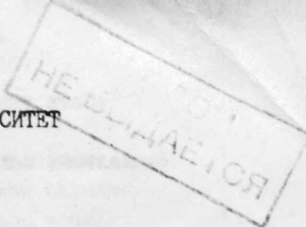


1551442

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
им. Н.Э.Баумана



УДК 62-192+519.248

На правах рукописи

БУРТАЕВ КРИЙ ФЕДОРОВИЧ

ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА МЕТОДИЧЕСКИХ ВОПРОСОВ
УПРАВЛЕНИЯ НАДЕЖНОСТЬЮ ТЕХНИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ НА
ОСНОВЕ ИНФОРМАЦИИ ОГРАНИЧЕННОГО ОБЪЕМА

Специальность 08.00.20 - экономика стандартизации и
управления качеством продукции

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

МОСКВА 1996

Работа выполнена в Обнинском институте атомной энергетики

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук
Баскаков В.Н.
доктор технических наук, профессор
Грабовецкий В.П.
доктор технических наук, профессор
Дружинин Г.В.

I дущая организация: Всероссийский электротехнический
институт им. В.И.Ленина

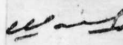
Защита состоится 3 октября 1996 г. в 14 час. 30 мин.
на заседании диссертационного совета по защите докторских дис-
сертаций ДР 053.15.96 при Московском государственном
техническом университете им.Н.Э.Баумана по адресу 107005, Москва,
2-ая Бауманская ул., д.5.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ

24 с 1996г.

м экземпляре, заверенный
о адресу: 107005, Москва,
.Баумана, Ученому секретарю

1551442

 Шачнев О.А.

Актуальность темы исследования. Управление надежностью технических устройств – одна из сложных и многогранных научно-технических проблем, решению которой уделяется большое внимание в различных областях техники. В отечественных и зарубежных источниках приводится большое количество примеров, подтверждающих роль надежности технических устройств различного назначения в решении проблем эффективности, безопасности, безаварийности.

Отдельные вопросы, связанные с проблемой управления надежностью, достаточно глубоко проработаны, что позволило разработать ряд стандартов, методических указаний и других нормативных документов, носящих как отраслевой, так и межотраслевой характер.

Однако целый ряд вопросов, относящихся к проблеме надежности, еще ожидает своего решения. К ним, в частности, относятся вопросы статистического анализа в условиях ограниченной информации, нормирования и контроля надежности изделий, выпускаемых или приобретаемых в небольшом количестве.

Ряд специалистов отмечает, что при неуклонном росте общего потока информации в конкретных ситуациях объем информации очень часто бывает незначительным. Неизбежной платой за попытку получить решение в условиях ограниченной информации является возможность принятия ошибочного решения, поэтому исследователь должен иметь возможность оценить вероятность ошибки и её величину.

Возникновение ситуаций, требующих проведения анализа надежности в условиях ограниченной информации, обусловлено следующими факторами:

1. Научно-технический прогресс приводит к частой сменяемости объектов производства. Следствием этого является выпуск изделий малыми партиями, сериями.

2. Наличие общей тенденции к повышению надежности приводит к тому, что отказы становятся все более редкими событиями.

3. Надежность объектов проявляется, как правило, в процессе длительной эксплуатации, а потребность в проведении анализа возникает уже на ранних стадиях эксплуатации.

В процессе управления надежностью можно выделить три этапа:

НТБ МГТУ им. Н.Э. Баумана



1551442

Буртаев Ю.Ф. Исследование

I



задание цели управления, т.е. номенклатуры и численных значений показателей надежности;

получение информации для оценки ситуации, т.е. оценка или контроль показателей надежности;

выработка и осуществление управляющих воздействий, т.е. разработка и выполнение мероприятий по обеспечению заданных численных значений показателей надежности.

Ограниченность информации приводит к необходимости использования при анализе надежности непараметрических методов, т.е. не связанных с предположениями о виде распределения и его параметрах.

Исследование и разработка методов решения вопросов, связанных с первыми двумя этапами процесса управления надежностью в условиях ограниченной информации, и определяет актуальность выполненной работы.

Состояние вопроса. Идеи и методы, связанные с вопросами управления надежностью изложены в работах известных отечественных и зарубежных ученых: Б.В.Гнеденко, Е.Ю.Барзиловича, Ю.К.Беляева, В.П.Грабовенского, Г.В.Дружинина, В.А.Каштанова, А.С.Проникова, И.А.Рябикина, А.Д.Соловьева, И.А.Ушакова, Я.Б.Шора, Р.Барлоу, Л.Лойда, М.Липова, Ф.Прошана. В трудах перечисленных ученых, а также в работах других авторов уделяется основное внимание математическим методам и моделям; методам статистического анализа и контроля; оптимизации надежности, технического обслуживания и ремонтов. Методические вопросы управления надежностью на базе стандартизации подробно рассмотрены В.Н.Фоминим.

Актуальность проблемы принятия решений в условиях ограниченной информации привела к появлению работ, направленных на преодоление трудностей, вызванных этой ситуацией. Разработка математических моделей для оценки надежности сложных систем в условиях редких событий проведена И.Н.Коваленко. Вопросы организации технического обслуживания при ограниченной информации о надежности исследованы Е.Ю.Барзиловичем и В.А.Каштановым. Методы учета априорной информации при оценивании надежности отражены в достаточно большом количестве работ, среди авторов которых можно отметить Л.А.Лейфера, Н.А.Северцева, О.И.Тескина. Проблема индивидуального

прогнозирования надежности исследовалась В.В.Болотиным, Д.В.Гаскаровым, Л.А.Лейфером, А.В.Мозгалеvским.

Методы оценивания и контроля при малых выборках рассмотрены в работах Ю.К.Беляева. Вопросам ускоренных испытаний на надежность посвящены работы Г.Д.Карташова и А.И.Лерроте.

Анализ публикаций по проблеме управления надежностью в условиях ограниченной информации показал, что в них уделяется недостаточно внимания непараметрическим методам статистического анализа, оценивания и контроля по малым выборкам, а там, где эти вопросы рассматриваются, они не доведены до уровня проработки, позволяющего их практическое использование.

Цель и задачи работы. Целью работы является разработка методологии выбора и нормирования показателей, а также анализа, оценивания и контроля надежности при малых выборках на базе критериев и алгоритмов непараметрической статистики.

Задачи работы.

1. Разработка методического подхода к выбору номенклатуры показателей надежности, учитывающего интересы потребителя небольшого количества объектов.

2. Получение математических выражений для выбора оптимального варианта исполнения объектов по совокупности их показателей надежности.

3. Исследование точности методов оценивания надежности по цензурированным выборкам и разработка рекомендаций по их применению при малых выборках.

4. Исследование свойств непараметрических критериев однородности при малых выборках и разработка рекомендаций по их применению.

5. Исследование свойств непараметрических автокорреляционных критериев при малых выборках и разработка рекомендаций по их применению.

6. Разработка системы контроля надежности по выборкам малого объема, основанной на применении непараметрических методов статистики.

7. Разработка табличного обеспечения предлагаемых методов.

Научная новизна. Научная новизна определяется следующими результатами:

разработан методический подход к выбору показателей надежности для включения в НТД, учитывающий интересы потребителей небольшого количества объектов, основанный на моделях гарантированного эффекта;

проведено исследование точности методов оценивания надежности по цензурированным выборкам, что позволило сделать вывод о предпочтительности применения при малых выборках метода последовательного перехода к новой системе координат;

предложен новый критерий однородности двух выборок для альтернатив пересечения функций распределения;

разработан алгоритм проверки однородности двух выборок при альтернативе общего вида, основанный на применении критерия Сэвиджа (или обратных рангов) и критерия для альтернатив с пересечением функций распределения;

предложен новый автокорреляционный критерий, обладающий при малых выборках лучшими свойствами по сравнению с известными критериями Кендалла и Спирмена;

разработана система контроля надежности, основанная на применении ранговых критериев однородности.

Практическая значимость работы состоит в том, что предложенные методы и критерии проработаны до уровня, обеспечивающего возможность их практического применения:

составлена таблица, позволяющая по классификационным признакам объекта на основе моделей гарантированного эффекта выбрать для него совокупность показателей надежности;

получены математические выражения, по которым определяются оптимальные варианты исполнения объектов для всех возможных совокупностей показателей надежности, выбранных по моделям гарантированного эффекта;

приведены таблицы коэффициентов для вычисления консервативных интервальных оценок показателей надежности, полученных методом последовательного перехода к новой системе координат;

приведены таблицы критических значений и рекомендации по их использованию для предложенных критериев обратных рангов, отношения рангов, автокорреляционного критерия обратных рангов, а также впервые приводятся аналогичные таблицы и рекомендации для критерия Сэвиджа;

приведены данные о мощности предложенных критериев при

различных объемах выборок для ряда альтернатив;

приведены таблицы, позволяющие при заданных рисках поставщика и потребителя, объеме эталонной выборки, отношении приемочного уровня надежности к браковочному выбрать минимальный объем контролируемой выборки в случае использования при контроле рангового критерия однородности.

Основные положения, выдвигаемые автором на защиту:

1. Методический подход к выбору показателей надежности, основанный на моделях с гарантированным эффектом.

2. Результаты исследования и сравнения точности методов оценивания надежности по цензурированным выборкам.

3. Алгоритм проверки однородности двух выборок при альтернативе общего вида.

4. Ранговый критерий однородности для альтернатив с пересечением функций распределения.

5. Ранговый автокорреляционный критерий для проверки наличия тренда на начальном и завершающем периодах эксплуатации.

6. Система контрольных испытаний на надежность, основанная на использовании рангового критерия однородности.

7. Практические рекомендации по применению разработанных методов и критериев.

Реализация работы.

Материалы по выбору показателей надежности на основе моделей с гарантированным эффектом были использованы при разработке трех Государственных стандартов ОТУ на статические преобразователи электроэнергии, Руководящих технических материалов Министерства электростехнической промышленности СССР, трех методик и стандартов НИИ силовой электроники.

Процедура контроля надежности, основанная на применении рангового критерия, реализована в стандарте завода "Электро-выпрямитель" и методике НИИ силовой электроники, согласованных с основным заказчиком.

Элементы методики проверки однородности по ранговому критерию были использованы при сравнении качества ремонта на предприятиях Госкомсельхозтехники по данным об ускоренных ресурсных испытаниях автотракторных генераторов, анализе послеремонтной надежности и разработке Общесоюзных норм расхода за-

пасных частей автотракторного электрооборудования.

Материалы по статистическому анализу надежности на завершающем этапе эксплуатации использовались при принятии решений о продлении срока эксплуатации систем управления и защиты, контроля герметичности оболочек тепловыделяющих элементов, внутриреакторного контроля энерговыделения реакторов ЭГП-6 Библибинской АЭС.

Частично материалы исследований использовались в трех учебных пособиях Московского института радиотехники, электроники и автоматики и двух Обнинского института атомной энергетики.

Публикации. Всего по теме диссертации опубликовано 68 работ в том числе книга (в соавторстве), 5 учебных пособий, 46 статей и докладов.

Апробация. Основные положения и результаты, изложенные в работе, докладывались более чем на 20 научно-технических конференциях и семинарах, в том числе Международных конференциях: стран-членов СЭВ по оценке, испытаниям и контролю качества продукции (Ереван, 1982), по безопасности АЭС и подготовке персонала (Обнинск, 1991, 1993, 1995), "Вероятностно-физические методы исследования надежности машин и аппаратуры" (Киев, 1992), "Методы и средства оценки и повышения надежности приборов, устройств и систем" (Пенза, 1993, 1995; Саратов, 1994), Российской конференции "Проблемы конверсии, разработки и испытаний приборных устройств" (Владимир, 1993), также на постоянно-действующем научном семинаре "Надежность и качество функционирования систем" Российской Академии наук и международной Академии наук высшей школы (Москва, 1995) и Московском семинаре Российской ассоциации по статистическим методам (1995).

Объем работы. Работа состоит из введения, семи глав, заключения, списка литературы из 95 названий. Текст изложен на 243 стр., включая 10 рисунков, 24 таблицы и 9 приложений.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность проблемы, определены научная новизна и практическая ценность работы.

В первой главе приведен анализ задач, решаемых в процес-

се управления надежностью. В соответствии с общими принципами управления, включающими, как отмечено выше, 3 этапа, система управления надежностью должна функционировать на стадиях проектирования, производства и эксплуатации рис.1. На каждой из этих стадий задаются требования к надежности в виде номенклатуры и численных значений показателей надежности, осуществляется контроль выполнения требований и разрабатываются мероприятия по их удовлетворению в случае, если требования не удовлетворены.

На основе анализа вида информации, используемой при управлении, сформулированы задачи работы, приведенные выше.

Вторая глава посвящена выбору показателей надежности для включения в нормативно-техническую документацию (НТД). Основы методического подхода к выбору номенклатуры показателей надежности разработаны В.Н.Фоминным и Г.К.Мартыновым. Сущность его состоит в том, что любой объект в результате эксплуатации приносит доход в той или иной форме, величина которого случайна и зависит от надежности объекта, поэтому показатели надежности, входящие в формулу для оценки дохода, являются основными, должны вноситься в НТД и нормироваться. В качестве оценки дохода они использовали его математическое ожидание.

При оценке результатов функционирования объектов необходимо учитывать как полезную отдачу от функционирования, так и затраты. Оценивание можно производить величиной эффекта от эксплуатации

$$Э = D - З, \quad (1)$$

где D - доход;
 $З$ - затраты,
 или эффективность

$$K_3 = \frac{Э}{З} = \frac{D-З}{З} = \frac{D}{З} - 1 \quad (2)$$

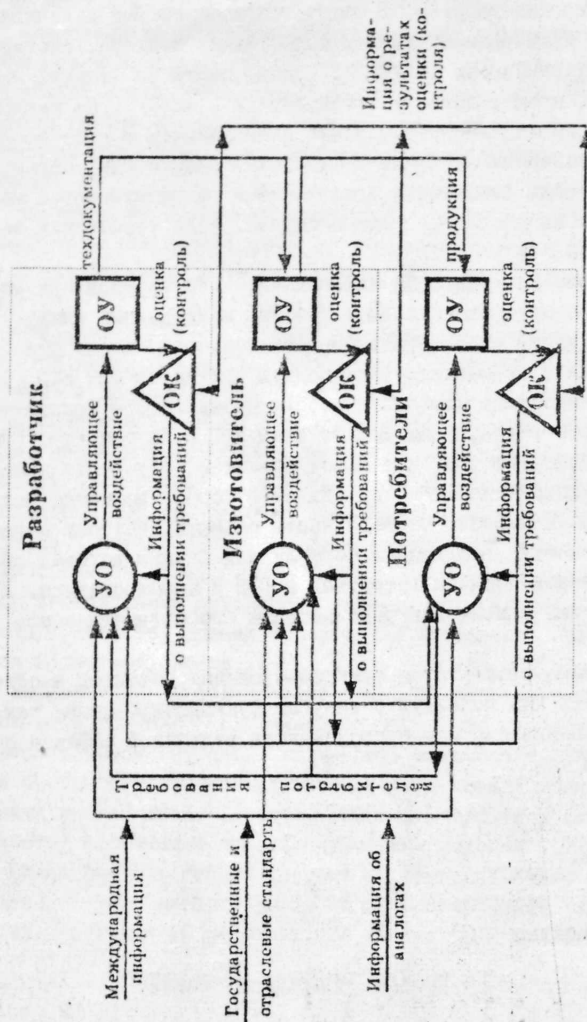


Рис. 1. Блок-схема управления надежностью:

УО - Управляющий Орган;
 ОУ - Объект Управления;
 ОК - Орган Контроля.

Поскольку в оба выражения входят только доход и затраты, поэтому выбор выражения для оценки результатов функционирования не оказывает влияния на конечный результат.

Если потребитель эксплуатирует n однотипных объектов, то при достаточно большом n эффект от эксплуатации этой группы изделий может быть достаточно точно определен из выражения

$$\mathcal{E}_n = n M_3 \quad (3)$$

где M_3 - математическое ожидание эффекта.

Однако при малых n этот подход применять нельзя. В этом случае автор настоящей работы считает целесообразным использовать принцип Ю.В.Гермейера (принцип гарантированного результата), который в применении к задачам надежности интерпретируется следующим образом (И.Л.Платнев, А.И.Рембеза и др.): если оценка вероятности близка к 1, то она может быть истолкована как уровень практической гарантии при одном опыте. В соответствии с этим принципом в качестве оценки эффекта принята его квантиль $\mathcal{E}_r$, соответствующая вероятности

P_r . Если эффект имеет плотность распределения $f(\mathcal{E})$, то эти характеристики связаны выражением:

$$P_r = \int_{\mathcal{E}_r}^{\infty} f(\mathcal{E}) d\mathcal{E} \quad (4)$$

Определенная таким образом оценка названа "гарантированным эффектом". При таком подходе к выбору показателей потребитель небольшого количества объектов может быть достаточно твердо уверен, что каждый из эксплуатируемых им объектов принесет эффект $\mathcal{E}_r$. При этом вероятность P_r может рассматриваться как величина, количественно характеризующая гарантию получения эффекта величиной не менее $\mathcal{E}_r$, т.е. гарантия имеет вероятностный смысл.

Предложенная модель была применена для выбора показателей надежности объектов с различными классификационными признаками. Полученные результаты представлены в табл. I.

В табл. I приняты следующие обозначения классификационных признаков:

1. Режим применения:
 - 1.1. непрерывный длительный;
 - 1.2. многократный циклический;
 - 1.3. однократный;
 - 1.4. сложный.
2. Возможность восстановления работоспособности после отказа:
 - 2.1. восстанавливаемые;
 - 2.2. невосстанавливаемые.
3. Возможность проведения технического обслуживания:
 - 3.1. обслуживаемые;
 - 3.2. не обслуживаемые.
4. Характер зависимости величины дохода от работоспособности:
 - 4.1. доход пропорционален суммарному времени пребывания объекта в работоспособном состоянии;
 - 4.2. объект приносит доход, если безотказно проработает в течение заданного времени t_p .
5. Фактор, играющий основную роль при оценке функциональных последствий отказа:
 - 5.1. вынужденный простой;
 - 5.2. необходимость затрат на восстановление;
 - 5.3. вынужденный простой и необходимость затрат на восстановление.
6. Событие, приводящее к прекращению эксплуатации:
 - 6.1. отказ;

Таблица I

Классификационные признаки объектов						Показатели надежности	
I.1	2.1	3.1	4.1	5.1			$T_{pr}, \tau_r, r_r, \theta_{r10}$
				5.2			$T_{pr}, C_{pr}, r_r, \theta_{r10}$
				5.3			$T_{pr}, \tau_r, C_{pr}, r_r, \theta_{r10}$
		3.2	4.1	5.1			T_{pr}, τ_r, r_r
				5.2			T_{pr}, C_{pr}, r_r
				5.3			$T_{pr}, \tau_r, C_{pr}, r_r$
	2.2	3.2	4.1		6.1		T_{or}
					6.2		$\rho(t_p)$
I.2	2.1	3.1	4.1	5.1	6.3		$T_{pr}, \tau_r, r_r, \theta_{r10}$
				5.2			$T_{pr}, C_{pr}, r_r, \theta_{r10}$
				5.3			$T_{pr}, \tau_r, C_{pr}, r_r, \theta_{r10}$
			4.2	$\rho(t_p), N_r, t_{r10}, C_{pr}, T_{ca,r}$			
	2.2	3.2			6.1	T_{or}	
	I.3	2.1	3.1	4.2		6.3	7.1
			6.2			$\rho(t_p), T_{ca,r}$	
2.2		3.2	6.3			$\rho(t_p), T_{ca,r}$	
I.4	2.1	3.1	4.2		6.3	7.1	$\rho(t_p), N_r, t_{r10}, T_{ca,r}$
						7.2	$K_{or}, T_{ca,r}$

6.2. окончание выполнения заданных функций;

6.3. достижение предельного состояния.

7. Возможность проведения контроля перед применением:

7.1. контролируемые;

7.2. неконтролируемые.

Для показателей надежности приняты обозначения:

Γ_{pr} - гамма-процентный ресурс;

Γ_{τ} - гамма-процентное время восстановления;

Γ_{pr} - гамма-процентная стоимость восстановления;

Γ_{τ} - гамма-процентное количество отказов;

$\Theta_{\tau 10}$ - гамма-процентное время технического обслуживания;

$\Theta_{\tau 10}$ - гамма-процентная наработка до отказа;

$P(t)$ - вероятность безотказной работы за время t ;

$P(t_0)$ - вероятность безотказной работы в цикле;

$t_{\tau 10}$ - гамма-процентное время приведения в готовность при техническом обслуживании;

N_{τ} - гамма-процентное количество безотказных циклов;

$t_{\tau 10}$ - гамма-процентное время приведения в готовность в режиме ожидания;

K_{op} - коэффициент оперативной готовности.

В качестве показателей надежности на период хранения в соответствии с изложенным подходом необходимо назначать гамма-процентный срок сохраняемости, а если к объекту предъявляется требование мгновенной готовности к работе во время хранения, то - гамма-процентный срок сохраняемости, коэффициент готовности при хранении и вероятность восстановления за время t_{τ} .

Для достижения определенной завершенности задачи выбора показателей надежности объектов, поступающих к потребителю в небольшом количестве, необходимо иметь возможность сравнения различных вариантов исполнения объекта и выбора наилучшего из них. Поскольку в большинстве случаев объекты характеризуются

несколькими показателями, задача является многокритериальной. В работе в качестве оптимального варианта исполнения объекта принят тот, который обеспечивает получение наибольшего эффекта от эксплуатации на единицу суммарных затрат на изготовление и эксплуатацию. Этот уровень определяется выражением

$$K = \frac{3}{3_и + 3_э}, \quad (5)$$

где $3_и$, $3_э$ - затраты на изготовление и эксплуатацию.

В работе получены формулы для вычисления величины K объектов, характеризуемых совокупностями показателей, полученными в работе. Например, для объектов, показателем надежности которых является гамма-процентная наработка до отказа $T_{ог}$, величина K определяется выражением:

$$K = \frac{P_{T_{ог}} P(T_{ог}) \int_0^{T_{ог}} e^{-\chi t} dt}{C_0 + \int_0^{T_{ог}} 3(t) e^{-\chi t} dt}, \quad (6)$$

где C_0 - цена объекта;

$3(t)$ - затраты на эксплуатацию, не связанные с восстановлением и техническим обслуживанием (например, на электроэнергию, топливо и т.д.);

χ - коэффициент пропорциональности, учитывающий приращение накоплений на интервале $(0, t)$.

В третьей главе приведены материалы исследования точности оценивания надежности по цензурированным выборкам, т.е. таким, которые содержат сведения о моментах отказов только части объектов. В литературе по методам анализа надежности в случае цензурированных выборок не приводятся сравнительных данных об их свойствах при малых выборках, что не позволяет выбрать наилучший из них в тех или иных условиях. Автор приводит методику исследования и результаты сравнения точности методов Нельсона, Джонсона и последовательного перехода к новой системе координат. Исследование проводилось методом статистических испытаний на ПЭВМ. В связи с его достаточной универсальностью в качестве моделируемого закона распределения наработок до отказа было принято распределение Вейбулла-Гнеденко в двухпараметрической форме:

$$F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{\alpha}\right)^{\beta}} \quad (7)$$

Проведенные исследования позволили сделать вывод о более высокой точности непараметрического метода последовательного перехода к новой системе координат и разработать рекомендации по определению предельных границ средней наработки до отказа, накрывающих ее с заданной вероятностью β . Соответствующие таблицы приведены в приложении I диссертации.

В четвертой главе рассматриваются вопросы проверки однородности информации о надежности, полученной из разных источников. Целью такой проверки является объединение информации для получения более точных и достоверных оценок. Задача формулируется следующим образом. Имеются результаты двух независимых наблюдений над случайной величиной T :

$$t_1^{(1)}, t_2^{(1)}, \dots, t_m^{(1)};$$

$$t_1^{(2)}, t_2^{(2)}, \dots, t_n^{(2)}.$$

Проверяется гипотеза $H_0: F(t) = G(t)$

где $F(t)$, $G(t)$ – функции распределения величины T соответственно в первом и втором наблюдении, в качестве которой могут рассматриваться, например, наработка до отказа или предельного состояния.

В качестве альтернативной гипотезы рассматривается

$$H_1: F(t) \neq G(t)$$

При этом возможны взаимные расположения функций распределения $F(t)$ и $G(t)$, представленные на рис.2. Для выбора подходящего критерия были рассмотрены широко известные в теоретической и прикладной статистике ранговые статистики: Вилкоксона

$$W = \sum_{i=1}^n r_i, \quad (8)$$

ван дер Вардена

$$V = \sum_{i=1}^n \Phi\left(\frac{r_i}{m+n+1}\right); \quad (9)$$

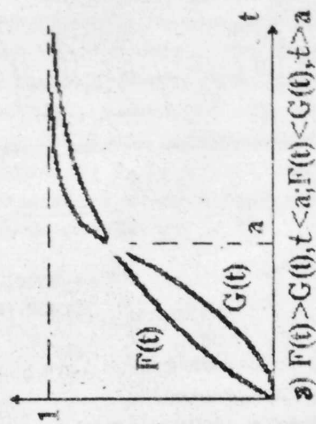
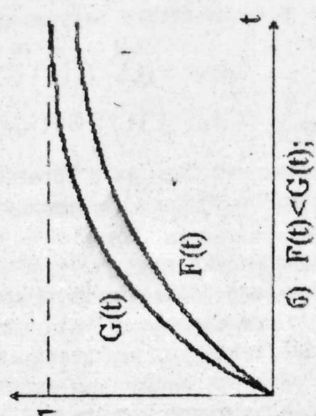
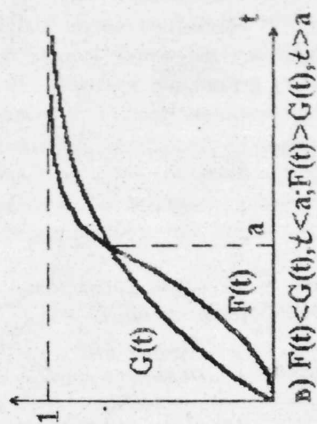
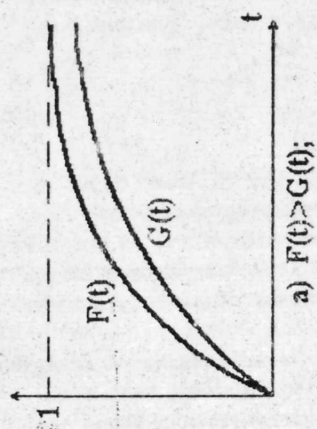


Рис. 2. Возможные варианты расположения функций распределения при проверке однородности двух выборок.

$$S = \sum_{i=1}^n \sum_{j=m+n+1-i}^{m+n} \frac{1}{j}, \quad (10)$$

Лемана-Розенблатта (типа ω^2)

$$T = \frac{1}{mn(m+n)} \left[m \sum_{j=1}^m (r_j - j)^2 + n \sum_{i=1}^n (r_i - i)^2 \right] - \frac{4mn-1}{6(m+n)}, \quad (11)$$

а также предложенная автором статистика обратных рангов

$$S^* = \sum_{i=1}^n \frac{1}{m+n+1-r_i},$$

где r_i - ранг i -го члена выборки 2 в общем вариационном ряде, построенном на выборках объемов m и n ;

$\Phi^{-1}(x)$ - обратная функция стандартного нормального распределения.

Сравнение свойств перечисленных критериев при малых выборках показало следующее:

1) они отклоняют нулевую гипотезу только в случаях взаимных расположений функций распределения 2а и 2б, когда члены одной из выборок имеют тенденцию к концентрации в начале, а другой - в конце общего вариационного ряда, т.е. при альтернативах:

$$H_2: F(t) < G(t),$$

$$H_3: F(t) > G(t),$$

2) статистики Сэвиджа и обратных рангов имеют более высокую плотность заполнения интервала распределения и критической области;

3) расположения членов первой и второй выборок в общем вариационном ряде, образующие критические области, у критериев во многом совпадают.

Учитывая также то, что критерий Сэвиджа является локально наиболее мощным при плотностях экспоненциального типа и локально оптимальным при лемановских альтернативах, можно сделать вывод о том, что при анализе однородности информации о надежности по малым выборкам в случае альтернатив H_2 и H_3 пре-

лесообразно использовать критерий Сэвиджа. Критерий обратных рангов при малых выборках имеет свойства близкие к свойствам критерия Сэвиджа.

При пересечении функции распределения члены одной из выборок имеют тенденцию к концентрации в середине, а другой - по краям общего вариационного ряда. В табл. 2 приведены частоты появления различных расположений членов первой и второй выборок в общем вариационном ряде, полученные методом статистических испытаний для $m = n = 3$ при распределении Вейбулла-Гнеденко с параметрами формы b_1 и b_2 и одинаковым математическим ожиданием. Для наглядности члены первой выборки обозначены через x , а второй - через y .

Таблица 2

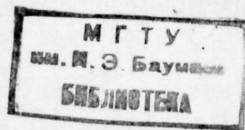
№	Вид расположения						Параметры формы распределений для первой и второй выборок (b_1, b_2)	
							(1,3)	(3,1)
1.	y	y	y	x	x	x	0,039	0,106
2.	x	x	x	y	y	y	0,115	0,027
3.	y	y	x	x	x	y	0,001	0,202
4.	y	x	x	x	y	y	0,007	0,149
5.	x	x	y	y	y	x	0,221	0,006
6.	x	y	y	y	x	x	0,138	0,005
7.	y	x	y	x	x	y	0,012	0,089
8.	y	x	x	y	x	y	0,009	0,0072
9.	x	y	x	y	y	x	0,080	0,005
10.	x	y	y	x	y	x	0,078	0,008

В рассматриваемом случае возможно $C_{m+n}^n = 20$ расположений, пять из них появляются с частотой, превышающей 0,6, т.е. гораздо чаще других. Для выбора подходящего критерия, чувствительного к расположениям членов одной из выборок по краям вариационного ряда были дополнительно рассмотрены статистики:

Хага

$$H = A + B - A' - B' \quad (13)$$

где A - количество наблюдений x_i , больших y_n ;
 B - количество наблюдений y_i , меньших x_1 ;



A' - количество наблюдений y_i , больших x_m ;

B' - количество наблюдений x_i , меньших y_1 ,

$$E = \min(A, B) - \min(A', B'), \quad (14)$$

а также не описанные в литературе статистики

$$|\Delta| = \sum_{i < j}^n |r_i - r_j|, \quad (15)$$

$$\Delta^2 = \sum_{i < j}^n (r_i - r_j)^2, \quad (16)$$

$$R^o = \sum_{i=1}^{n-1} r_i \sum_{j=i+1}^n \frac{1}{r_j}, \quad (17)$$

$$P_R = \prod_{i < j} \frac{r_i}{r_j} \quad (18)$$

Сравнение их свойств при малых выборках показало, что критерий R^o с критической областью $R^o \leq R^o_{\alpha}$ имеет наилучшую плотность заполнения интервала распределения и критической области, а также обеспечивает приоритетность включения в критическую область расположений с членами второй выборки в начале и конце общего вариационного ряда.

На основе проведенного анализа впервые предложена процедура проверки гипотезы однородности при альтернативе общего вида H_1 , предусматривающая применение критериев Сэвиджа (или обратных рангов) и R^o (рис.3). Индексы t' и t'' на рис.3 означают, что статистика вычисляется соответственно для первой и второй выборки, а индекс α относится к критическому значению статистики. Так как критические области этих критериев практически не пересекаются, то H_0 отклоняется либо одним, либо другим критерием. Случаи отклонения H_0 обоими критериями практически исключены. Это означает, что уровень значимости остается таким же, как и при использовании только одного критерия.

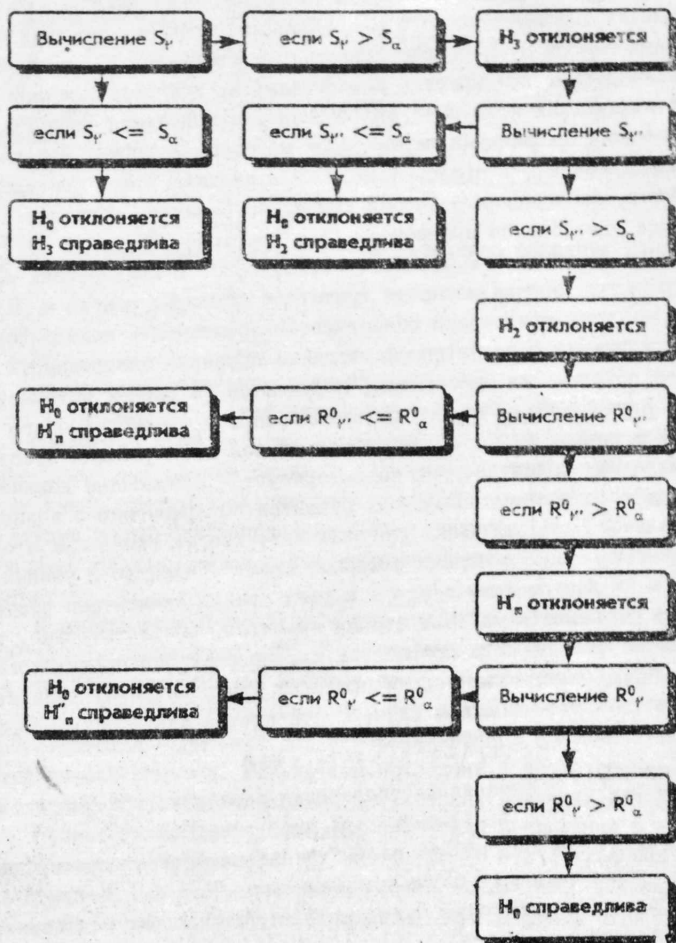


Рис. 3. Схема проверки однородности при альтернативе H_1

В работе получены формулы для вычисления числовых характеристик (математического ожидания, дисперсии) статистик обратных рангов и R^0 , проведен расчет критических значений рекомендуемых критериев и исследована их мощность методом статистических испытаний для случая распределения Вейбулла-Гнеденко с различными параметрами масштаба и формы. Эти материалы приведены в приложениях. В приложениях 2,3,5 приведены таблицы критических значений критериев Сэвиджа, обратных рангов для объемов выборок до 15 и критерия R^0 - до 10 при уровнях значимости 0,05; 0,10; 0,15; 0,20. В приложениях 4, 6 приведены оценки мощности критериев обратных рангов и R^0 . Наличие этих приложений обеспечивает возможность практического применения разработанной методики проверки однородности с целью объединения информации, полученной из разных источников.

В пятой главе рассматриваются вопросы статистического анализа начального и завершающего этапов эксплуатации восстанавливаемых объектов. Они характеризуются повышенным количеством отказов восстанавливаемых объектов по сравнению с этапом нормальной эксплуатации. Это означает, что на начальном этапе наработки между соседними отказами имеют тенденцию к увеличению, а на завершающем этапе - к уменьшению. Элементами статистического анализа на этих этапах являются, соответственно, проверка наличия периода приработки или приближения предельного состояния. В терминах теории проверки статистических гипотез рассматривается гипотеза случайности против альтернативы тренда.

$$H_0: F_i(t) = F(t), \quad i = \overline{1, n},$$

где $F_i(t)$ - функция распределения наработки между $(i-1)$ -ым и i -тым отказами.

Таким образом, при H_0 рассматриваются независимые и одинаково распределенные случайные величины $T_1, T_2, \dots, T_n$.

Для выбора критерия проверки были рассмотрены статистики типа Вилкоксона

$$W_T = \sum_{i=1}^n i r_i, \quad (19)$$

типа ван дер Вардена

$$V_T = \sum_{i=1}^n i \Phi^{-1} \left(\frac{r_i}{m+n+1} \right), \quad (20)$$

$$\rho = 1 - \frac{6 \sum_{i=1}^n (r_i - i)^2}{n^3 - n} \quad (21)$$

Кендалла

$$\tau = \frac{2 \sum_{i=1}^n \sum_{j=i+1}^n \text{sign}(r_j - r_i)}{n(n-1)} \quad (22)$$

а также предлагаемая автором статистика типа обратных рангов

$$S_T^* = \sum_{i=1}^n i r_i^{-1} \quad (23)$$

где i - порядковый номер наработки;

r_i - ранг i -той наработки в вариационном ряде.

Сравнение свойств этих статистик при малых выборках показало, что статистики Кендалла, Спирмена и типа Вилкоксона имеют очень плохую заполняемость интервала распределения, а наилучшую плотность заполнения имеет статистика S_T^* . Это позволяет сделать вывод о предпочтительности использования статистики S_T^* .

В работе получены формулы для определения числовых характеристик статистики S_T^* , рассчитаны критические значения критерия для объемов выборок до 10, исследована мощность критерия S_T^* и критерия Спирмена при малых выборках методом статистических испытаний для случая линейного изменения параметра потока отказов. Результаты приведены в приложениях. В приложении 7 приведены таблицы критических значений для уровней значимости 0,05; 0,10; 0,15; 0,20, а в приложении 8 - оценка мощности критериев S_T^* и Спирмена. Эти приложения обеспечивают возможность практического применения критерия S_T^* для проверки гипотез о наличии периода приработки и приближения предельного состояния.

Шестая глава посвящена рассмотрению вопросов организации контроля надежности на стадии производства при использовании для оценки результатов испытаний ранговых критериев однородности.

Как показано во второй главе работы, модели с гарантированным эффектом приводят к выбору в качестве основных показателей

надежности показателей типов "вероятность" и "квантиль". В соответствии с действующими нормативными документами (ГОСТ 27.410-87, РД 50-690-89) для таких показателей предусматривается возможность применения параметрических и непараметрических методов оценки и контроля. Это означает, что проблема контроля показателей, выбранных по моделям гарантированного эффекта, в общем не связана с необходимостью иметь информацию о виде закона распределения наработки до отказа (предельного состояния). Однако конструктивные особенности объектов могут привести к использованию в качестве основного показателя типа "средняя наработка" (до отказа, на отказ, до предельного состояния). В этом случае указанные выше нормативные документы предполагают применение параметрических методов контроля. В работе показана возможность применения при контроле непараметрического метода. В зависимости от этапа жизненного цикла объектов различают испытания на надежность опытных образцов, установочной партии и серийных изделий. Последние проводятся в составе периодических или типовых испытаний. Таким образом, до передачи конструкторской документации на изделие в серийное производство обязательно проверяется его соответствие требованиям к надежности, заданным в нормативно-технической документации. Если такое подтверждение получено, соответствующий уровень надежности необходимо зафиксировать. Для этого предлагается провести испытания малой выборки по плану [NUN], т.е. до отказа каждого изделия выборки, и внести в протокол испытаний их результаты в виде ряда наработок до отказа

$$t_1, t_2, \dots, t_m,$$

где t_i — наработка до i -го по порядку отказа,
 m — количество изделий в выборке.

Указанный ряд несет в себе информацию об уровне надежности партии, которая удовлетворяет заданным требованиям. Этот уровень надежности целесообразно принять за "эталонный" и использовать его для контроля надежности партий, которые будут выпускаться в дальнейшем, т.е. на стадии производства. При этом также проводятся испытания малой выборки по плану [NUN]. Их результат также фиксируется в виде ряда наработок до отказа:

$$t_1, t_2, \dots, t_n,$$

где n – объем выборки при испытаниях на стадии производства.

Далее должен использоваться аппарат проверки однородности двух выборок с применением рангового критерия (например, Сэвиджа). Таким образом, если в первичной постановке задачи контрольных испытаний проверяется гипотеза

$$H_0: T_3 = T_k$$

при альтернативе

$$H_2: T_3 > T_k,$$

где T_3 – средняя наработка до отказа эталонных изделий;

T_k – средняя наработка до отказа контролируемых изделий, то во вторичной постановке (при использовании ранговых критериев однородности) проверяется гипотеза

$$H_0: F(t) = G(t)$$

при альтернативе

$$H_2: F(t) < G(t)$$

где $F(t)$, $G(t)$ – функции распределения наработок до отказа эталонной и контролируемой партий.

В работе показано, что при различии параметров масштаба вторичная постановка задачи контроля практически эквивалентна первичной.

При планировании контрольных испытаний на надежность используются риски поставщика α и потребителя β , а также отношение T_α/T_β приемочного и браковочного значений средней наработки до отказа. При контроле с помощью рангового критерия однородности риск поставщика совпадает с уровнем значимости критерия, а риск потребителя – с вероятностью ошибки второго рода:

$$\beta = 1 - \omega,$$

где ω – мощность критерия при альтернативной гипотезе.

В качестве приемочного уровня надежности должен быть принят уровень надежности эталонных изделий, заданный рядом наработок до отказа, а браковочный уровень может быть задан отношением математических ожиданий наработок до отказа с распределениями $F(t)$ и $G(t)$. Таким образом, определение риска потребителя связано с необходимостью рассмотрения конкретных распределений. Имея набор данных о рисках потребителя при различных распределениях и отношениях T_α/T_β , можно получить представление о возможном значении риска в конкретном случае.

По данным исследований и расчетов, выполненных в главе 4, получена таблица приложения 9 работы, позволяющая при заданных параметрах формы распределения Вейбулла-Гнеденко θ_1 и θ_2 , отношении T_α / T_β , рисках поставщика α и потребителя β и объеме эталонной выборки выбрать минимальный объем контролируемой выборки. В качестве статистики используются статистика Сэвиджа или обратных рангов.

Так как в процессе производства необходимость контроля надежности возникает неоднократно при периодических, типовых, сертификационных испытаниях, автором разработан алгоритм формирования эталонных выборок при проведении контроля (рис.4).

Предложенный алгоритм обеспечивает системный подход к проведению испытаний на надежность на протяжении всего жизненного цикла изделия. Его достоинствами являются: простой математический аппарат; стимулирование непрерывного роста надежности изделия на протяжении жизненного цикла в связи с изменением эталонного уровня; отсутствие необходимости предположения о виде распределения при определительных испытаниях.

Недостаток предложенной методики, состоящий в необходимости проведения испытаний до отказа всех изделий выборки, может быть преодолен в случае испытаний в форсированном режиме. При этом отпадает необходимость определения коэффициента ускорения, что требует больших временных и материальных затрат. Единственным требованием в этом случае является проведение испытаний эталонной и контролируемой выборок в одном и том же режиме.

В седьмой главе рассматривается вопрос о применении аппарата ранговых статистик при нормировании гарантийных сроков на вновь разрабатываемые изделия.

В работах В.Н.Фомина и Э.С.Эренбурга показана связь гарантийных сроков с надежностью изделий и выдвинуто положение о том, что гарантийный срок — это срок, по истечении которого в изделиях практически не должно быть скрытых дефектов. В соответствии с этим положением автором предложены рекомендации по определению минимального значения гарантийного срока.

Вначале собирается статистическая информация об отказах изделия-аналога на начальном этапе эксплуатации. После провер-

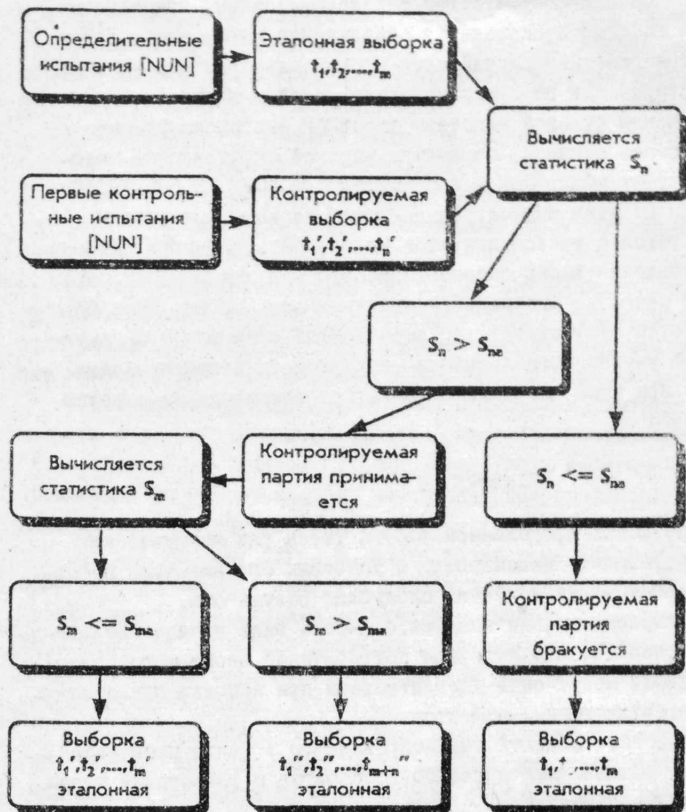


Рис. 4. Формирование эталонных выборок в системе испытаний на надежность

ки однородности в соответствии с рекомендациями, изложенными в главе 4 работы, производится объединение информации. Далее проверяется гипотеза случайности против альтернативы наличия периода приработки по методике, изложенной в главе 5. В случае отклонения нулевой гипотезы строится аппроксимирующая функция потока отказов, параметры которой определяются методом наименьших квадратов в соответствии с ГОСТ 23.502-79. Определенная по этим параметрам величина периода приработки корректируется с учетом поправок на элементную базу и технологию изготовления вновь разрабатываемого изделия и может быть принята в качестве минимального гарантийного срока. Если период приработки отсутствует, то гарантийный срок может быть установлен с учетом организационно-технических и коммерческих факторов. При этом могут использоваться рекомендации вышеупомянутых авторов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проделанной работы решен ряд методических вопросов управления надежностью в условиях ограниченной информации. В диссертации получены следующие результаты.

1. При исследовании вопроса о выборе вида показателей надежности показано, что интересы потребителей небольшого количества изделий могут быть удовлетворены при использовании моделей с гарантированным эффектом.

2. На основе моделей гарантированного эффекта произведен выбор вида показателей надежности объектов с различными классификационными признаками.

3. Получены формулы для вычисления коэффициента оптимальности, по величине которого может быть выбран наилучший вариант исполнения объекта.

4. Исследование точности оценивания надежности по цензурированным выборкам методами Нельсона, Джонсона и последовательного перехода к новой системе координат, проведенное с помощью статистических испытаний, показало, что при малых выборках последний имеет более высокую точность. На базе этих исследований разработаны рекомендации по вычислению интервальных оценок показателей надежности вида "средняя наработка".

5. Исследование свойств различных критериев однородности

при малых выборках позволило:

сделать вывод, что в задачах анализа надежности целесообразно использовать критерии, статистики которых представляют собой функции обратных рангов;

разработать не имеющий аналогов критерий для альтернатив с пересечением функций распределения;

разработать алгоритм проверки однородности двух выборок при альтернативе общего вида, основанный на использовании двух ранговых критериев.

6. Исследование свойств различных автокорреляционных статистик позволило разработать критерий типа обратных рангов, обладающий при малых выборках лучшими свойствами, чем известные критерии ранговой корреляции Спирмена и Кендалла.

7. В общем случае показателями надежности, выбранными по моделям с гарантированным эффектом, являются показатели вида "вероятность" и "квантиль", поэтому контроль их может быть произведен на основе планов, не связанных с предположением о виде закона распределения.

8. Для частных случаев, когда вследствие конструктивных особенностей объекта назначен показатель вида "средняя наработка" предложена система испытаний на надежность, основанная на применении рангового критерия однородности, включающая испытания опытных образцов, установочной партии и изделий серийного производства.

9. Использование результатов исследований в области статистического анализа малых выборок позволило предложить рекомендации по определению минимального значения гарантийного срока объектов, выпускаемых в небольшом количестве, на стадии их проектирования.

10. Для практического использования предложенных методов и критериев разработано их табличное обеспечение с пояснениями и рекомендациями.

Основные положения проведенных исследований изложены в следующих работах.

1. Буртаев Ю.Ф., Резинкина Э.А. О регламентации надежности // Электротехническая промышленность. Межотраслевые вопросы. - 1974. - № 11(427) - С. 16-18.

2. Буртаев Ю.Ф. О регламентации сохраняемости // *Электротехническая промышленность. Общепромышленные вопросы.* - 1974. - № 12 (428) . - С. 19-20.
3. Буртаев Ю.Ф., Чуркина М.В. Контроль надежности в мелкосерийном производстве // *Электротехническая промышленность. Общепромышленные вопросы.* - 1977. - № 7 (458) . - С. 25-26.
4. Фомина В.Н., Буртаев Ю.Ф., Антонова Е.А. Планирование испытаний при контроле надежности с использованием критерия Вилкоксона // *Надежность и контроль качества.* - 1979. - № 9. - С. 3-11.
5. Фомина В., Буртаев Ю.Ф. Выбор номенклатуры показателей надежности изделий мелкосерийного производства // *Надежность и контроль качества.* - 1980. - № 6. - С. 46-54.
6. Буртаев Ю.Ф. Оптимальные планы контроля надежности при использовании критерия Вилкоксона // *Электротехническая промышленность. Общепромышленные вопросы.* - 1981. - № 3 (502) . - С. 15-17.
7. Буртаев Ю.Ф. Об эффективности испытаний на безотказность технических устройств // *Электротехническая промышленность. Общепромышленные вопросы.* - 1981. - № 5 (504) . - С. 18-19.
8. Буртаев Ю.Ф., Алешин А.В. Выбор показателей надежности РЭА для включения в нормативно-техническую документацию: Учебное пособие. - М.: МИРЭА, 1983. - 28 с.
9. Буртаев Ю.Ф. О стандартизации показателей надежности // *Стандарты и качество.* - 1988. - № 9. - С. 39-40.
10. Буртаев Ю.Ф. Планирование сравнительных испытаний на надежность // *Надежность и контроль качества.* - 1990. - № 6. - С. 3-11.
11. Буртаев Ю.Ф., Козлова А.Н. О послеремонтной приработке автотракторных генераторов // *Техника в сельском хозяйстве.* - 1991. - № 6. - С. 22.
12. Буртаев Ю.Ф., Мочальнов А.В. Исследование мощности ранговых критериев проверки однородности при малых выборках: В сб. "Диагностика и прогнозирование надежности элементов ядерных энергетических установок" - Обнинск: 1992, № 8. - С. 72-77.
13. Буртаев Ю.Ф., Мочальнов А.В. Сравнение мощности непа-

- раметрических критериев однородности при малых выборках // Вероятностно-физические методы исследования надежности машин и аппаратуры: Тез.докл. Международн. конф. - Киев: 1992. - С. 5-6.
14. Буртаев Ю.Ф., Мочальнов А.В. Свойства ранговых критериев однородности при малых выборках // Методы и средства оценки и повышения надежности приборов, устройств и систем: Тез.докл. Международн. конф. - Пенза: 1993. - С. 30-31.
 15. Буртаев Ю.Ф., Мочальнов А.В. Исследование свойств критерия обратных рангов при малых выборках // Надежность и контроль качества. - 1993. - № 9. - С. 37-46.
 16. Буртаев Ю.Ф., Гуреев С.В. Исследование точности методов оценивания по цензурированным выборкам // Методы и средства оценки и повышения надежности приборов, устройств и систем: Тез.докл.Международн.конф. - Пенза: 1993. - С. 15-16.
 17. Буртаев Ю.Ф. Использование ранговых критериев при планировании испытаний на надежность // Проблемы конверсии, разработки и испытаний приборных устройств: Тез.докл. Международн. конф. - Владимир: 1993. - С. 129-130.
 18. Буртаев Ю.Ф., Гуреев С.В., Мочальнов А.В. Исследование методов статистического анализа надежности в условиях ограниченной информации // Безопасность АЭС и подготовка персонала: Тез.докл. 3 Международн.конф. - Обнинск: 1993. - С.71.
 19. Буртаев Ю.Ф., Гуреев С.В. Сравнение точности методов оценивания надежности по цензурированным выборкам // Надежность и контроль качества. - 1994. - № 5. - С. 33-37.
 20. Буртаев Ю.Ф. Методические вопросы управления надежностью по информации ограниченного объема // Методы и средства оценки и повышения надежности приборов, устройств и систем: Тез.докл. Росс.конф. - Саратов: 1994. - С. 88-89.
 21. Буртаев Ю.Ф. О применении непараметрических методов при статистическом анализе надежности // Методы и средства оценки и повышения надежности и приборов, устройств и систем: Тез.докл.Росс.конф. - Саратов: 1994. - С. 11.

22. Буртаев Ю.Ф. О некоторых свойствах критериев, зависящих от обратных рангов: В сб. "Диагностика и прогнозирование надежности ядерных энергетических установок". - Обнинск: 1994, № 9. - С. 63-67.
23. Буртаев Ю.Ф. Двухвыборочный ранговый критерий однородности для альтернатив с пересечением функций распределения // Надежность и контроль качества. - 1995. - № 2. - С. 30-38.
24. Буртаев Ю.Ф. О возможности непараметрического контроля средней наработки до отказа: В сб. "Диагностика и прогнозирование надежности элементов ядерных энергетических установок". - Обнинск: 1995, № 10. - С. 40-42.
25. Буртаев Ю.Ф. Методология проверки однородности статистической информации о надежности при альтернативе общего вида // Методы и средства повышения надежности приборов, устройств и систем: Тез. докл. Международн. конф. - Пенза: 1995. - С. 31-32.
26. Буртаев Ю.Ф. Ранговый критерий проверки гипотез с альтернативой тренда для анализа надежности при малых выборках // Надежность и контроль качества. - 1995. - № 7. - С. 13-19.
27. Буртаев Ю.Ф. О возможности использования ранговых критериев однородности при сертификационных испытаниях // Заводская лаборатория. - 1995. - № 7. - С. 50-54.
28. Буртаев Ю.Ф. Методические вопросы анализа надежности оборудования ЯЭУ в условиях ограниченной информации // Безопасность АЭС и подготовка кадров: Тез. докл. Международн. конф. - Обнинск: 1995. - С. 99-100.
29. Буртаев Ю.Ф., Острейковский В.А. Статистический анализ надежности объектов по ограниченной информации. - М.: Энергоатомиздат, 1995. - 240 с.

Подписано к печати 9.04.96г. Заказ 225. Объем 2,0 пл.
Тираж 75 экз. Типография МГТУ им. Н.Э.Баумана.