУ “Военмех” им. Д.Ф. Устинова и **использованы** в учебном процессе ХГТУ им. Ле Куй Дона и БГТУ “Военмех” им. Д.Ф. Устинова.

Апробация. Основные результаты работы докладывались и обсуждались (8 докладов) на следующих научных собраниях: Всероссийской научно-практической конференции “Конверсия, оборона, безопасность”, посвящённой 40-летию Юбилею кафедры “Автономные информационные и управляющие системы” Пензенского государственного университета. Пенза, 17–19 октября 2003 г.; Научно-техническом семинаре на кафедре Н5 БГТУ “Военмех” им. Д.Ф. Устинова. Санкт–Петербург, 15 апреля 2004 г.; Научно-технической конференции на кафедре Н5 БГТУ “Военмех” им. Д.Ф. Устинова. Санкт–Петербург, 24 ноября 2004 г.; Общероссийской научно-технической конференции “Вторые Уткинские чтения”. БГТУ “Военмех” им. Д.Ф. Устинова, Санкт–Петербург, 14–15 апреля 2005 г.; Шестой международной конференции “Научно-технические проблемы прогнозирования надёжности и долговечности конструкций и методы их решения”. СПбГПУ, Санкт–Петербург, 14–17 июня 2005 г.; Научно-техническом семинаре на кафедре Н5 БГТУ “Военмех” им. Д.Ф. Устинова. Санкт–Петербург, 8 июня 2005 г.; Совместном научно-техническом семинаре кафедр ИЗ, Е1 и Н5 БГТУ “Военмех” им. Д.Ф. Ус-

тинова. Санкт–Петербург, 18 ноября 2005 г.; Научно-техническом семинаре на кафедре Н5 БГТУ “Военмех” им. Д.Ф. Устинова. Санкт–Петербург, 6 декабря 2005 г.

Публикации. По теме исследования опубликованы 15 научных статей.

Структура и объём диссертационной работы. Диссертация состоит из введения, четырёх глав, общих выводов, списка использованной литературы из 102 наименований. Общий объём диссертации составляет 227 стр., включая 22 рисунка и 31 таблицу.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обосновывается актуальность темы диссертации, формулируются цель и задачи исследования, указываются средства для решения задач исследования, определяются практическая полезность данной работы, её основные положения, выносимые на защиту, изложена структура работы.

Глава 1 посвящена анализу состояния вопросов по оценке надёжности изделий по результатам испытаний их малых выборок, а также анализу общих вопросов: общей методологии оценки надёжности изделий, выборочным испытаниям и особенностям рассматриваемого объекта исследования – ТДСУ.

Рассмотрены **вопросы анализа и синтеза функционально-структурной схемы ТДСУ** (рис. 1) в аспекте надёжности с целью учёта указанных вопросов при оценке надёжности ТДСУ по малым выборкам.

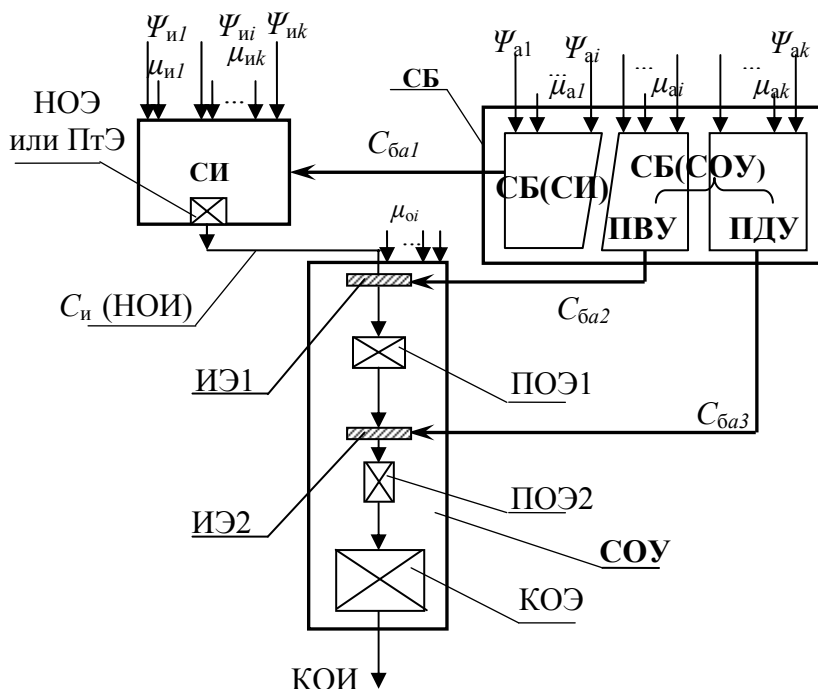


Рис. 1. Функционально-структурная схема ТДСУ.

СБ(СИ), СБ (СОУ) – СБ для СИ и СОУ, ПВУ, ПДУ – предохранительно-воспламенительное и предохранительно-детонирующее устройство, НОЭ – начальный огневой элемент, ПтЭ – пиротехнический элемент, ИЭ1, ИЭ2 – изолирующие элементы, ПОЭ1, ПОЭ2 – промежуточные огневые элементы, Ψ_{ni} – фактор (внешнее воздействие) инициирования ТДСУ, Ψ_{ni} – фактор (внешнее воздействие) инициирования ТДСУ, Ψ_{ai} – фактор активизации ПСУ, μ_{ni} , μ_{ai} , μ_{oi} – помехи относительно СИ, СБ и СОУ соответственно, $C_{ба1}$, $C_{ба2}$, $C_{ба3}$ – связи между элементами ТДСУ, обеспечивающие безопасность и активизацию СИ и СОУ, КОИ – конечный огневой импульс ТДСУ (на выходе СОУ).

Главной функцией ТДСУ является выработка **инициирующего воздействия на объект управления** (создание необходимой команды управления). К основным функциям ТДСУ относятся также обеспечение безопасности, активизация и обеспечение устойчивости ТДСУ к помехам.

Обеспечение безопасности (предохранение) ТДСУ – процесс обеспечения пассивного состояния ТДСУ до требуемого момента активизации.

Активизация (подготовка к действию) ТДСУ – процесс преобразования определённых внешних воздействий в исполнительные сигналы, переводящие СУ из безопасного состояния в состояние готовности к выработке команды управления.

Обеспечение устойчивости ТДСУ к помехам – процесс противодействия выработке команды управления под воздействием помех на ТДСУ.

ТДСУ состоят из трёх подсистем – системы безопасности (СБ), системы инициирования (СИ) и системы огневого усиления (СОУ) (рис.1).

Основополагающая формула для оценки надёжности ТДСУ, выраженная через вероятности выполнения (ВБР) функций ТДСУ

$$P_{\phi} = P_{\phi} \cdot P_a^{\phi} \cdot P_{уст}^a \cdot P_{и}^{уст} \cdot P_{ОУ}, \quad (1)$$

где P_{ϕ} – вероятность обеспечения безопасности ТДСУ, P_a^{ϕ} – вероятность её активизации при условии обеспечения её безопасности, $P_{уст}^a$ – вероятность помехоустойчивости ТДСУ после её активизации, $P_{и}^{уст}$ – вероятность безотказной выработки начального огневого импульса (НОИ) при условии помехоустойчивости системы, $P_{ОУ}$ – вероятность безотказного усиления НОИ по мощности до требуемого уровня.

ВБР ТДСУ, выраженная через ВБР её подсистем, –

$$P_{\phi} = P_{СБ} \cdot P_{СИ} \cdot P_{ОУ}, \quad (2)$$

где величины справа представляют собой ВБР, соответственно, СБ, СИ, СОУ.

Величина P_{ϕ} в идеале должна очень близкой к единице, практически требуется $P_{\phi}=1$ для принятых в эксплуатацию ТДСУ. Значение P_{ϕ} определяется исходя из требуемой эффективности комплекса, в составе которого применяется ТДСУ, что, в свою очередь, обуславливает выбор значений составных ВБР $P_{\phi i}$. Из причинно-следственной взаимобусловленности ряда функций: безопасность – активизация (при условии безопасности) – устойчивость к помехам (после активизации) – выработка команды управления (при условии устойчивости к помехам), следует условие, которому целесообразно подчинять величины $P_{\phi i}$:

$$P_{\phi} > P_{ОУ} > P_a^{\phi} > P_{уст}^a > P_{и}^{уст}. \quad (3)$$

Необходимо применять (1), (2) при анализе надёжности ТДСУ и их составных частей (СЧ) и соотношение (3) целесообразно учитывать при синтезе ТДСУ. При дифференцированной оценке ВБР ТДСУ по их различным функциям этих систем, целесообразно принять в соответствии с (3) соотношение доверительных вероятностей

$$\gamma_{\phi} > \gamma_{ОУ} > \gamma_a^{\phi} > \gamma_{уст}^a > \gamma_{и}^{уст}. \quad (4)$$

В результате надёжностного анализа ТДСУ с учётом их особенностей поставлены задачи исследования, решению которых посвящены последующие главы диссертации.

В главе 2 содержится предложенная методика оценки надёжности ТДСУ по результатам испытаний малых выборок, куда входит решение ряда задач и вопросов.

Дано **количественное определение понятия малой выборки**, для чего принят **критерий малой выборки** с помощью уравнения Клоппера-Пирсона:

$$\sum_{m=0}^n \frac{n!}{m!(n-m)!} \cdot P_H^n \cdot (1-P_H)^m = \omega, \quad (5)$$

где n – выборка образцов изделия для испытаний, m – число отказов при испытаниях, P_H – нижняя и верхняя границы ВБР изделия, ω – уровень значимости, связанный с доверительной вероятностью оценки ВБР γ ($\gamma=1-\omega$).

По (5) при заданных значениях P_H , ω (или γ) и полученном значении m определяется соответствующее им минимальное предельное значение объёма выборки n ($n=n_{кр}$) – такой, которая удовлетворяет условию достоверного подтверждения надёжности партии образцов испытываемого изделия. При $n \geq n_{кр}$ выборка с объёмом n называется номинальной, в частности при $n=n_{кр}$ – **критической**. **Критерием малой выборки является $n \leq n_{кр}$.**

В табл. 1 приведен пример по расчёту объёма критической выборки $n_{кр}$ в зависимости от P_H и γ .

Выполнен сравнительный анализ возможных методов оценки надёжности изделий по результатам испытаний их малых выборок с целью выбора из них наиболее эффективных методов.

Рассмотрение достоинств и недостатков различных методов: информационного метода, параметрических функций, суммирования результатов испытаний, проверки статистических гипотез, математического планирования экспериментов, метода вкладов, метода, основанного на формуле Бернулли и метода, основанного на формуле Байеса (байесовский метод), с учётом особенностей ТДСУ, привело к **выбору байесовского метода** как наиболее эффективного для оценки надёжности изделий по результатам испытаний малых выборок. Этот метод является наиболее развитым, разнообразно отражённым в литературе и наиболее распространённым на практике из всех методов совместного учёта априорной и текущей опытной информации при оценке надёжности изделий:

$$f(H/h_i) = \frac{f(h) \cdot f(h_i/H)}{\int_{-\infty}^{+\infty} f(h) \cdot f(h_i/H) dH}, \quad \tilde{P}_{j\Sigma} = \frac{\tilde{P}_j \cdot (1 - \tilde{P}_j) + (n - m) \cdot \tilde{\sigma}_{P_j}^2}{\tilde{P}_j \cdot (1 - \tilde{P}_j) + n \cdot \tilde{\sigma}_{P_j}^2}, \quad (6)$$

при условии $\frac{n-m}{n+1} \leq \tilde{P}_j \leq \frac{n-m+1}{n+1}$, где $f(h)$ – априорная плотность распределения вероятности отказов (ВО) изделия; $f(H/h_i)$ – условная плотность распределения опытных данных, $\tilde{P}_{j\Sigma}$ – ВО изделия, определённая с учётом априорной и опытной информации; $\tilde{P}_j$ – априорная ВБР изделия, $\tilde{\sigma}_{P_j}$ – среднеквадратичное отклонение $\tilde{P}_j$.

В диссертации приведены и преобразованы в “интересах малых выборок” другие виды формулы Байеса, позволяющие использовать предложенный дифференцированный подход к определению ВБР ТДСУ относительно каждой из её функций.

Данный метод позволяет гибко учитывать и наращивать в качестве априорной информации (АИ) данные о надёжности изделий-аналогов или СЧ-аналогов, а также данные о надёжности последних, полученные на всех предыдущих стадиях и этапах их жизненного цикла, что особенно важно для изделий (и их СЧ) однократного действия.

В диссертационной работе **выбраны и предложены дополнительные способы уменьшения объёмов выборок при испытаниях на надёжность ТДСУ:**

применение форсированных испытаний;

увеличение длительности испытаний;

применение принципа эргодичности: $n_{(обр)} \cdot k_{(раз)} \sim (n \cdot k)_{обр}$ – испытания каждого из n образцов по k раз равносильно испытаниям по одному разу выборки $n \cdot k$ образцов.

Таблица 1
Критические значения малой выборки

γ	$n_{кр}$ при $m=0$						
	P_H						
	0,800	0,850	0,900	0,950	0,975	0,990	0,995
0,70	5	7	11	23	48	120	240
0,80	7	10	15	31	64	160	321
0,90	10	14	22	45	91	224	454
0,95	13	18	28	58	118	298	598

оптимизация объёма испытаний в аспекте информационного подхода к оценке надёжности: установление количества информации $J(a, r_j)$, количества полезности информации $R(a, r_j)$ и его математического ожидания $R(a)$ в зависимости от решения r_j об ансамбле событий a (в процессе испытаний), а также определение стоимости испытаний $C(n)$ (которую можно рассматривать как функцию потерь, измеряющуюся в денежных единицах в зависимости от a и r_j). Оптимальный объём испытаний n_{opt} дан при максимальной разнице между стоимостью испытаний и математическим ожиданием полезности информации Δ_{max} (рис. 2).

Определён объём испытаний при оценке надёжности ТДСУ по малым выборкам в зависимости от числа образцов в партиях испытуемого изделия.

Предложен метод определения объёма испытаний на основе гипергеометрического распределения вероятностей. Решается уравнение

$$P(E) = \frac{C_b^m \cdot C_a^{n-m}}{C_N^n} \text{ относительно } n, \text{ где } P(E) - \text{ве-}$$

роятность попадания в выборку m штук бракованных изделий, $P(E)=1 - P_H$, P_H – заданная нижняя граница ВБР изделия; N – число образцов изделия в партии; a – ожидаемое количество нормальных образцов в партии; b – ожидаемое количество бракованных изделий в партии; n – искомое число образцов изделия в выборке; m – ожидаемое число бракованных образцов в выборке; C_b^m , C_a^{n-m} , C_N^n – числа сочетаний.

Проанализированы сочетания значений m и P_H , при которых данное уравнения не имеет и имеет решение ($n=n_o$). В примере (табл. 2) приведены объёмы выборки n_o при различных значениях P_H .

Предложенный метод позволяет ориентировочно определять объём испытаний с начального этапа разработки ТДСУ. Этот объём, с учётом других возможностей уменьшения объёма испытаний, уточняется (часто уменьшается) в процессе отработки изделия.

Предложена методика составления планов сокращённых по объёму испытаний на надёжность термодинамических систем управления.

Планирование испытаний для типовых структурных схем надёжности изделий.

1. Отдельные элементы: $n = \frac{\ln(1-\gamma)}{\ln P_*}$, где P_* - ВБР изделия за время цикла испытания

$t_{ц}$ с доверительной вероятностью γ .

2. Параллельная структура из n_3 элементов: $n = \frac{\ln(1-\gamma)}{n_3 \cdot \ln(1-\sqrt[n_3]{P_*})}$.

3. Мажоритарная структура (типа 2 из 3-х): $n = \frac{\ln(1-\gamma)}{3 \cdot \ln x_o}$, где x_o - решение уравнения

$$P_* = 3 \cdot x^2 - 2 \cdot x^3, x - \text{ВБР элемента.}$$

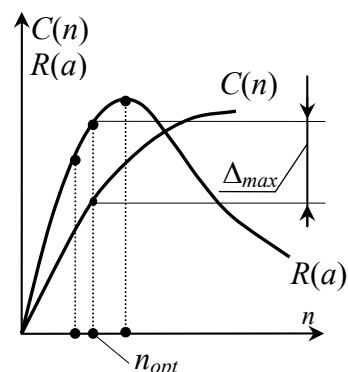


Рис. 2. Оптимизация объёма испытаний

Таблица 2
Ориентировочные объёмы выборки (n_o) для испытаний на надёжность ТДСУ при $N=500$

$N=500$					
P_H	0,95	0,93	0,92	0,91	0,90
n_o	250	136	122	105	95
P_H	0,89	0,88	0,87	0,86	0,85
n_o	85	71	66	63	62

4. Произвольная структура из n_3 однотипных элементов: $n = \frac{\ln(1-\gamma)}{n_3 \cdot \ln x_o}$, где x_o - решение уравнения $P_* = P(x, n_3 - n_{31}, m_3, A_j, A_{n_3})$, в котором $P(x)$ - функция ВБР изделия от ВБР элемента.

5. Произвольная структура из n_3 однотипных элементов с m_3 элементами в ЗИПе (ЗИП – запасные части, инструменты и принадлежности): $n = \frac{\ln(1-\gamma)}{n_3 \cdot \ln x_o}$, где x_o - решение уравне ния

$$P_* = x^{n_3} \cdot \sum_{i=0}^{m_3-1} \frac{(-n_3 \cdot \ln x)^i}{i!} + n_3^{m_3} \cdot \sum_{j=1}^{n_3-1} \frac{A_j}{(n_3 - j)^{m_3}} \cdot (x^j - x^{j_0} \cdot \sum_{j=0}^{n_3} \frac{[-(n_3 - j) \cdot \ln x]^i}{j!}) + A_{n_3} \cdot x^{n_3} \cdot \frac{(-n_3 \cdot \ln x)}{m_3!}, \text{ где } A_j, A_{n_3} - \text{коэффициенты, характеризующие распределение вероятностей.}$$

6. Последовательное соединение типовых подсистем изделия, соответствующих пп. 1–5: значение n определяется по таблицам, приведённым в диссертации.

Оперативная оценка надёжности ТДСУ - при испытаниях ТДСУ по малым выборкам следует ожидать, прежде всего, что отказ не будет (это подтверждается практикой). Тогда величина P при $m=0$ находится приблизительно по известным формулам:

$$P = \frac{n+1}{n+2}, P = \frac{3n+4}{3n+6}, P = \frac{n+(n/2)^{1/2}}{n+n^{1/2}}, P = 2^{-1/n}.$$

В диссертации рассмотрен подход к выбору предпочтительной формулы из приведенных для тех или иных условий оценки надёжности.

Полученные по этим формулам результаты предназначены для оперативной, достаточно быстрой и простой оценки надёжности ТДСУ или же используются как промежуточные этапные оценки.

В главе 2 также предложена методика укрупняющего переформирования мелких партий одной и той же ТДСУ перед проведением её испытаний. Целесообразность указанной методики обусловлена рядом практических соображений, связанных с эксплуатацией изделий. Эта методика обеспечивает экономию средств и времени для испытаний, а также возможность опытной оценки надёжности изделий по малым выборкам, но всё же не чрезмерно малым, а в ряде случаев даже и номинальным выборкам, для которых выполняется условие $n \geq n_{кр}$, благодаря относительно большому количеству образцов в таких выборках, достижимому в результате переформирования партий изделий и позволяющему получать оценку надёжности с достаточной точностью и доверительной вероятностью.

Совокупное множество образцов изделия, находящихся в составе различных партий данного изделия, определяется как $N_\Sigma = \sum_{i=1}^{p_0} (N_{oi} - \Delta_i)$, где N_{oi} – объём i -й исходный партии изделия (начальный объём), Δ_i – объём расхода из i -й исходный партии.

После переформирования партий: $N_\Sigma = \sum_{j=1}^p N_j$, где N_j – объём j -й партии после переформирования; p – число партий изделия после переформирования партий, причём $\min\{N_j\} > \min\{N_{oi} - \Delta_i\}$, $p \leq p_0$, что собственно и отображает укрупняющее переформирования нескольких партий изделия.

Указанная методика основана на проверке гипотез однородности выборок (партий) ТДСУ, а именно:

гипотезы об одинаковости вероятностных законов распределения $F(\varphi)$ i -го функционального параметра Φ_i (как случайной величины) изделия –

$$H_F : F_1(\varphi_i) \equiv F_2(\varphi_i) \equiv \dots \equiv F_j(\varphi_i) \equiv \dots \equiv F_k(\varphi_i);$$

гипотезы об одинаковости математических ожиданий Φ_i для i -го функционального параметра φ_i , полученных в k выборках Φ_{ji} , где $j=\overline{1, k}$ –

$$H_{\overline{\Phi}} : \overline{\Phi}_{1i} = \overline{\Phi}_{2i} = \dots = \overline{\Phi}_{ji} = \dots = \overline{\Phi}_{ki};$$

гипотезы об одинаковости дисперсий D_i в выборках ($D_i = \sigma_i^2$, где σ_i – с.к.о. в распределении параметра φ_i) – $H_D : \sigma_{1i}^2 = \sigma_{2i}^2 = \dots = \sigma_{ji}^2 = \dots = \sigma_{ki}^2$.

На основе предложенных в диссертации мер, средств и методов **предложено организационно-методическое обеспечение** (в виде схемы) оценки надёжности ТДСУ по малым выборкам. Эта схема включает три этапа: *предиспытательный аналитический этап, этап проведения испытаний, этап обработки результатов испытаний*. На рис. 3 показана схема методического обеспечения предиспытательного этапа как наиболее важного.

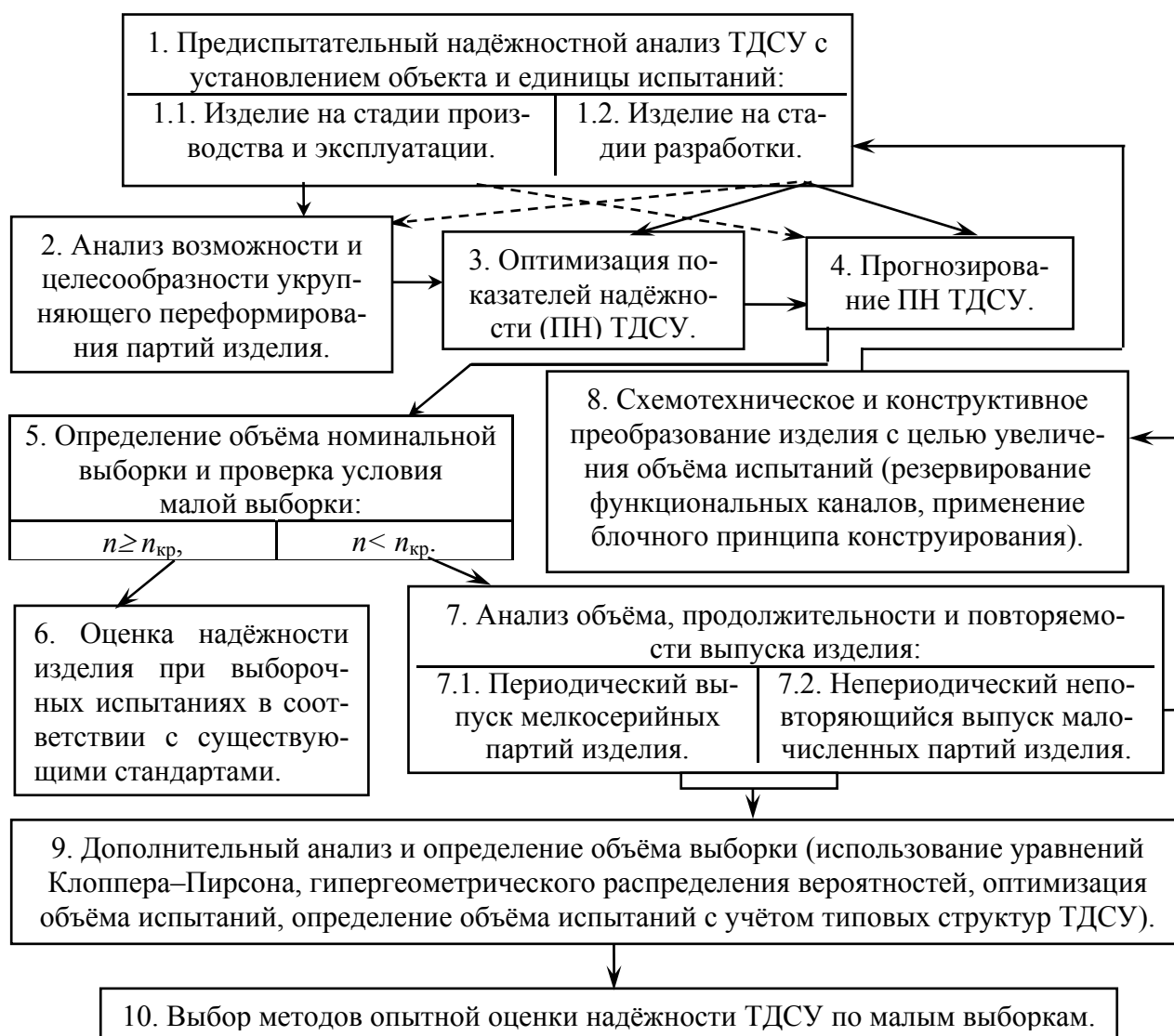


Рис.3. Схема методического обеспечения предиспытательного этапа

В главе 3 исследованы и установлены корреляционные связи между функционально-структурной схемой, конструктивным оформлением ТДСУ, их прогнозируемой надёжностью и опытной оценкой надёжности по малым выборкам, что является методической основой для того, чтобы при разработке изделия целенаправленно закладывать в него

такие схемотехнические и конструктивные решения, которые позволяют оценивать надёжности ТДСУ по малым выборкам с требуемой достоверностью. Рассмотрены ниже взаимосвязанные вопросы.

Прогнозирование надёжности ТДСУ при их разработке.

Оценка надёжности и эффективности применения ТДСУ должна включать прогнозирование и оценку уровня экспериментальной отработки и надёжности изделий на этапе ОКР не только для подтверждения эффективности и достоверности отработки (и доработки) изделий, но и для получения априорных данных, необходимых при оценке надёжности ТДСУ в реальных условиях применения.

В этом аспекте предложены *методы прогнозирования и оценки степени отработанности изделий, метод оптимизации экспериментальной отработки изделия и метод прогнозирования и оценки показателей надёжности ТДСУ*. Указанные методы помимо того, что способствуют накоплению априорной информации о надёжности изделий, ещё и усиливают возможность разработки качественных изделий, при испытаниях которых выборочным методом возрастает достоверность оценки их надёжности и в тем большей степени, чем качественнее изделия.

Оптимизация проектного значения ВБР при ожидаемой опытной оценке надёжности ТДСУ по малым выборкам. Оптимальная ВБР изделия P_{opt} определяется в технико-экономическом аспекте эффективности объектов управления, из зависимости $C=C(P)$, где C – стоимость выполнения определённой задачи с помощью объекта, в составе которого применяется данная ТДСУ с ВБР P , так что при $P=P_{opt}$ имеем $C=C_{min}$.

Опыт разработки ТДСУ показывает, что P_{opt} для ТДСУ различного назначения находятся в пределах 0,85...0,999.

Оценка надёжности термодинамических систем управления по малым выборкам с учётом их функционально-структурной схемы.

Основные положения

Верхняя граница ВО ТДСУ Q_B может быть найдена из уравнения $\int_0^{Q_B} f(Q) \cdot dQ = \gamma$, (7)

где $f(Q)$ – плотность распределения ВО изделия.

Совокупность испытываемых образцов изделия представляет собой биномиальную выборку

$$P(n, m / Q) = C_n^m Q^m (1 - Q)^{n-m} \quad (8)$$

вероятность получения m отказов при испытаниях n образцов.

Формула Байеса для определения плотности ВО изделия с учётом результатов испытаний и априорной информации – $f(Q/n, m)dQ = \frac{f_0(Q) \cdot P(n, m / Q)dQ}{\int_0^1 f_0(Q) \cdot P(n, m / Q)dQ}$. (9)

Нахождение P_H ТДСУ, выполненной в виде моноблока

$$P_H = 1 - Q_B, \quad (10)$$

где Q_B находится с помощью выражений (7) – (9). В диссертации при определении Q_B рассмотрены различные случаи априорного закона распределения этой величины.

Нахождение P_H ТДСУ в случае её блочной конструкции

1). $P(n_i, m_i / Q) = C_{n_i}^{m_i} Q^{m_i} (1 - Q)^{n_i - m_i}$, где n_i, m_i – число испытаний и отказов i -го блока.

$$2). f(Q_i)dQ_i = \frac{f_0(Q_i) \cdot P(n_i, m_i / Q_i) dQ_i}{\int_0^1 f_0(Q_i) \cdot P(n_i, m_i / Q_i) dQ_i}, \text{ где } f(Q_i) - \text{плотность распределения ВО } i\text{-го бло-}$$

ка. Распределение ВО изделия в целом определяется как

$$F_0(Q) = \int_0^{Q_1} \int_0^{Q_2} \dots \int_0^{Q_k} f(Q_1)f(Q_2)\dots f(Q_i)\dots f(Q_k) \cdot dQ_1 \cdot dQ_2 \dots dQ_i \dots dQ_k,$$

$$\text{а априорная плотность ВО ТДСУ} - f_0(Q) = \frac{dF_0(Q)}{dQ}.$$

4). Верхняя граница ВО Q_B определяется из уравнения (7).

5). Величина P_H находится по выражению (10).

Для ТДСУ с мажоритарным резервированием по схеме “2 из 3”:

$$f(Q) = \frac{Q^{0,5(m_1-1+2m_2)} \left(1 - \sqrt{\frac{Q}{3}}\right)^{n_1-m_1} (1-Q)^{n_2-m_2}}{\int_0^1 Q^{0,5(m_1-1+2m_2)} \left(1 - \sqrt{\frac{Q}{3}}\right)^{n_1-m_1} (1-Q)^{n_2-m_2} dQ}.$$

Для ТДСУ с дублированием функциональных каналов:

$$f(Q) = \frac{Q^{0,5(m_1-1+2m_2)} (1 - \sqrt{Q})^{n_1-m_1} (1-Q)^{n_2-m_2}}{\int_0^1 Q^{0,5(m_1-1+2m_2)} (1 - \sqrt{Q})^{n_1-m_1} (1-Q)^{n_2-m_2} dQ}.$$

Таким образом, предложен **метод для оценки надёжности разнообразных по конструкции ТДСУ**: моноблоков, полиблоков, системы с дублированием функциональных каналов и с мажоритарным резервированием, причём, **с возможностью учёта неоднородной информации** о результатах испытаний.

В качестве одного из примеров, содержащихся в диссертации, приведены результаты оценки надёжности ТДСУ с мажоритарным резервированием по этому методу (табл. 3).

Таблица 3

P_H ТДСУ с мажоритарным резервированием по схеме “2 из 3” (испытания n_1 каналов n_2 образцов ТДСУ, числа отказов: $m_1=0, m_2=1$)

γ	P_H при n_1/n_2								
	2/5	2/10	5/10	5/20	5/30	10/20	10/30	10/50	15/50
0,5	0,872	0,907	0,940	0,955	0,964	0,968	0,973	0,980	0,983
0,7	0,821	0,868	0,904	0,934	0,949	0,955	0,962	0,971	0,975
0,8	0,786	0,840	0,807	0,921	0,938	0,945	0,953	0,964	0,970
0,9	-	0,809	0,868	0,901	0,920	0,929	0,940	0,954	0,964
0,95	-	-	0,845	0,881	0,904	0,915	0,928	0,944	0,952
0,99	-	-	-	-	-	0,891	0,901	0,923	0,935

Исследована дифференцированная оценка надёжности ТДСУ по их различным функциям, учитывающая влияние отдельных функций на надёжность всей системы при её функционировании. Целесообразно руководствоваться установленными в диссертации соотношениями вероятностей выполнения их функций и соответствующих доверительных вероятностей (3), (4) при оценке надёжности ТДСУ по малым выборкам.

При обычных испытаниях на надёжность ТДСУ как моноблока, требуемая надёжность подсистем и их доверительные вероятности установлены по одному уровню – ВБР ТДСУ в целом. При этом проводятся “лишние” испытания – увеличивается объём испытаний. При дифференцированной оценке надёжности ТДСУ по её различным функциям

можно уменьшать объём испытаний, устранив “лишние”, получать ценную информацию о надёжности подсистем, которая может рассматриваться как априорная при продолжении испытаний.

Предложенный метод оценки надёжности ТДСУ по малым выборкам с учётом дифференцированного подхода к вероятностям выполнения различных функций этих систем включает в себя:

1. Определение значения величин, входящих в (3) и (4), и накопление априорной информации о надёжности систем.
2. Проведение испытаний и получение опытной оценки надёжности отдельных подсистем ТДСУ, т.е. дифференцированно.
3. Обработка накопленных данных по надёжности и формулировка априорного распределения ВО ТДСУ и её СЧ.
4. Испытания определённого, в том числе, возможно, малого числа ТДСУ. Фиксация полученных данных о ВБР СЧ и ТДСУ в целом.
5. Нахождение показателей надёжности ТДСУ с учётом результатов испытаний ТДСУ и полученной априорной информации.

Пример оценки по этому методу в табл. 4, а по обычному методу – в табл. 5–6.

Таблица 4

Нижняя граница ВБР ТДСУ по результатам дифференцированной оценки надёжности ТДСУ по её различным функциям

$\gamma=0,8$										
n	3		4		5			6		
m	0	1	0	1	0	1	2	0	1	2
P_H	0,99	0,96	0,997	0,991	0,999	0,996	0,791	0,999	0,997	0,948

Таблица 5

Объёмы выборки для подтверждения значений ВБР ТДСУ (по статистическим данным)

$\gamma=0,8; m=0$					
P_H	0,8	0,83	0,85	0,88	0,9
n	7	12	17	22	30
P_H	0,92	0,93	0,94	0,945	0,955
n	37	45	51	58	67

Таблица 6

Объёмы выборки для подтверждения значений ВБР ТДСУ (с учётом АИ о надёжности)

$\gamma=0,8; m=0$					
P_H	0,8	0,83	0,85	0,88	0,9
n	3	4	4	6	7
P_H	0,92	0,93	0,94	0,945	0,955
n	9	11	12	14	17

Сравнение табл. 4 и табл. 5, 6 по объёмам испытаний, требующимся для подтверждения значений ВБР ТДСУ, показывает превосходство дифференцированной оценки надёжности ТДСУ по различным функциям перед традиционным методом.

Таким образом, дифференцированная оценка надёжности ТДСУ по различным функциям является одним из эффективных методов опытной оценки надёжности этих систем, особенно по малым выборкам. Она позволяет применять принцип эргодичности (относительно отдельных СЧ ТДСУ), использовать априорную информацию о надёжности с целью уменьшения затрат на испытания и повышать достоверность оценки. Кроме того, дифференцированная оценка надёжности ТДСУ полезна уже на этапе проектирования ТДСУ, при задании и проверке обоснованности требований по надёжности подсистем.

Разработка ТДСУ с учётом ожидаемых испытаний на надёжность по малым выборкам.

Результаты анализа, проведённого в диссертации, показывают, что блочный метод конструирования ТДСУ, помимо того, что обеспечивает технологичность, надёжность и эксплуатационные преимущества изделий, ещё позволяет: испытывать по отдельности

блоков с определёнными функциями и производить дифференцированную оценку вероятности выполнения отдельных функций ТДСУ; применять принцип эргодичности при испытаниях отдельных блоков, что невозможно сделать при испытаниях ТДСУ в целом; накапливать информацию о надёжности блоков, что особенно важно для унифицированных и стандартных блоков.

Указанные достоинства блочного метода позволяют **рекомендовать: 1) конструировать ТДСУ из блоков**, которые могут выполнять отдельные функции и операции при функционировании системы, **2) увеличивать число блоков многократного действия**, особенно в тех случаях, когда оценка надёжности ТДСУ должна производиться по малым выборкам.

Однако при блочном конструировании ТДСУ требуется рассматривать взаимосвязанные факторы и показатели, влияющие на качество изделия в целом: надёжность, габариты, массу, потребляемую мощность и стоимость конструируемой системы. От этого зависит, на каком иерархическом уровне должны находиться конструируемые блоки, а также рациональное число блоков на каждом уровне. Поэтому в диссертации **предложен подход к выбору варианта блочного конструирования ТДСУ с приоритетом при этом комбинированного критерия “надёжность–объём испытаний”**. С помощью оценочной функции производится нахождение, сравнение скалярных оценок вариантов и выбор из них оптимального варианта блочного конструирования изделия, обеспечивающего возможность оценки его надёжности по малым выборкам.

Выбор кратности резервирования функциональных каналов при проектировании ТДСУ.

Следует увеличивать кратность резервирования изделия при условии их мелкосерийного и непериодического производства. *Но какая кратность нужна?*

В главе 3 установлены корреляционные связи между получаемой оценкой надёжностью (P_H), объёмом испытаний (n), достоверностью оценки (γ) и числом резервированных каналов (k) или кратностью резервирования ($k-1$), в аспекте оценки надёжности по малым выборкам. На рис. 4 показан пример зависимости $n = n(P_H, \gamma, k)$ при различных значениях γ и k .

Предложена **методика выбора кратности резервирования функциональных каналов или структурных элементов ТДСУ**:

1). Прогнозирование надёжности ТДСУ, построенных по различным схемам резервирования, в результате чего находятся зависимости $n = n(P_H, \gamma, k)$ и $P_H = P_H(n, \gamma, k)$.

2). Определение затрат поставщика для различных вариантов резервирования:

$$C = (N+n) \cdot C_0 \cdot k_{ci} + C_{и1} \cdot n_1 + C_{и2} \cdot n_2,$$

где C – затраты на производство партии ТДСУ, включая затраты на испытания; N – число образцов ТДСУ в партии; n – число испытываемых образцов; n_1 – число испытываемых резервированных функциональных каналов; n_2 – число испытываемых образцов системы в случае резервирования её функциональных каналов; C_0 – стоимость образца изделия без резервирования; $C_{и1}$ – стоимость проведения одного испытания канала; $C_{и2}$ – стоимость проведения одного испытания ТДСУ в целом; k_{ci} – коэффициент повышения стоимости образца в связи с увеличением числа резервированных функциональных каналов ТДСУ, индекс i – номер варианта резервирования.

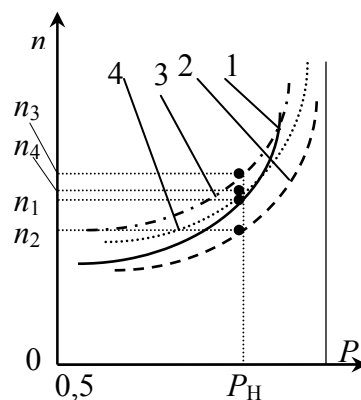


Рис. 4. Зависимость $n = n(P_H, \gamma, k)$: кривая 1 при γ_1, k_1 ; 2 при γ_1, k_2 ; 3 при γ_2, k_1 ; 4 при γ_2, k_2 ($k_1 < k_2, \gamma_1 < \gamma_2$)

3). Сравнение вариантов ТДСУ и выбор варианта, соответствующего наименьшим затратам при условии обеспечения достаточной надёжности.

Например, при $P_H=0,95$; $\gamma=0,8$ функциональный канал должен дублироваться для минимизации затрат на изготовления и испытания ТДСУ.

В результате анализа **рекомендуется увеличение кратности резервирования функциональных каналов**: при выпуске очень малочисленных партий ТДСУ (например, до 10 штук); при мелкосерийном производстве ТДСУ с обеспечением их высокой надёжностью; при выпуске ТДСУ особо ответственного назначения.

В главе 4 освещены практическая реализация и экономические аспекты предложенной методики, а также анализ достоверности оценки.

Практическое применение методики оценки надёжности ТДСУ по малым выборкам.

Разработанная методика полезна в случаях, когда опытная информация не достаточна для подтверждения надёжности изделия: при оценке надёжности ТДСУ на этапах разработки, при проведении контрольных испытаний при выпуске ТДСУ, для принятия решения о допуске ТДСУ к применению или продлении срока их хранения, что особенно актуально по сложившимся обстоятельствам для условий Вьетнама, в интересах которого в частности выполнена данная диссертационная работа.

В результате анализа практических оценок и расчётов надёжности ТДСУ, хранящихся в условиях Вьетнама, даны рекомендуемые объёмы испытаний и доверительные вероятности оценки в зависимости от числа образцов ТДСУ в партии N и требуемой ВБР P_H .

В 4-й главе также показана **реализация методики укрупняющего переформирования партий ТДСУ**, предложенной в главе 2, в том числе **проверка однородности выборок** для известных вероятностных законов распределения: нормального, биномиального, экспоненциального по различным критериям: Фишера, Стьюдента, Уэлча и др.

Анализ достоверности указанной оценки надёжности связывается со схемой оценки надёжности ТДСУ по малым выборкам, которая в соответствии с рассмотренными мерами, средствами и методами (в главах 2, 3), представлена на рис.3. Согласно результатам анализа оценки в главах 2 и 3 данной работы, предложенная методика позволяет оценивать надёжности ТДСУ по малым выборкам с заданной доверительной вероятностью.

Технико-экономические аспекты реализации методики.

Этот вопрос рассмотрен на всех этапах выполнения данной работы (в процессе исследования и изложения диссертационной работы). Разработанная методика оценки надёжности ТДСУ по результатам испытаний малых выборок даёт предприятию экономический выигрыш за счёт снижения затрат на испытания, что даёт реальную возможность её внедрения в практику.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследование опытной оценки надёжности ТДСУ по малым выборкам привело к следующим выводам:

1. Предложенная комплексная методика обеспечения оценки надёжности термодинамических систем управления по результатам испытаний малых выборок с учётом их функционально-структурных особенностей и конструктивных разновидностей позволяет оценивать надёжность этих систем с требуемой доверительной вероятностью.

2. На основе анализа статистических методов оценки надёжности изделий и способов уменьшения объёма испытаний в предложенную методику включён комплекс методов, применяемых по отдельности или в комбинациях в зависимости от конкретных обстоя-

тельств и предпосылок испытаний ТДСУ. В качестве наиболее эффективных методов, в аспекте малых выборок, предлагается использовать:

метод, основанный на формулах Байеса и позволяющий учитывать априорную и текущую опытную информацию о надёжности ТДСУ;

метод, основанный на принципе эргодичности, пригодный в той или иной мере в зависимости от степени реализации в ТДСУ блочного метода конструирования, с обеспечением условия применимости принципа эргодичности к отдельным блокам;

метод, основанный на предложенном дифференцированном подходе к оценке надёжности ТДСУ с учётом вероятностей выполнения отдельных функций ТДСУ и соответствующих доверительностей;

метод, основанный на предложенном приведении показателей надёжности и прежде всего ВБР ТДСУ к оптимальным значениям, исходя из анализа технико-экономической эффективности комплекса “объект управления - ТДСУ”;

метод, основанный на предложенной оптимизации объёма испытаний с использованием при этом информационного подхода к оценке надёжности;

комбинированный метод, основанный на сочетании вышеуказанных методов между собой и с другими, известными методами, например, методом форсированных испытаний, методом планирования экспериментов.

3. Предложена методика составления планов сокращённых по объёму испытаний сложных изделий, в том числе ТДСУ, с учётом их типовых структур.

4. Установлены корреляционные связи между выбором схмотехнических и конструктивных решений при разработке ТДСУ (в части резервирования их функциональных каналов и структурных элементов, блочного метода конструирования их составных частей), прогнозированием надёжности ТДСУ на стадии НИОКР и опытной оценкой их надёжности по результатам испытаний малых выборок. Обоснована кратность резервирования и показана целесообразность применения блочного метода конструирования ТДСУ в расчёте на малые выборки при испытаниях.

5. Предложенная “методика укрупняющего переформирования” исходных партий ТДСУ позволяет снизить общие затраты на испытания и применять опытную оценку надёжности ТДСУ по истечении сроков хранения, при восстановлении изделий и принятии решения о продлении сроков хранения по малым выборкам, но при этом всё же с возможным наибольшим объёмом этих выборок.

6. Предложена оценка экономической эффективности испытаний ТДСУ по методу малых выборок.

7. Предложенная и обоснованная методика оценки надёжности термодинамических систем управления по результатам испытаний малых выборок нашла применение с подтверждением её основных положений в производстве и процессе эксплуатации изделий во Вьетнаме. Дальнейшие исследования целесообразно проводить в направлении сбора и обработки информации о надёжности в процессе эксплуатации и образцов тех ТДСУ, партий которых принимались (проходили приёмочные или периодические контрольные испытания) по результатам испытаний малых выборок.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Барбашов Г.В., Фам Дык Хунг. Критерий малой выборки/ Известия Тульского государственного университета. Серия “Проблемы специального машиностроения”. Вып. 6 (ч. 2). Тула, ТулГУ, Мин. образования РФ, 2003. С. 134–136.

2. Барбашов Г.В., Фам Дык Хунг. Определения оптимального объёма испытаний изделий на надёжность с помощью априорной и апостериорной информации/ Актуальные вопросы ракетостроения: Сб. статей. Вып. 3/ БГТУ “Военмех” СПб., 2004. С. 25–31.

3. *Фам Дык Хунг.* Уменьшение объёма испытаний при оценке надёжности систем управления с помощью методов форсированных испытаний/ Актуальные вопросы управления в организационно-технических системах: Сб. трудов БГТУ. Вып. 2/ БГТУ “Военмех”, СПб., 2004. С. 159–162.
4. *Барбашов Г.В., Фам Дык Хунг.* Определения объёма испытаний при оценке надёжности систем управления по малым выборкам/ Актуальные вопросы управления в организационно-технических системах: Сб. трудов БГТУ. Вып. 2/ БГТУ “Военмех”, СПб., 2004. С. 39–43.
5. *Барбашов Г.В., Фам Дык Хунг.* Методика составления планов сокращённых по объёму испытаний сложных изделий/ Актуальные вопросы ракетостроения: Сб. статей. Вып. 3/ БГТУ “Военмех”, СПб., 2004. С. 19–25.
6. *Барбашов Г.В., Фам Дык Хунг.* Определение оптимального объёма испытаний изделий на надёжность с помощью априорной и апостериорной информации/ Вооружение, безопасность, конверсия. Часть 1. Пенза, ПГУ, Мин. образования РФ, 2004. С. 33–42.
7. *Барбашов Г.В., Фам Дык Хунг.* Дифференцированная оценка надёжности термодинамических систем управления по различным функциям при испытаниях по методу малых выборок/ Материалы общероссийской научно-технической конференции “Вторые Уткинские чтения”. БГТУ “Военмех”, СПб., 14–15 апреля 2005 г. С. 22–25.
8. *Барбашов Г.В., Фам Дык Хунг.* Выбор кратности резервирования функциональных каналов при проектировании пиротехнических систем управления/ Материалы общероссийской научно-технической конференции “Вторые Уткинские чтения”. БГТУ “Военмех”, СПб., 14–15 апреля 2005 г. С. 26–29.
9. *Фам Дык Хунг.* Основные положения методики оценки надёжности термодинамических систем управления по их малым выборкам/ Материалы общероссийской научно-технической конференции “Вторые Уткинские чтения”. БГТУ “Военмех”, СПб., 14–15 апреля 2005 г. С. 113–116.
10. *Фам Дык Хунг.* Оценка надёжности термодинамических систем управления по результатам испытаний с учётом априорной информации о надёжности этих систем/ Материалы общероссийской научно-технической конференции “Вторые Уткинские чтения”. БГТУ “Военмех”, СПб., 14–15 апреля 2005 г. С. 117–120.
11. *Фам Дык Хунг.* Функционально-структурный анализ и синтез термодинамических систем управления в аспекте надёжности/ Актуальные вопросы управления в организационно-технических системах: Сб. трудов БГТУ. Вып. 3/ БГТУ “Военмех”, СПб., 2005. С. 93–96.
12. *Фам Дык Хунг.* Блочный метод конструирования и его влияние на оценку надёжности пиротехнических систем управления/ Актуальные вопросы управления в организационно-технических системах: Сб. трудов БГТУ. Вып. 3/ БГТУ “Военмех”, СПб., 2005. С. 97–100.
13. *Фам Дык Хунг.* Оценка надёжности пиротехнических систем управления по результатам испытаний малых выборок/ Материалы VI международной конференции “Научно-технические проблемы прогнозирования надёжности и долговечности конструкций и методы их решения”. СПбГПУ, СПб., 14–17 июня 2005 г. С. 408–412.
14. *Барбашов Г.В., Фам Дык Хунг.* Дифференцированный метод оценки надёжности пиротехнических систем управления по малому числу испытаний/ Вестник Санкт-Петербургского института Государственной противопожарной службы (СПбИГПС) МЧС России. № 2[9], СПб., 2005 г. С. 69–72.
15. *Барбашов Г.В., Фам Дык Хунг.* Учет априорной информации при оценке надёжности пиротехнических систем управления по выборочным испытаниям/ Вестник СПбИГПС МЧС России. № 3[10], СПб., 2005 г. С. 85–87.