

НАДЕЖНОСТЬ

ISSN 1729-2646

DEPENDABILITY

03 | 2014
(50)

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ / SCIENTIFIC- TECHNICAL JOURNAL

В НОМЕРЕ / IN THIS RELEASE:

- ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ НАДЕЖНОСТНОЙ СТРУКТУРЫ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ ВОЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ И ЕЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ В ЗАДАЧАХ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ИХ ПОСЛЕПРОДАЖНОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ
- *SIMULATION MODEL OF MILITARY AIRCRAFT DEPENDABLE STRUCTURE AND ITS USE IN THE RESEARCH OF AFTER-SALE SERVICE PROCESSES*
- УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССОМ ИСПЫТАНИЯ ОБОРУДОВАНИЯ НА НАДЕЖНОСТЬ
- *EQUIPMENT DEPENDABILITY TEST MANAGEMENT*
- ФЛУКТУАЦИОННЫЙ НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ ТВЕРДЫХ МАТЕРИАЛОВ
- *FLUCTUATION NONDESTRUCTIVE TESTING OF SOLID MATERIALS*
- ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА ИЗДЕЛИЙ ИЗ ВЫСОКОТВЕРДОЙ КЕРАМИКИ ДЛЯ ТЯЖЕЛОНАГРУЖЕННЫХ ПАР ТРЕНИЯ
- *QUALITY IMPROVEMENT OF PRODUCTS MADE OF HIGHLY RIGID CERAMICS FOR HEAVY-LOADED FRICTION PAIRS*
- ОБЗОР МЕТОДОВ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ПРИ РАЗРАБОТКЕ СЛОЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ
- *OVERVIEW OF DECISION-MAKING TECHNIQUES USED IN THE DEVELOPMENT OF COMPLEX ENGINEERING SYSTEMS*
- СИСТЕМАТИЧЕСКИЙ ПОДХОД К ЗАЩИТЕ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ОТ СБОЕВ АППАРАТУРЫ
- *A SYSTEMATIC APPROACH TO PROTECTION AGAINST GLITCHES*
- СИСТЕМАТИЗАЦИЯ КРИТЕРИЕВ И ЗНАЧИМЫХ ФАКТОРОВ ДЛЯ ОЦЕНКИ ПОДВЕРЖЕННОСТИ СЛОЖНЫХ СИСТЕМ ДЕСТАБИЛИЗИРУЮЩИМ ВОЗДЕЙСТВИЯМ
- *SYSTEMATIZATION OF CRITERIA AND SIGNIFICANT FACTORS FOR EVALUATION OF EXPOSURE OF COMPLEX SYSTEMS TO DISTURBANCES*
- ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРЕДЕЛЬНОГО СОСТОЯНИЯ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЙ ТЕХНИКИ
- *IDENTIFICATION OF RAILWAY EQUIPMENT'S LIMIT TOLERANCE STATE*
- МЕТОД ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОГО КОНТРОЛЯ Н.О.ДЕМИДОВИЧА
- *N.O. DEMIDOVICH'S SEQUENTIAL CONTROL METHOD*

THE JOURNAL IS PUBLISHED WITH PARTICIPATION AND SUPPORT
OF JOINT-STOCK COMPANY RESEARCH & DESIGN INSTITUTE
FOR INFORMATION TECHNOLOGY, SIGNALLING AND TELECOMMUNICATIONS
ON RAILWAY TRANSPORT (JSC NIIAS)



JSC NIIAS is RZD's leading company in the field of development of train control and safety systems, traffic management systems, GIS support technology, railway fleet and infrastructure monitoring systems



Mission:

transportation

- ☐ efficiency,
- ☐ safety,
- ☐ reliability



Key areas of activity

- Intellectual control and management systems
- Transportation management systems and transport service technology
- Signalling and remote control systems
- Automated transportation management centers
- Railway transport information systems
- Geoinformation systems and satellite technology
- Transport safety systems
- Infrastructure management systems
- Power consumption and energy management systems
- Testing, certification and expert assessment
- Information security
- Regulatory support



www.vniias.ru

УЧРЕДИТЕЛЬ ЖУРНАЛА:

ООО «Журнал «Надежность».

Зарегистрирован в Министерстве Российской Федерации по делам печати, телерадиовещания и средств массовых коммуникаций. Регистрационное свидетельство ПИ № 77-9782 от 11 сентября 2001 года.

Официальный печатный орган Российской академии надежности

Оформить подписку можно по каталогу «Пресса России» агентства «Книга-Сервис» 11804 – полугодовой индекс.

Главный редактор

Шубинский И.Б., д.т.н., проф.

Редколлегия

Бочков А.В., к.т.н.
Дзиркал Э.В., к.т.н.
Замышляев А.М., д.т.н.
Каштанов В.А., д.ф.-м.н., проф.
Кофанов Ю.Н., д.т.н., проф.
Лецкий Э.К., д.т.н., проф.
Нетес В.А., д.т.н., проф.
Розенберг И.Н., д.т.н., проф.
Стась К.Н., к.т.н.
Тарасов А.А., д.т.н., проф.
Уткин Л.В., д.т.н., проф.
Ушаков И.А., д.т.н., проф.
Черкесов Г.Н., д.т.н., проф.
Шебе Х., д.ф.-м.н.
Щербаков О.В., д.т.н., проф.
Юркевич Е.В., д.т.н., проф.

Выпускающий редактор
Патрикеева Е.В.

Издатель журнала

ООО «Журнал «Надежность»

Директор
Калинина И.В.

Адрес: 109029, г. Москва,
ул. Нижегородская, д. 27, стр. 1, оф. 209
ООО «Журнал «Надежность»
www.dependability.pro

Верстка
Куртиш Б.С.

Отпечатано в ОАО «Областная типография «Печатный двор».
432049, г. Ульяновск, ул. Пушкарёва, 27.
Тираж 500 экз. Заказ

Статьи рецензируются.

Статьи опубликованы в авторской редакции. Мнение членов редакционного совета может не совпадать с точкой зрения авторов публикаций. Перепечатка материалов допускается только с письменного разрешения редакции. Рукописи не возвращаются.

**ЖУРНАЛ ВКЛЮЧЕН В ПЕРЕЧЕНЬ
ВЕДУЩИХ ЖУРНАЛОВ И ИЗДАНИЙ
ВЫСШЕЙ АТТЕСТАЦИОННОЙ
КОМИССИИ (ВАК)**

ISSN 1729-2646

**THE JOURNAL IS INCLUDED IN THE LIST
OF THE LEADING JOURNALS AND EDITIONS
OF THE HIGHER ATTESTATION COMMISSION (VAK)**

**ЖУРНАЛ ИЗДАЕТСЯ ПРИ УЧАСТИИ И ПОДДЕРЖКЕ ОТКРЫТОГО
АКЦИОНЕРНОГО ОБЩЕСТВА «НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
И ПРОЕКТНО-КОНСТРУКТОРСКИЙ ИНСТИТУТ ИНФОРМАТИЗАЦИИ,
АВТОМАТИЗАЦИИ И СВЯЗИ НА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОМ ТРАНСПОРТЕ»
(ОАО «НИИАС»)
И ООО «ИЗДАТЕЛЬСКИЙ ДОМ «ТЕХНОЛОГИИ»**

**THE JOURNAL IS PUBLISHED WITH THE PARTICIPATION
AND SUPPORT OF THE JOINT-STOCK COMPANY «RESEARCH
AND DESIGN INSTITUTE OF INFORMATISATION, AUTOMATION
AND COMMUNICATION ON RAILWAY TRANSPORT»
(JSC «NIIAS») AND LLC PUBLISHING HOUSE «TECHNOLOGY»**

THE JOURNAL PROMOTER:

“Journal “Reliability” Ltd

It is registered in the Russian Ministry of Press, Broadcasting and Mass Communications. Registration certificate ПИ 77-9782, September, 11, 2001.

Official organ of the Russian Academy of Reliability

Subscription is possible under the catalogue “**Press of Russia**” of the agency “**Book-service**” 11804 – a semi-annual index.

Editor-in-chief

I. Shubinsky, Dr. Sci., prof.

Editorial board

A. Bochkov, PhD.

E. Dzirkal, PhD.

V. Kashtanov, Dr. of physical-mathematical science, prof.

J. Kofanov, Dr. Sci., prof.

E. Letsky, Dr. Sci., prof.

V. Netes, Dr. Sci., prof.

I. Rozenberg, Dr. Sci., prof.

K. Stas, Ph. D.

F. Tarasov, Dr. Sci., prof.

L. Utkin, Dr. Sci., prof.

I. Ushakov, Dr. Sci., prof.

G. Cherkesov, Dr. Sci., prof.

H. Schaebe, Dr. of physical and math. science, prof.

O. Shcherbakov, Dr. Sci., prof.

E. Jurkevich, Dr. Sci., prof.

A. Zamyshlaev, Dr. Sci.

Commissioning editor

E. Patrikeeva

Publisher of the journal

LLC Journal “Dependability”

Director

I. Kalinina

The address:

109029, Moscow,

Str. Nizhegorodskaya, 27,

Building 1, 1, office 209

Ltd Journal “Dependability”

www.dependability.pro

Make-up

B. Kurtish

Printed by JSC “Regional printing house, Printing place” 432049, Ulyanovsk, Pushkarev str., 27. Circulation: 500 copies.

Printing order

Papers are reviewed.

Papers are published in author's edition. The opinion of members of the editorial board may not coincide with the point of view of authors' publications. The reprint of materials is granted only with the written permission of the editorial board. Manuscripts are not returned.

СОДЕРЖАНИЕ/CONTENTS

Структурная надежность. Теория и практика / Structural reliability. The theory and practice

ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ НАДЕЖНОСТНОЙ СТРУКТУРЫ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ ВОЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ И ЕЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ В ЗАДАЧАХ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ИХ ПОСЛЕПРОДАЖНОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ

Хахулин Г.Ф., Титов Ю.П. 3

SIMULATION MODEL OF MILITARY AIRCRAFT DEPENDABLE STRUCTURE AND ITS USE IN THE RESEARCH OF AFTER-SALE SERVICE PROCESSES

Khakhulin G.F., Titov Yu.P. 16

УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССОМ ИСПЫТАНИЯ ОБОРУДОВАНИЯ НА НАДЕЖНОСТЬ

Русин А.Ю., Абдулхамед М. 27

EQUIPMENT DEPENDABILITY TEST MANAGEMENT

Rusin A.Yu., Abdulhameed M. 35

ФЛУКТУАЦИОННЫЙ НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ ТВЕРДЫХ МАТЕРИАЛОВ

Якубович Б.И. 43

FLUCTUATION NONDESTRUCTIVE TESTING OF SOLID MATERIALS

Yakubovich B. I. 53

ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА ИЗДЕЛИЙ ИЗ ВЫСОКОТВЕРДОЙ КЕРАМИКИ ДЛЯ ТЯЖЕЛОНАГРУЖЕННЫХ ПАР ТРЕНИЯ

Душко О.В., Мышлинская И.Х. 62

QUALITY IMPROVEMENT OF PRODUCTS MADE OF HIGHLY RIGID CERAMICS FOR HEAVY-LOADED FRICTION PAIRS

Dushko O.V., Mishlinskaya I.H. 67

Функциональная надежность. Теория и практика / Functional reliability. The theory and practice

ОБЗОР МЕТОДОВ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ПРИ РАЗРАБОТКЕ СЛОЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Семенов С.С., Полтавский А.В., Маклаков В.В., Крянев А.В. 72

OVERVIEW OF DECISION-MAKING TECHNIQUES USED IN THE DEVELOPMENT OF COMPLEX ENGINEERING SYSTEMS

Semenov S.S., Poltavsky A.V., Krianev A.V., Maklakov V.V. 85

СИСТЕМАТИЧЕСКИЙ ПОДХОД К ЗАЩИТЕ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ОТ СБОЕВ АППАРАТУРЫ

Шубинский И.Б., Шебе Х. 96

A SYSTEMATIC APPROACH TO PROTECTION AGAINST GLITCHES

Shubinsky I.B., Schäbe H. 102

СИСТЕМАТИЗАЦИЯ КРИТЕРИЕВ И ЗНАЧИМЫХ ФАКТОРОВ ДЛЯ ОЦЕНКИ ПОДВЕРЖЕННОСТИ СЛОЖНЫХ СИСТЕМ ДЕСТАБИЛИЗИРУЮЩИМ ВОЗДЕЙСТВИЯМ

Абрамова Н.А., Макаренко Д.И. 107

SYSTEMATIZATION OF CRITERIA AND SIGNIFICANT FACTORS FOR EVALUATION OF EXPOSURE OF COMPLEX SYSTEMS TO DISTURBANCES

Abramova N.A., Makarenko D.I. 115

Функциональная безопасность. Теория и практика / Functional safety. The theory and practice

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРЕДЕЛЬНОГО СОСТОЯНИЯ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЙ ТЕХНИКИ

Ермаков А.О. 122

IDENTIFICATION OF RAILWAY EQUIPMENT'S LIMIT TOLERANCE STATE

Ernikov A.O. 129

Хорошо забытое / Well-forgotten old

МЕТОД ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОГО КОНТРОЛЯ Н.О.ДЕМИДОВИЧА

Дзиркал Э.В. 136

N.O. DEMIDOVICH'S SEQUENTIAL CONTROL METHOD

Dzirkal E.V. 143

КНИГА И.Б.ШУБИНСКОГО «СТРУКТУРНАЯ НАДЕЖНОСТЬ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ» 150

BOOK BY SHUBINSKY I.B. STRUCTURAL RELIABILITY OF INFORMATION SYSTEMS 150

КНИГА И.Б.ШУБИНСКОГО «ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ НАДЕЖНОСТЬ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ» 151

BOOK BY SHUBINSKY I.B. FUNCTIONAL RELIABILITY OF INFORMATION SYSTEMS 151

ГНЕДЕНКО –ФОРУМ 152

GNEDENKO FORUM 153



Хахулин Г.Ф., Титов Ю.П.

ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ НАДЕЖНОСТНОЙ СТРУКТУРЫ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ ВОЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ И ЕЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ В ЗАДАЧАХ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ИХ ПОСЛЕПРОДАЖНОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ

Обсуждается актуальность разработки имитационной модели надежности структуры летательного аппарата для анализа процессов послепродажного обслуживания летательных аппаратов военного назначения. Приводится описание созданной имитационной модели и результаты имитационного эксперимента.

Ключевые слова: летательные аппараты, послепродажное обслуживание, имитационная модель.

Введение

В настоящее время в соответствии с решениями правительства РФ, соответствующими приказами и нормативными актами Министерства обороны осуществляется перестроение процесса послепродажного обслуживания объектов военного назначения, в том числе, и авиационной техники. В отличие от стратегии самостоятельного обслуживания такой техники подразделениями Министерства обороны осуществляется переориентация на обслуживание ее предприятиями-производителями. Для решения этих задач на предприятиях-производителях и связанных с ними предприятиях смежников создаются специальные структуры, обеспечивающие этот процесс: планирование производства, хранение и своевременную поставку запасных частей, регламентное техническое обслуживание и ремонт техники, вышедшей из строя. Эти структуры и подразделения должны тесно взаимодействовать с подразделениями Российской армии, осуществляющими боевую эксплуатацию закупленной боевой техники. В связи с этим актуальной научно-технической задачей является исследование процессов послепродажного обслуживания для создания эффективной системы управления этим процессом. Этим вопросам, в частности, посвящена монография [1], в которой произведен анализ структуры процесса послепродажного обслуживания сложных технических объектов, предлагается математический аппарат для его исследования. При этом в книге сделан акцент на использование вероятностно-аналитических методов. Известны ограничения возможностей таких методов по адекватному отображению процессов, происходящих в

сложных организационно-технических системах, к которым относится система послепродажного обслуживания. Там же говорится об актуальности применения для этих целей имитационного моделирования, не имеющего принципиальных ограничений по адекватности отображения процессов любой сложности. В данной работе делается попытка создания одной из наиболее важных частей общей имитационной модели (ИМ) послепродажного обслуживания – ИМ надежности структуры сложного технического объекта, а именно, летательного аппарата (ЛА), послепродажное обслуживание которого осуществляется. Под надежностной структурой ЛА (НСЛА) понимается совокупность его компонентов (элементов, блоков, подсистем и всего ЛА в целом), процесс функционирования которых рассматривается с точки зрения обеспечения требований к надежности ЛА (безотказная работа, регламентное техническое обслуживание, появление отказов, выполнение ремонтных работ, использование для этого имеющихся запасных частей, ремонтных ресурсов и т.п.), определяемых набором характеризующих эту надежность показателей (например, вероятность безотказной работы, коэффициент готовности и др.).

Цели и задачи указанной имитационной модели определяются потребностями имитационной модели верхнего уровня, отображающей процесс функционирования всей системы послепродажного обслуживания. С этой точки зрения ИМ НСЛА должна, с одной стороны, давать возможность оценки показателей надежности ЛА при заданной стратегии обеспечения процесса его функционирования запасными частями и ремонтными ресурсами, а с другой стороны, – обеспечить процессы выработки стратегии накопления и использования запасных частей, создания и поддержания необходимых ремонтных ресурсов статистической информацией о временах безотказной работы различных частей НСЛА, количественной оценкой потребности в запасных частях и ремонтных ресурсах на основе информации о реализации процессов отказа и восстановления частей НСЛА.

Ниже приводится информация, отражающая процесс имитационного моделирования НСЛА: постановка задачи, этапы формализации, разработки имитационной программы, проведения имитационных экспериментов.

Постановка задачи

Ставится задача разработки ИМ НСЛА для целей использования ее в составе ИМ процесса послепродажного обслуживания ЛА.

Назначение ИМ:

- оценка показателей надежности ЛА при заданной стратегии обеспечения процесса его функционирования запасными частями и ремонтными ресурсами;
- обеспечение процессов выработки стратегии и принятия решений по накоплению и использованию запасных частей, созданию и поддержанию необходимых ремонтных ресурсов статистической информацией о временах безотказной работы различных частей НСЛА, количественной оценкой потребности в запасных частях (ЗЧ) и ремонтных ресурсах на основе информации о реализации процессов технического обслуживания (ТО), отказа и восстановления частей НСЛА.

Используемые допущения.

На начальном этапе разработки ИМ НСЛА будем предполагать наличие неограниченных объемов запасных частей и величин ремонтных ресурсов.

Концептуальное описание НС ЛА и ее процесса функционирования

НСЛА представляется в виде многоуровневой древовидной структуры, в которой на верхнем уровне располагается компонента, соответствующая всей НСЛА. На следующем, более низком уровне, НСЛА система разделяется на части, соответствующие подсистемам ЛА, выполняющие

отдельные жизненно важные и целевые функции (планер, двигатель, система управления полетом, система управления оружием и др.). Подсистемы в свою очередь делятся на более мелкие функциональные подсистемы и далее на блоки. Блоки же состоят из других блоков и элементов. На самом низком уровне любой древовидной ветви НС находятся элементы.

Элемент с точки зрения процесса функционирования НС считается неделимым. Для элементов НС задаются законы распределения времени безотказной работы (ВБР). Отказы элементов по своей природе могут быть постепенными (износowymi) и внезапными. [2,3] Те и другие отказы могут реализоваться параллельно. Для формализованного вероятностного описания ВБР используются различные виды законов распределения (ЗР). Наиболее распространенными из них являются: экспоненциальный, нормальный, логнормальный, Вейбула-Гнеденко и др [4].

Отказ элемента НС может приводить к определенным последствиям (отказу, неисправности или снижению эффективности функционирования) для состояний частей той ветви НСЛА (по цепочке вверх), в которую указанный элемент входит (в том числе, и составляющей НС самого высокого уровня, т.е. всей НСЛА).

Для увеличения показателей надежности для отдельных частей НСЛА на различных ее уровнях могут применяться определенные виды резервирования: нагруженный (горячий), полунангруженный, ненагруженный (холодный), скользящий и др. Вследствие этого отказ определенной части НСЛА не обязательно приводит к отказу частей более высокого уровня.

Если отказ элемента не приводит к отказу включающей непосредственно его части НС, то состояние этой части определяется как неисправное [5]: т.е. она полностью выполняет все свои функциональные задачи (возможно, с меньшей эффективностью), но при этом содержит отказавшие элементы. В противном случае часть НС переходит в состояние отказа.

В процессе эксплуатации на ВБР каждого элемента влияют нагрузки, воздействующие на ЛА. Нагрузки зависят от режима функционирования: боевой вылет, патрулирование, тренировочный вылет, хранение ЛА на открытой площадке, хранение ЛА под навесом, хранение ЛА в отапливаемом ангаре и тд. Режим эксплуатации есть перечень условий, в которых эксплуатируется ЛА. Смена режимов эксплуатации ЛА, как правило, осуществляется в плановом порядке (боевая готовность, боевой вылет, ТО и т.п.), но может быть и случайной (например, при непредвиденном изменении состояния НС). Для каждого режима в общем случае может определяться свой состав тех частей НСЛА, который обеспечивает его реализацию, а для элементов НСЛА этих частей могут задаваться свои ЗР ВБР.

Для каждого отдельного элемента НС могут реализовываться следующие состояния:

1. Включен. Элемент выполняет все возложенные на него функции. Для перехода в данное состояние элемент должен быть работоспособным (отсутствие отказа) и установленным на ЛА.
2. Отключен. Элемент выключен, и никакие функции не выполняет, при этом считается, что элемент ожидает своего включения в определенных условиях. Отключенный элемент считается работоспособным и установленным на ЛА.
3. Отказал. Элемент в состоянии отказ. Не выполняет никаких функций и требует срочного восстановления. После восстановления переходит в выключенное состояние.
4. Выведен из состава НСЛА (снят с борта ЛА). Элемент демонтирован для проведения ТО или ремонтных работ. При этом элемент может быть как в состоянии отказа, так и в состоянии работоспособности.

Аналогичные состояния могут быть определены и для других частей НСЛА (не обязательно являющихся элементами).

Помимо режимов работы ЗР ВБР элемента, в общем случае, зависит от предыстории его функционирования: величин временных интервалов, в течение которых элемент работал в других режимах. Кроме того, в некоторых частях НС могут происходить зависимые отказы: отказы одних элементов, вызванные отказами других в результате изменения условий эксплуатации.

С точки зрения анализа надежности НСЛА – это восстанавливаемая система, т.е. после события отказа определенной части НСЛА, если это не приводит к катастрофическим последствиям, производятся восстановительные работы (ремонт или замена). Возникновение катастрофической ситуации – это явление, реализуемое с очень малой вероятностью. Поэтому разработка рассматриваемой здесь ИМ не ориентирована на моделирование таких ситуаций.

Процесс восстановления части НСЛА состоит из двух процедур: процедуры обнаружения отказа и процедуры восстановительных работ (ремонта или замены отказавшей части НСЛА).

События отказов некоторой части НСЛА, в общем случае, могут проявляться не сразу, а если и устанавливаются, то, как правило, не сразу могут быть устранены. Т.е. отказы различных частей НСЛА могут накапливаться, и это накопление может в определенных сочетаниях приводить к более серьезным последствиям, чем каждый из отказов определенной части НСЛА в отдельности.

Обнаружение отказа частей НС может произойти следующим образом:

1. С помощью специальных индикаторов, в процессе эксплуатации ЛА. Такие отказы назовем «явными».

2. При техническом обслуживании. Такие отказы назовем «скрытыми». Они обнаруживаются с помощью применения специальных измерительных устройств и средств наблюдения.

Обнаружение отказа некоторой части НСЛА, как следствие, запускает процесс ее ремонта (если это предусмотрено техническим регламентом) или замены (при наличии ЗЧ и необходимых ремонтных ресурсов). В общем случае процесс восстановления является случайным: случайным может быть событие обнаружения «скрытых» отказов, случайным может быть время обслуживания, операции ремонта или замены отказавших частей. Однако, при отсутствии надежной исходной статистической информации времени проведения восстановительных работ, можно использовать данные по нормативам из соответствующего технического описания [6,7].

Еще раз указываем на используемое при разработке рассматриваемой здесь ИМ предположение о неограниченном наличии необходимых ЗЧ и ремонтных ресурсов, позволяющее на данном этапе упростить процесс формализации. При дальнейшем развитии разрабатываемой ИМ эти предположения будут сняты.

Выбор и обоснование класса ИМ

Процесс функционирования НСЛА с помощью ИМ можно отобразить, описывая такие событийные явления как: отказы элементов и связанные с этим отказы других частей НС, начало и окончание этапов проведения различного вида ТО, обнаружение отказов, начало и окончание проведения ремонтных работ и работ по замене отказавших частей НС и т.п. С учетом этого модель НСЛА можно

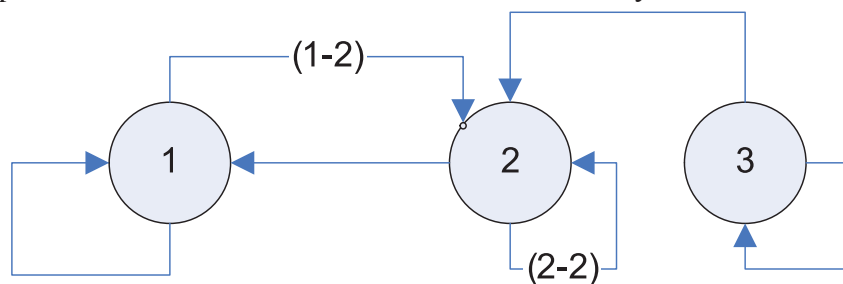


Рис. 1. Граф-схема взаимосвязи событий

представить как дискретную ИМ, функционирующую на основе метода модельных (временных) событий (ММС) [8]. Перечень основных модельных событий и схема взаимосвязи между ними, отражающая процесс планирования одних событий при обработке других, показан на рис 1.

Название и кодирование основных временных событий:

1. Отказ элемента;
2. Выполнение действия над частью НСЛА (включение, отключение в процессе применения ЛА; окончание монтажа, демонтажа или настройка в процессе ТО);
3. Смена режима функционирования.

Условия планирования событий:

- (1-2) Если у отказавшего элемента есть резервный работоспособный элемент;
- (2-2) Если выполнены не все действия из заданной последовательности для перевода НС ЛА в определенный режим эксплуатации.

Показатели критерия оценки результатов моделирования:

1. Реализация и статистические характеристики процессов потребления ЗЧ и ремонтных ресурсов при проведении ремонтно-восстановительных работ:
 - при обработке статистики по множеству прогонов – частоты отказов отдельных частей НСЛА в течение прогона ИМ;
 - при обработке по одному длинному прогону в предположении стационарности и эргодического характера процессов, происходящих в ИМ – оценки интенсивностей отказа отдельных частей НСЛА.
2. Коэффициент готовности НСЛА (отношение времени безотказной работы НСЛА ко времени прогона ИМ).

Параметры ИМ

Дается укрупненное описание без детального обсуждения структур данных, используемых для задания и хранения.

- Параметры НСЛА, отражающие ее многоуровневую древовидную структуру, используемые в определенных ее частях виды резервирования, последствия отказа каждой отдельной части (определена зависимость отказов различных частей НС, возможность проведения восстановительных работ отдельных частей НСЛА путем замены отказавших частей или проведения ремонтных работ), виды и временные характеристики ТО, проводимых для отдельных частей и их периодичность, для «скрытых» отказов элементов определены виды ТО, при проведении которых они могут быть обнаружены, а для сложных скрытых отказов – вероятность обнаружения, перечень действий, выполняемых при проведении ремонтно-восстановительных работ и их временные характеристики.

- Перечень режимов функционирования НСЛА.
- Состав частей НС, функционирование которых должно осуществляться в каждом режиме.
- Сценарный план смены режимов функционирования НС.
- Виды и параметры ЗР ВБР элементов для каждого режима.

Состояние ИМ

Важнейшими переменными состояниями ИМ НСЛА являются переменные, определяющие текущее состояние отдельных частей НС.

Эти переменные определяются в списковой структуре данных, однозначно связанной с НС ЛА. В соответствии с приведенным выше описанием перечень состояний частей НС ЛА следующий:

исправна или неисправна; включена в работу или не включена; находится в составе НСЛА или выведена из ее состава (демонтирована).

Для всей НСЛА в целом, а также для отдельных её частей, определяется вид режима, в котором они находятся в текущее модельное время. В соответствии с этим определяется включение в работу отдельных частей НС.

Для каждого элемента НС ЛА накапливается суммарное время наработки (с учетом коэффициентов нагрузки, зависящих от текущего режима работы). А для каждой части НСЛА накапливается суммарное время нахождения ее в безотказном (работоспособном) состоянии. При организации по множеству прогонов для каждой части НСЛА, в том числе, и для всей НС по интервалам модельного времени накапливаются частоты отказов.

Для указанных выше основных временных событий перечень информации, указанной в дополнительных атрибутах записи для этих событий имеет следующий вид:

Событие «Отказ элемента» (1):

- Указатель на отказавший элемент;
- Вид отказа.

Событие «Выполнение действия над частью НСЛА» (2):

- Указатель на часть НСЛА, над которой совершается действие;
- Название действия;
- Время, необходимое для выполнения действия;
- Коэффициент нагрузки на часть НСЛА при данном действии;
- Необходимое для выполнения данного действия состояние НСЛА.

Событие «Плановая смена режима функционирования» (3):

- Номер режима из множества возможных режимов функционирования НСЛА.

Начальное состояние ИМ

Состояние всех частей – исправное. Режим работы – первый из плана. Включены в работу все части НСЛА в соответствии с определенным режимом. Нарботка по каждой части НС – 10% от предельной. В СБС занесены записи по планируемым отказам всех видов всех элементов НСЛА. Переменные для сбора статистики в нулевом состоянии.

Моделирование случайных явлений

Наиболее важным случайным явлением в рассматриваемой ИМ является случайная величина – **время безотказной работы (ВБР) элементов НСЛА**. Сложность моделирования этого случайного явления определяется следующими обстоятельствами:

- элементы НСЛА в процессе ее функционирования работают в разных режимах, которые меняются в соответствии с заданным планом;
- для каждого элемента в разных режимах определены свои параметры ЗР ВБР;
- отказы элементов могут быть двух типов: внезапные отказы (ВО) и износные отказы (ИО). Предполагается, что время свершения ВО зависит только от условий работы НСЛА (вида режима), а время свершения ИО зависит еще и от длительности времени функционирования в определенных режимах (так называемого времени наработки);
- существуют зависимые отказы, когда отказ некоторого элемента вызывает, как следствие, отказы других элементов, либо ускоряет их отказ, влияя соответствующим образом на параметры закона распределения их ВБР.

Предполагается использовать различное вероятностное описание ВБР для указанных типов отказов и, соответственно, разные алгоритмы определения моментов их свершения:

- для ВО используется экспоненциальный закон распределения (ЭЗР) ВБР, параметры которого будут определяться видом элемента и видом режима работы НСЛА. Теоретически известно, что ЭЗР «не имеет памяти», т.е. при каждой смене режима работы НСЛА параметры закона распределения ВБР для очередного режима не зависят от времени наработки в предыдущих режимах. Используя это свойство ЭЗР, **моделирование момента ВО** предлагается осуществлять следующим образом: при каждой смене режима получается очередная реализация ВБР, которая сравнивается с длительностью работы НСЛА в этом режиме на очередном этапе; момент отказа фиксируется, если реализация ВБР меньше длительности работы в рассматриваемом режиме;

- для ИО используется нормальный закон распределения (НЗР). При этом для каждого режима используется понятие «коэффициент нагрузки», который характеризуется соотношением интенсивностей износа элемента в том или ином режиме, по отношению к интенсивности его износа в некоторых условиях, для которых определены параметры НЗР. На основании этого **моделирование момента ИО** предлагается осуществлять следующим образом: в соответствии с НЗР получается реализация времени наработки до отказа; затем в процессе моделирования суммируются фактические наработки по реализовавшимся длительностям режимов, взвешенные (умноженные) на соответствующие коэффициенты нагрузки. Момент ИО определяется по равенству указанных величин.

Моделирование реализаций ВБР элементов помимо моментов смены режимов работы НСЛА осуществляется так же при замене отказавших частей НСЛА при моделировании проведения ремонтно-восстановительных работ, как следствие зависимых отказов.

Для **моделирования зависимых отказов** в соответствии со структурой взаимосвязи зависимых отказов, определенной в параметрах ИМ, при отказе какого либо элемента определяется множество других элементов, отказы которых зависят от него.

Если это ВО, то в соответствии с заданной вероятностью моделируются отказы этих зависимых элементов, либо переопределяются параметры ЗР ВБР в сторону увеличения вероятностей для меньших значений ВБР, и в соответствии с ним получается новая реализация ВБР.

Если это ИО, то изменяются в сторону увеличения коэффициенты нагрузки для реализующихся в последствии режимов, что опять же приводит к сокращению времени до реализации ИО.

Еще одно случайное явление, реализацию которого **необходимо моделировать – это событие обнаружения скрытых отказов**. Моделирование этих событий осуществляется при обработке модельных событий, связанных с проведением действий по техническому обслуживанию НСЛА в соответствии с заданными в параметрах ИМ вероятностями свершения событий обнаружения скрытых отказов.

Алгоритмы обработки модельных событий

При обработке события «Отказ элемента» происходит последовательное выполнение следующих действий:

1. Фиксация времени, в течение которого часть, в которую входит отказавший элемент, находилась в предыдущем состоянии.
2. Установка части НСЛА в состояние отказа.
3. Удаление всех событий отказа данной части из СБС.
4. Поиск дублирующей части или выключенной резервной части. Включение выключенной работоспособной резервной части, если это возможно.

5. Изменение параметров ВБР элементов, отказы которых зависят от состояния отказавшего, моделирование реализации их ВБР и корректировка СБС.
6. Включение индикаторов отказа данной части, если таковые имеются.
7. Если не работают дублирующие части НС ЛА и отказ данной части должен приводить к отказу части более высокого уровня, то выполнить процедуру отказа новой части (Рекурсивное выполнение этого пункта по всей ветви НСЛА вверх).
8. Сохранить статистику по отказам данной части.

Выполнение действия над частью НСЛА

При обработке события происходит последовательное выполнение следующих действий:

1. Определение типа действия:
 - а. Для действия «Включение» происходит запуск процедуры включения части. Данная процедура переводит часть во включенное состояние, создавая необходимые события отказа и удаляя лишние.
 - б. Для действия «Выключение» происходит запуск процедуры выключения части. Данная процедура переводит часть в выключенное состояние, создавая необходимые события отказа и удаляя лишние. А после нее происходит выключение всего подграфа данного элемента, то есть всех компонентов данного блока.
 - с. Для действия «Демонтаж» происходит перевод части в состояние отсутствия в составе НСЛА.
 - д. Для действия «Монтаж» реализуется процедура, которая определяет часть в составе НСЛА. Обнуляет параметры наработки для данной части и переводит часть в выключенное состояние.
 - е. Для действия «Настройка» осуществляется перевод части в состояние работоспособности и восстановление всех частей, которые отказали из-за отказа данной части.
2. Вызов процедуры поиска «скрытых» отказов.
3. Расчет времени выполнения следующего действия из рассматриваемой последовательности действий.
4. Планирование события ($K=2$).

Событие «Смена режима функционирования»

При обработке события происходит последовательное выполнение следующих действий:

- накапливается статистика по наработке включенных частей НСЛА с учетом завершившегося режима;
- корректируются законы распределения ВБР износных отказов элементов, производится корректировка СБС по этим отказам;
- моделируются реализации ВБР внезапных отказов элементов и корректируются СБС с учетом плановой длительности нового режима.

Сбор статистики и расчет показателей КОРМ

Сбор статистики включает в себя следующие функции:

- Сбор статистики по временам безотказной работы НС и её частей.
- Фиксация реализаций использования ЗЧ различного вида.
- Фиксация реализации использования ремонтных ресурсов различных видов.

- Вычисление коэффициента готовности НС и её частей.
- Статистическая обработка результатов использования ЗЧ и ремонтных ресурсов и определение статистических характеристик этих процессов.

По результатам моделирования вычисляются необходимые статистические характеристики:

- Коэффициент готовности ЛА определяется отношением времени работоспособности ЛА к времени моделирования.
- Вычисляются статистические характеристики использования ЗЧ и ремонтных ресурсов. Для этого считается, что ко времени обнаружения отказа необходимо иметь ЗЧ, а на срок восстановления необходимо задействовать необходимые ремонтные ресурсы. В результате обработки данной информации определяется реализация процессов необходимых ЗЧ и ремонтных ресурсов по каждому виду ЗЧ и ресурсов для поддержания коэффициента готовности ЛА.

Общие сведения об имитационной программе

Программная реализация ИМ разработана в среде программирования Borland Delphi 7.0. Результаты работы программы в виде текущего состояния модели и трассировки отображаются в основном окне, и для корректного отображения состояния модели рекомендуется количество частей НС брать не более 150, а уровней не более 10. При подсчете результатов моделирования по множеству прогонов трассировочная и графическая информация не отображается, поэтому ограничений по размерности нет, а выходная информация сохраняется в файлы.

Результаты имитационных экспериментов

Для тестовой проверки работоспособности данной модели использован пример НС системы кондиционирования и регулирования давления самолета ТУ-154 (рис. 2) [7]. Данная система состоит из источника воздуха в виде трех двигателей и вспомогательной силовой установки (ВСУ), первичного узла охлаждения, двух магистралей, двух вторичных узлов охлаждения, системы вентиляции кабины, системы вентиляции двух салонов, а также различных датчиков и регуляторов на панели бортинженера и щитков для проведения технического обслуживания. В системе используется холодное резервирование крана отбора воздуха, клапанов в трубопроводе, горячее резервирование воздушных магистралей, вторичных узлов охлаждения. Возможны следующие зависящие отказы: подсистемы турбохолодильников при отказе подсистемы масляного охлаждения; вспомогательной силовой установки при отказе ее системы охлаждения.

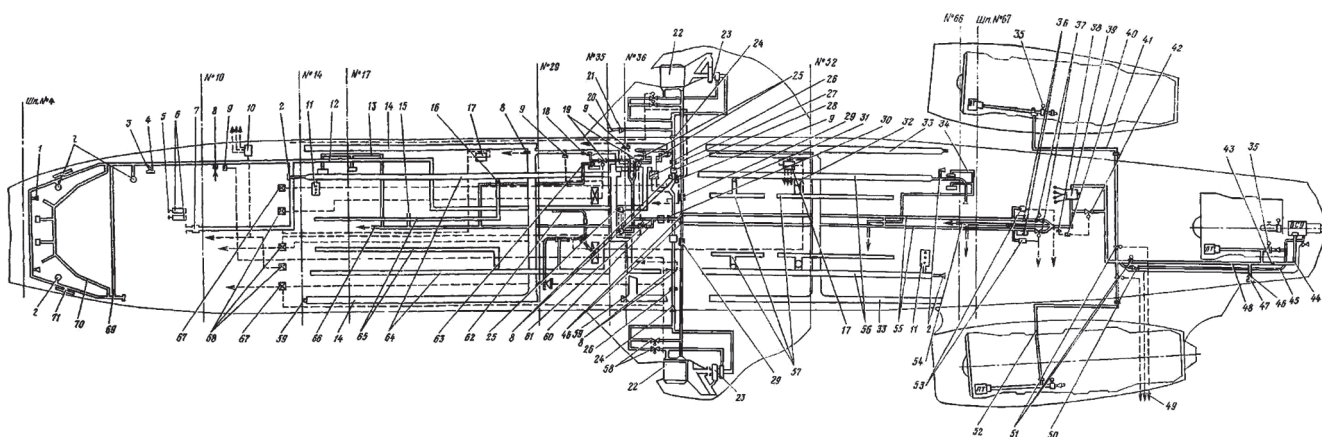


Рис. 2. Структура системы кондиционирования и регулирования давления самолета ТУ-154

Общее число частей НС – 116, число элементов – 87, число уровней НС – 6.

План режимов функционирования НС включает два режима: работа на земле, работа в полете. В режиме «работа на земле» работает только основной воздушный радиатор, а в режиме «Полет» – еще и вторичные радиаторы, что определяет различные нагрузки на элементы НС.

При проведении ТО НС в ИМ имитируется следующая последовательность действий: снятие люков гондол двигателей, осмотр трубопроводов, кранов отбора воздуха и клапанов; снимаются люки левого и правого полукрыла для осмотра воздухозаборников, турбохолодильников с масляной системой и заслонок левого и правого узлов вторичного охлаждения. Также снимаются три люка в багажных отделениях для осмотра остальных частей системы.

На панели бортинженера установлены датчики отказа подсистемы отбора воздуха по каждому из двигателей (включаются в случае отказа клапанов или кранов отбора воздуха), датчик повышения температуры хвостового отсека (включается в случае отказа предварительного узла охлаждения), датчики температуры по каждой магистрали, датчики температуры для каждого вторичного узла охлаждения, датчик перегрева воздуха в салонах и кабине и указатель расхода воздуха, по которому судят о неисправности воздухозаборника. К тому же имеется щит наземной проверки с соответствующими датчиками. Он применяется при ТО НС.

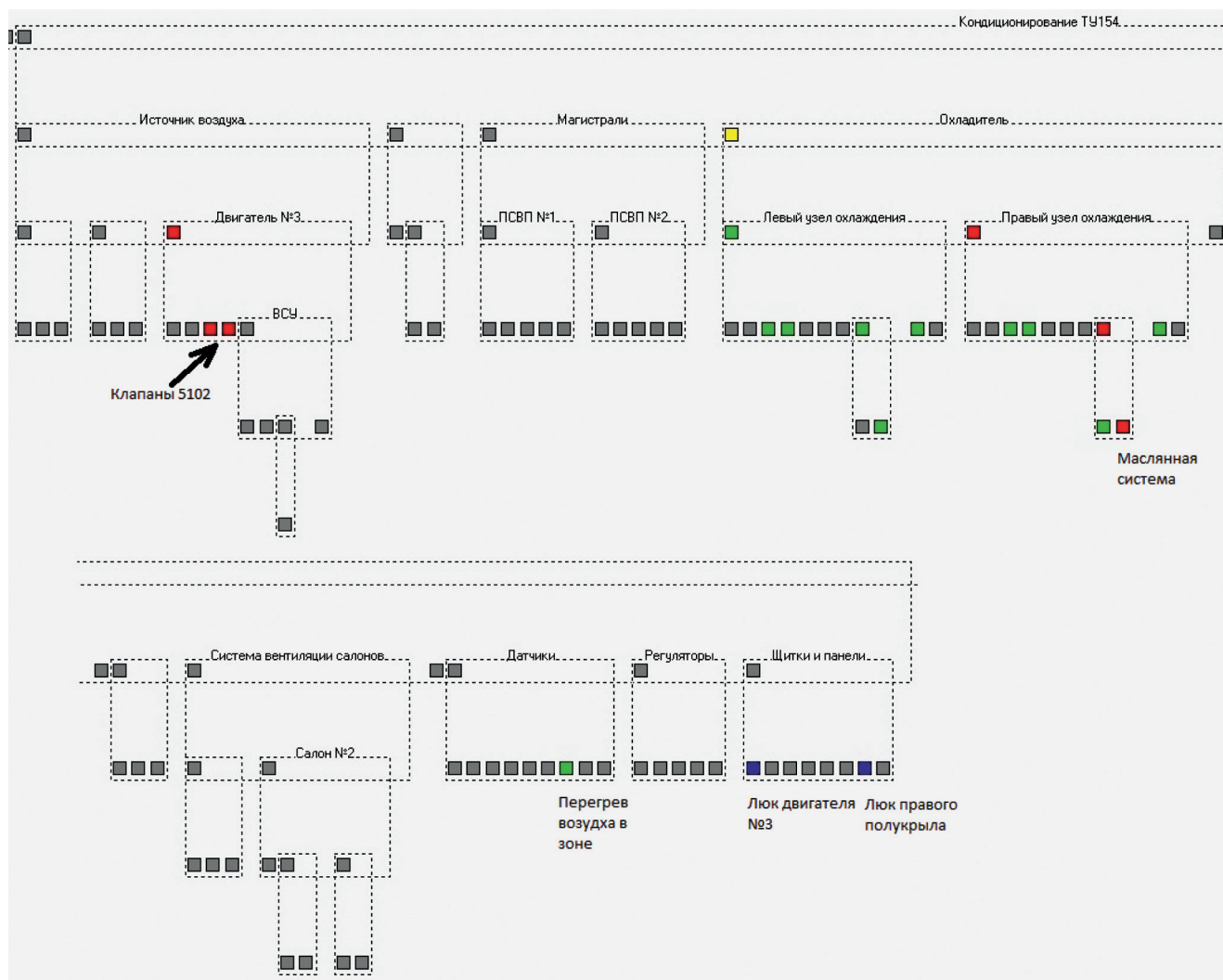


Рис. 3. Графическое отображение функционирования ИМ при отказе клапанов 5102

В ИМ НСЛА возможны «скрытые» отказы. При отказе заслонки вторичного узла охлаждения в работу вступит дублирующая заслонка и перегрева воздуха не произойдет. Аналогично существуют дублирование смесителей и распределителей системы вентиляции кабины и салонов. Данные отказы могут быть обнаружены только в результате проведения ТО с заданной вероятностью.

Для большинства частей НС определено состояние включения. У каждого элемента, в состоянии включен, имеются отказы двух типов: по наработке (нормальный закон распределения) и внезапные отказы (экспоненциальный закон распределения). Для выключенных элементов возможны износные отказы в результате хранения.

Замена элементов производится путем снятия соответствующего щитка, далее последовательно выполняются процедуры демонтажа отказавшего элемента, монтаж нового элемента с последующей настройкой его. Замена некоторых отказавших элементов производится путем замены блока, например, при отказе масляной системы турбохолодильника заменяется данный блок целиком.

Имитационные эксперименты могут проводиться как по множеству независимых прогонов, так и по одному длинному прогону в предположении выхода на стационарный эргодический режим функционирования ИМ.

В отладочном режиме ИМ позволяет осуществить наглядный (в графическом виде) вывод информации об изменении состояния любой группы частей моделируемой НС. В частности, на рис. 3 представлен процесс технического обслуживания, вызванный отказом клапанов 5102 у третьего двигателя.

На рисунке используется следующее цветовое отображение состояний частей НС: серый цвет – выключено, зеленый цвет – включено, неисправность – желтый, отказ – красный, выведен из состава НС – синий.

Такой вывод позволяет провести логический анализ процесса функционирования ИМ и убедиться в его адекватности описания процесса функционирования НС.

Ниже приводятся в графическом виде статистические результаты, полученные по множеству прогонов процесса функционирования НС с заданного начального состояния в виде ряда частот отказа всей НС во времени.

Общая характеристика плана имитационных экспериментов следующая.

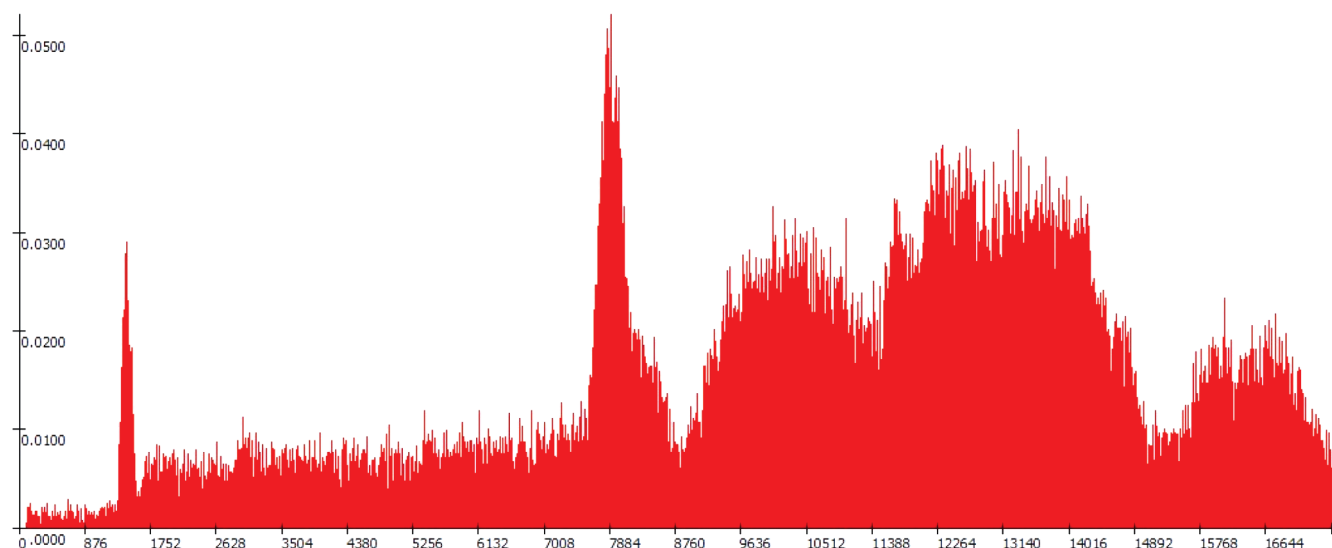


Рис. 4. График частотного ряда отказов всей НС системы кондиционирования во времени

Время прогона – 2 года. В течение этого времени проводится 500 полетов и 10-15 полных ТО. Длительность каждого полета 10 ч. Все элементы в начальном состоянии имеют наработку, не превышающую 10% ресурса. Объем выборки – 5000 прогонов.

Результаты имитационных экспериментов по частотному ряду отказов всей НС системы кондиционирования представлены на рис. 4. Для реализации ИМ данной НСЛА потребовалось 6,5 МБ оперативной памяти. По времени моделирования заняло 8 минут и 46 секунд.

На графике рис. 4 можно отметить два периода пикового отказа НС и два промежутка повышенной интенсивности отказов. Детальный анализ состояния НС на указанных временных интервалах показал, что первый пик вызван отказами масла системы охлаждения (по результатам моделирования за время прогона масло отказывает в среднем 5,44 раза и до 12 раз максимально). Второй пик вызван отказами клапанов 5102, обеспечивающих подачу воздуха от двигателей и ВСУ. Дальнейшие промежутки повышенной интенсивности отказов вызваны отказами систем охлаждения: заслонками, системами турбоохладителя, влагоотделителя и систем вентиляции салона и кабины: смесителей, распределителей и устройств управления.

С учетом результатов проведенного анализа произведены изменения в планах проведения ТО: увеличено до пяти раз плановых замен масла; определены планы замены на новые некоторых агрегатов еще в состоянии их работоспособности, не доводя их до состояния отказа. В результате этих изменений удалось существенно снизить частоту отказов НС системы кондиционирования. Результаты имитационных экспериментов после указанных изменений по аналогичному, описанному выше плану их проведения показаны на рис. 5.

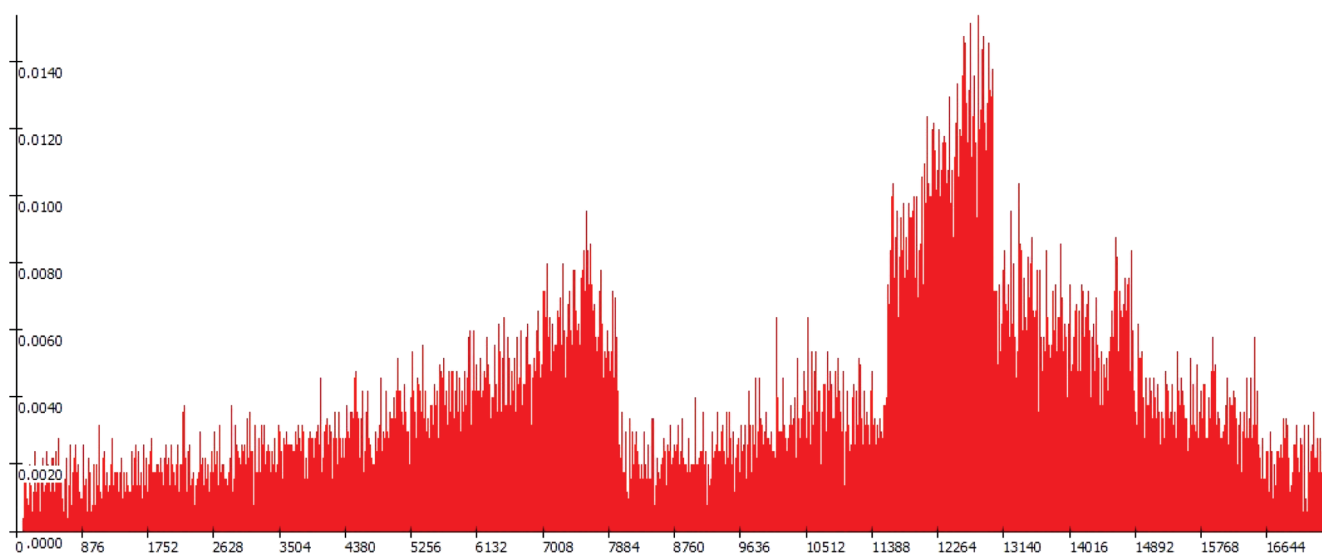


Рис. 5. График частотного ряда отказов всей НС системы кондиционирования во времени после проведенных изменений плана проведения ТО

Сравнение графиков на рис. 4 и 5 показывает, проведенные изменения позволили существенно снизить частоты отказов НС.

С другой стороны, можно сделать очень важный вывод о хорошем качестве разработанной ИМ, ее чувствительности к вариациям параметров, и, следовательно, о возможности ее использования в модели более высокого уровня для анализа процессов послепродажного обслуживания ЛА.

Литература

1. **Синицын И.Н., Шаламов А.С.** Лекции по теории систем интегрированной логистической поддержки. – М.: ТОРУС ПРЕСС, 2012.
2. **Анцелович Л.Л.** Надежность, безопасность и живучесть самолета: Учебник для студентов вузов, обучающихся по специальности «Самолетостроение». – М.: Машиностроение, 1985.
3. **Арепьев А.Н., Громов М.С., Шапкин В.С.** Вопросы эксплуатационной живучести авиаконструкций. – М.: Воздушный транспорт, 2002.
4. Надежность и эффективность в технике: Справочник: В 10 т. Том 8. – М.: Машиностроение, 1990.
5. ГОСТ 27 002-89. Надежность в технике. Основные понятия, термины и определения.
6. **Бирюзова Е.И.** Единый регламент технического обслуживания планеров. – М.: Изд-во ДА-СААФ, 1959.
7. **Волошин Ф.А., Кузнецов А.Н.** – Самолет Ту-154. Конструкция и техническое обслуживание. (Книга 2) – 1975.
8. **Хахулин Г.Ф.** Основы конструирования имитационных моделей. М.: Издательство НПК «Поток». 2002 г. 224 с.



Khakhulin G.F., Titov Yu.P.

SIMULATION MODEL OF MILITARY AIRCRAFT DEPENDABLE STRUCTURE AND ITS USE IN THE RESEARCH OF AFTER-SALE SERVICE PROCESSES

The paper examines the relevance of the development of a simulation model of aircraft dependability structure for the purpose of analyzing the processes of after-sale service of military aircraft. It also describes the developed simulation model and the results of simulation.

Keywords: aircraft, after-sale service, simulation model.

Introduction

Following the decisions of the Government of the Russian Federation and respective orders and regulatory document of the Ministry of Defense, the after-sale service system of military facilities including aircraft is undergoing a reform. As opposed to the strategy of service by organizations of the Ministry of Defense, the new system is to entrust the service process to manufacturers. For that purpose, the manufacturing companies and components suppliers are establishing dedicated structures in order to support the process that includes planning of production, storage and timely delivery of spare parts, routine maintenance and repair of failed equipment. These structures and units are to maintain close cooperation with military units that operate the purchased weapon systems. In this context, the study of after-sale service processes for development of an efficient management system is a relevant research and development task. The related issues are covered in monograph [1] that analyzes the structure of the after-sale service of complex engineering facilities and suggests mathematical tools for its research. The book highlights the use of probabilistic and analytical methods. Those methods have well known limitations in terms of capability to adequately represent the processes occurring in complex organizational and engineering systems including the system of after-sale service. The monograph also highlights the applicability of simulations that do not have any fundamental restrictions in terms of adequate representation of complex processes. The authors attempt to create one of the key parts of the general simulation model (SM) of after-sale service, namely the SM of the dependability structure of a complex engineering facility, i.e. an aircraft, which is submitted to such service. The aircraft dependability structure (ADS) is defined by a set of components (elements, units, subsystems and the aircraft as a whole) the operation of which is considered in terms of fulfilling the aircraft dependability requirements (failure-free operation, scheduled maintenance, occurrence of failures, performance of maintenance activities, use of spare parts, resources,

etc.), described by a number of indices determining this dependability (for example, probability of failure-free operation, availability, etc.).

The purposes and tasks of the specified simulation model are defined by the requirements of the upper level simulation model representing the operation process of the whole system of after-sale service. From this point of view SM of ADS should enable, on the one hand, estimation of aircraft dependability indices within the established strategy of operation support by spare parts and repair resources, and on the other hand, contribute to the development of the strategy of accumulation and use of spare parts, accumulation and support of necessary repair resources by providing statistical information on failure-free times of various ADS components, by quantitative estimation of demand for spare parts and repair resources based on the information on failures and restorations of ADS components.

Below is the description of the process of ADS simulation: problem definition, stages of formalization, development of the simulation program, carrying out of simulation.

Problem definition

The problem is defined as the development of an ADS SM to be used as part of the SM process of an aircraft after-sale service.

Purpose of the SM:

- Estimation of aircraft dependability indices within the defined strategy of operation support with spare parts and repair resources;
- Support of strategy development for accumulation and use of spare parts, generation and support of required repair resources by means of statistical information on failure-free times of various ADS components, quantitative estimation of demand for spare parts and repair resources based on the information on maintenance, failures and restoration of ADS components.

Used assumptions.

At the initial stage of SM ADS development we shall assume the availability of unlimited quantities of spare parts and repair resources.

ADS concept and operation process

ADS is represented as multilevel treelike structure, where at the upper level the component corresponding to the whole ADS is placed. At the following lower level, the ADS system splits into components corresponding to aircraft subsystems that perform individual vital and purpose functions (i.e. airframe, engine, flight-control system, weapons control system, etc.). Subsystems in turn split into smaller functional subsystems, then units. Units themselves consist of other units and elements. At the lowest level of any branch, ADS elements are situated.

An element from the point of view of ADS operation process is considered to be indivisible. Laws of failure-free time (FFT) distribution are defined for ADS elements. In their nature, the element failures can be gradual (wear-out) and sudden. Both types of failures can occur in parallel [2, 3]. Various kinds of distribution laws (DL) are used for formalized probabilistic description of FFT. The most commonly used are the exponential, normal, lognormal, Weibull-Gnedenko ones, etc. [4].

An ADS element failure can lead to certain consequences (failure, malfunction or reduction of operational efficiency) affecting the condition of the components of the respective ADS branch (in chain order upwards) to which the element belongs (including the highest level ADS components, i.e. the whole ADS).

To enhance the dependability of individual ADS components, at its various levels certain types of redundancy can be used: loaded (hot), semi-loaded, non-loaded (cold), moving redundancy, etc. Therefore,

the failure of certain ADS component does not necessarily lead to the failure higher-level components.

If the failure of an element does not entail the failure of the respective ADS component, the status of this part is defined as faulty [5]: i.e. it carries out all functional tasks (probably, less efficiently), yet contains failed elements. Otherwise the ADS component turns into failure state.

Stress affecting an aircraft in operation influences the FFT of each element. Stress depends on the operating mode: tactical mission, patrol, training, outdoor aircraft storage, aircraft storage in shed, aircraft storage in heated hangar, etc. The operating mode is the list of conditions in which an aircraft operates. Changes in aircraft operating mode normally happen routinely (air alert, tactical mission, maintenance, etc.), but it can also be random (e.g., in case of unforeseen change in ADS condition). Generally, for each mode there is a list of ADS components that ensure its implementation. For ADS elements of those components their own FFT DLs can be defined.

For each ADS element the following statuses can be implemented:

1. On. The element performs all required functions. The initiation of this status the element must be operable (absence of failure) and installed on the aircraft.
2. Off. The element is switched off and does not perform any functions. It is assumed that the element awaits activation under certain conditions. A switched off element is assumed to be operable and installed on the aircraft.
3. Failed. An element is in failure mode. It does not perform any functions and requires urgent recovery. Upon recovery it switches off.
4. Removed from ADS (removed from aircraft). The element is dismantled for maintenance or repair. The element can be both failed and operable.

Similar statuses can also be defined for other ADS components (that are not necessarily elements).

Besides the operating modes, an element's FFT DS generally depends on its operating history, i.e. time of operation in other modes. In addition, dependent failures can occur in some ADS components: failures of certain elements caused by failures of other elements as the result of change of operation conditions.

In terms of dependability analysis, ADS it is a restorable system, i.e. after a failure event of an ADS component, if it does not lead to catastrophic consequences, recovery is performed (repair or replacement). A catastrophic situation is a very low probability event. Therefore, the development of the simulation model considered here does not aim to model such situations.

The process of ADS component recovery consists of two procedures: failure detection and recovery activities (repair or replacement of failed ADS component).

Failure events of some ADS component, generally, may not manifest instantly and if identified, usually cannot be immediately eliminated. This means that failures of ADS components can be accumulated, and this accumulation in certain combinations can lead to more severe consequences than each failure of ADS component individually.

The ADS component failures can be detected in the following ways:

1. In operation with the help of special indicators. Such failures are called "explicit".
2. During maintenance. Such failures are called "latent". They are detected with special instruments and monitoring devices.

The detection of an ADS component failure initiates the repair process (if required by technical regulations) or replacement (if spare parts and repair resources are available). Generally, the restoration process is random: events of "latent" failures detection, maintenance time, repair or replacement of failed components can be random. However, when reliable statistical input information regarding the time of recovery activities is not available, respective data given in corresponding engineering manuals can be used [6,7].

Note again that for the purpose of the SM development we assume that the required spare parts and repair resources are unlimited, which allows simplifying the process of formalization at this stage. At further stages of SM developed these assumptions will be removed.

Choice and substantiation of SM class

The ADS operation can be represented by means of SM based on the description of such event-trigger phenomena as failures of elements and related failures of other ADS components, beginning and termination of various types of maintenance operations, detection of failures, beginning and termination of repair and replacement of failed ADS components, etc. In this context, the ADS model can be represented as a discrete SM that functions on the basis of model (time) events method (MEM) [8]. The list of key model events and the diagram of their interaction that reflects the process of parallel event planning at processing is shown in Fig. 1.

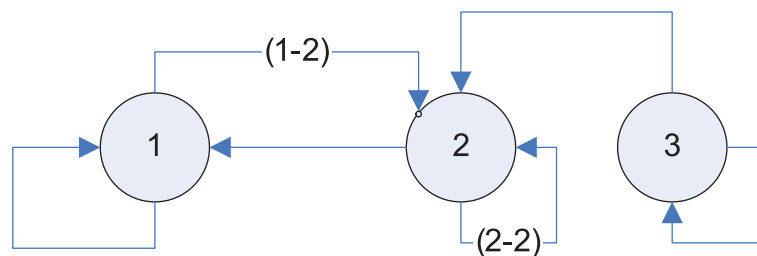


Fig. 1. Flow graph of events interaction

Names and codes of key time events:

1. Element failure;
2. Performance of operation on an ADS component (switching-on, switching-off in operation; termination of installation, removal or adjustment during maintenance);
3. Change of operating mode.

Conditions of event-scheduling:

- (1-2) If the failed element has a functioning redundant element;
- (2-2) If not all specified operations for an ADS operating mode initiation have been performed.

Indices of evaluation criteria for modeling results:

1. Implementation and statistical characteristics of spare parts and repair resources consumption in repair and recovery operations:
 - processing of a set of runs statistics: failure rate of individual ADS components in a single SM run;
 - processing of one long run with stationary assumption and ergodic nature of the processes taking place in the SM: evaluation of failure rates for individual ADS components.
2. ADS availability (the ratio of ADS FFT to the SM run time).

SM parameters

Below is the aggregative description without detailed discussion of data structures used for specification and storage.

- ADS parameters reflecting its multilevel treelike structure, types of redundancy used in its individual components, effects of the failure of each individual component (dependence of failures of ADS components, the possibility of recovery operations of individual ADS components by replacement of failed parts or recovery operations have been identified). Types and time characteristics of maintenance and its

frequency. For the “latent” failures of elements, the types of maintenance that ensure “latent” failures detection have been identified. For complex latent failures, the probability of detection, the list of maintenance operations and their time characteristics have been defined.

- The list of ADS operating modes.
- ADS components that should operate in each mode.
- Scenario of ADS operation mode change.
- Types and parameters of FFT DS of elements for each mode.

SM status

The key status variables of ADS SM are the ones that define the current status of individual ADS components.

These variables are defined in the list structure of data unambiguously connected to ADS. According to the above description, the list of statuses of ADS components includes: operational or faulty; in service or out of service; included in ADS structure or excluded from it (uninstalled).

For the ADS and individual components, the type of mode is defined for current simulated time. Accordingly, the inclusion of ADS components in the operation is defined.

For each ADS element, the total operating time is identified (taking into consideration the load factors depending on the current operating mode). For each ADS component, the total operational time is accumulated. For each ADS component, failure rates per simulation times are accumulated for each ADS components and the ADS as a whole.

For the above basic time events, the list of information specified in the additional attributes of record for those events is as follows:

Failure of an element event (1):

- Failed element indicator;
- Type of failure.

Operation on ADS component event (2):

- Indicator of the ADS component operated on;
- Name of operation;
- Time required to perform operation;
- Load factor on ADS component during operation;
- ADS status required for performance of operation.

Scheduled change of operating mode event (3):

- Number of mode from the set of possible ADS operating modes.

Initial SM status

Status of all components is operational. Operating mode is the first of the plan. All ADS components are involved in operation according to the specified mode. Operation time for each ADS component is 10% from maximum. Planned failures of all types of all ADS elements are recorded in the statistics database (SDB). Variables for statistics gathering are in zero state.

Simulation of random events

The most important random event in the SM under examination is the random variable of **failure-free time of ADS elements**. The complexity of simulation of this random event is due to the following:

- ADS elements during its functioning operates in different modes that vary according to the specified plan;
- each element in different modes has its own FFT DS parameters;
- failures of elements can be of two types: sudden failures (SF) and wear-out failures (WOF). It is assumed, that the time of SF occurrence depends only on the ADS operating conditions (type of operating mode), while the time of WOF occurrence also depends on the time of operation in certain modes (so-called time to failure);
- there are dependent failures when a failure of some elements causes failures of other elements or accelerates their failure by affecting the parameters of their FFT distribution law.

It is suggested to use different probabilistic descriptions of FFT for the above failure modes and, accordingly, different algorithms for identification of their occurrence time:

- for SF, the exponential law of FFT distribution (ELD) will be used. Its parameters will be defined by the type of the element and the ADS operating mode. In theory, the ELD “has no memory”, i.e. at each change of ADS operating mode the parameters of the FFT distribution law in the next mode do not depend on the operation time in previous modes. Using this property of ELD, it is suggested to carry out **simulation of the SF moment** as follows: at each change of mode, an FFT occurs. It is compared to the ADS operation time in this mode at the next stage; the moment of failure is registered if the FFT occurrence time is less than the operation time in the considered mode;
- for DF, the normal law of distribution (NLD) is used. For each mode the concept of “load factor” is used. It is characterized by the ratio of an element wear rate in a mode to its deterioration rate in some conditions for which NLD parameters are defined. Considering the above, it is suggested to perform the **simulation of the DF moment** as follows: based on the NLD, the time to failure occurrence is identified; then, during simulation, the actual times to failure obtained per operating modes are summarized (these times to failure are weighed (multiplied) by the corresponding load factors. The DF moment is defined by the equality of the above values.

Besides the moments of change of ADS operating modes, simulation of elements FFT occurrences is also performed at replacement of failed ADS components during simulation of repair and recovery operations as a consequence of dependent failures.

For simulation of dependent failures, in accordance with the structure of interaction of dependent failures, defined in the SM parameters, when an element fails a number of other elements with possible dependent failures are identified.

If it is SF, then according to the specified probability, failures of these dependent elements are simulated, or parameters of FFS DS are redefined upwards in probabilities for smaller FFT values, and according new FFT occurrences are identified.

If it is DF, then load factors increase for subsequent modes which again leads to a reduction of time to DF occurrence.

Another random event, of which the occurrence **must be simulated is the event of latent failures detection**. The simulation of these events is performed during the processing of model events related to ADS maintenance operations according to the SM-specified probabilities of latent failures detection events.

Algorithms of simulated events processing

During the processing of an Element failure event, the following operations are performed:

1. Recording of the time during which the component with the failed element was in the previous status.

2. Setting of the ADS component in the failure status.
3. Removal of all failure events of the given component from the SDB.
4. Search of the backup component or the switched off redundant component. Activation of the switched off operational redundant component if possible.
5. Change of the FFT parameters of the elements the failures of which depend on the status of the failed element, simulation of their FFT occurrence and updating of the SDB.
6. Activation of the failure indicators of the failed component if those are available.
7. If backup ADS components are not operational and the failure of this component should lead to the failure of a higher level component, then execute the failure procedure of a new component (Recursive performance of this operation upwards along the whole ADS branch).
8. Save statistics on the given component failures.

Operation on an ADS component

An event processing involves the performance of the following sequence of actions:

1. Definition of operation type.
 - a. For the Activation operation, the component activation procedure is initiated. This procedure activates the component by creating the required failure events and removing the excessive ones.
 - b. For the Switching-off operation, the component switching-off procedure is initiated. This procedure switches the component off by creating the required failure events and removing the excessive ones. After that, the whole section graph (all components of the unit) of the given element switches off.
 - c. For the Uninstallation operation, the component status switches to not present in the ADS structure.
 - d. For the Installation operation, the procedure is initiated that appoint the component as part of the ADS. The procedure nullifies the operation time parameters for the component and switches it off.
 - e. For the Adjustment operation, the component is switched to the operational state and the components that failed due to the failure of this component are recovered.
2. Activation of the “latent” failures search procedure.
3. Calculation of the execution time of the following operation in the respective sequence.
4. Event planning ($K=2$).

Change of operating mode event

An event processing involves the performance of the following sequence of actions:

- accumulation of statistics on the operation times of the active ADS components taking into account the completed mode;
- adjustment of the FFT distribution laws of elements wear-out failures, updating of the SDB specific to those failures;
- elements sudden failures FFT occurrence simulation and updating of the SDB subject to the scheduled duration of the new operating mode.

Statistics gathering and calculation of the KORM values

The statistics gathering includes the following functions:

- Gathering statistics on the failure-free times of the ADS and its components;
- Recording of various spare parts use;
- Recording of various repair resources use;

- Calculation of the availability factor of the ADS and its components;
- Statistical processing of the results of spare parts and repair resources use and identification of the statistical characteristics of these processes.

Using the simulation results, the required statistical characteristics are calculated:

- The availability factor of an aircraft is defined as the ratio of the time of operability to the time of simulation;
- Statistical characteristics of spare parts and repair resources use are calculated. For this purpose it is assumed, that by the time of failure detection it is required to have spare parts available, and for the time of recovery it is required to involve necessary repair resources. As a result of the information processing, the processes implementation is defined for required spare parts and repair resources of each kind for the support of the aircraft availability.

General information on the simulation program

The SM software has been developed in the Borland Delphi 7.0 programming environment. The results of the program's operation are displayed in the main window in the form of the current model status and tracing. For correct display of the model status it is recommended to keep the number of the ADS components within 150, and the levels within 10. During the calculation of the simulation results after a number of runs the tracing and graphic information is not displayed, therefore the dimension is not restricted and the output information is saved in files.

Simulation results

This model was performance tested using the example of the DS of the TU-154 air-conditioning and pressure regulation system (fig. 2) [7]. This system consist of a source of air in the form of three motors and auxiliary power-plant (APP), primary cooler unit, two vent lines, two secondary cooler units, flight deck ventilation system, two passenger cabin ventilation systems and various sensors and regulators on the flight engineer's panel and maintenance panels. The system uses cold backup of the air bleed valves, valves in the pipeline, as well as hot backup of air lines, secondary cooling units. The following dependent failures are possible: turbo refrigerating subsystems failure in case of failure of the oil cooling subsystem; auxiliary power-plant failure in case of its cooling system failure.

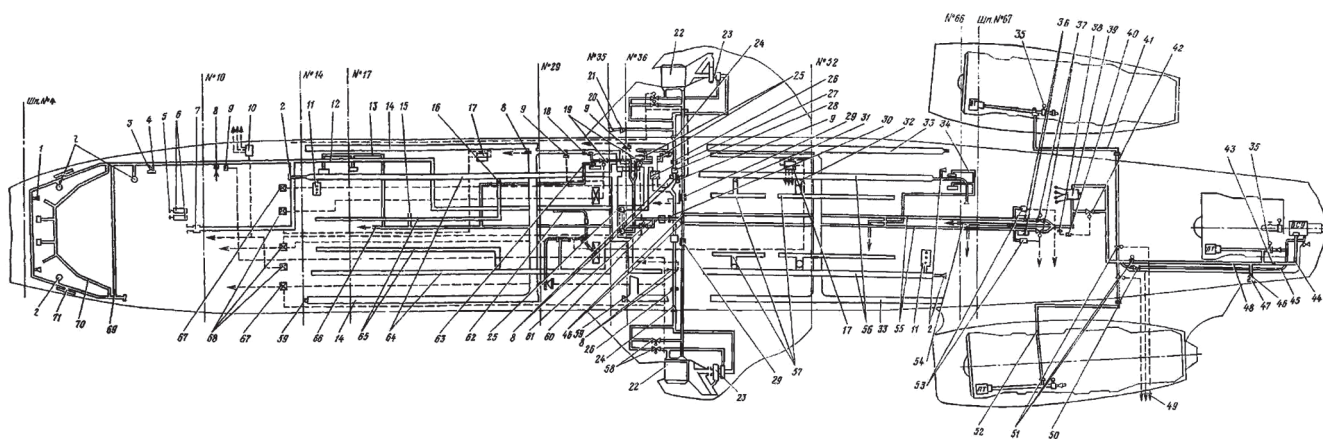


Fig. 2. Structure of the TU-154 air-conditioning and pressure regulation system

The total number of ADS components is 116, the number of elements is 87, the number of ADS levels is 6.

The plan of ADS operating modes includes two modes: operation on the ground, operation in flight. In the Operation on the ground mode only the main air radiator is on, in the Flight mode secondary radiators are also on which defines various loads on the ADS elements.

The following sequence of operations is simulated during ADS maintenance: removal of hatches of engine nacelles, inspection of pipelines, air bleed taps and valves; hatches of the left and right half-wings are taken off for inspection of air inlets, turborefrigerating units with oil system and valves of the left and right secondary cooling units. Three hatches in the luggage compartments are also removed for inspection of other parts of the system.

The flight engineer's panel includes sensors of air bleed subsystem failure for each motor (activates in case of failure of valves or taps of the air bleed subsystems), the sensor of tail compartment overheating (activates in case of failure of the preliminary cooling unit), the temperature sensors for each airline and for each secondary cooling unit and overheating sensors for passenger cabins and flight deck and the air consumption indicator that signals air intake failures. In addition, there is an on-ground check panel with corresponding sensors. It is used for ADS maintenance.

"Latent" failures are also possible in the ADS SM. In case of secondary cooling unit valve failure the backup valve will activate preventing air overheating. Similarly, there are backup mixer taps and ventila-

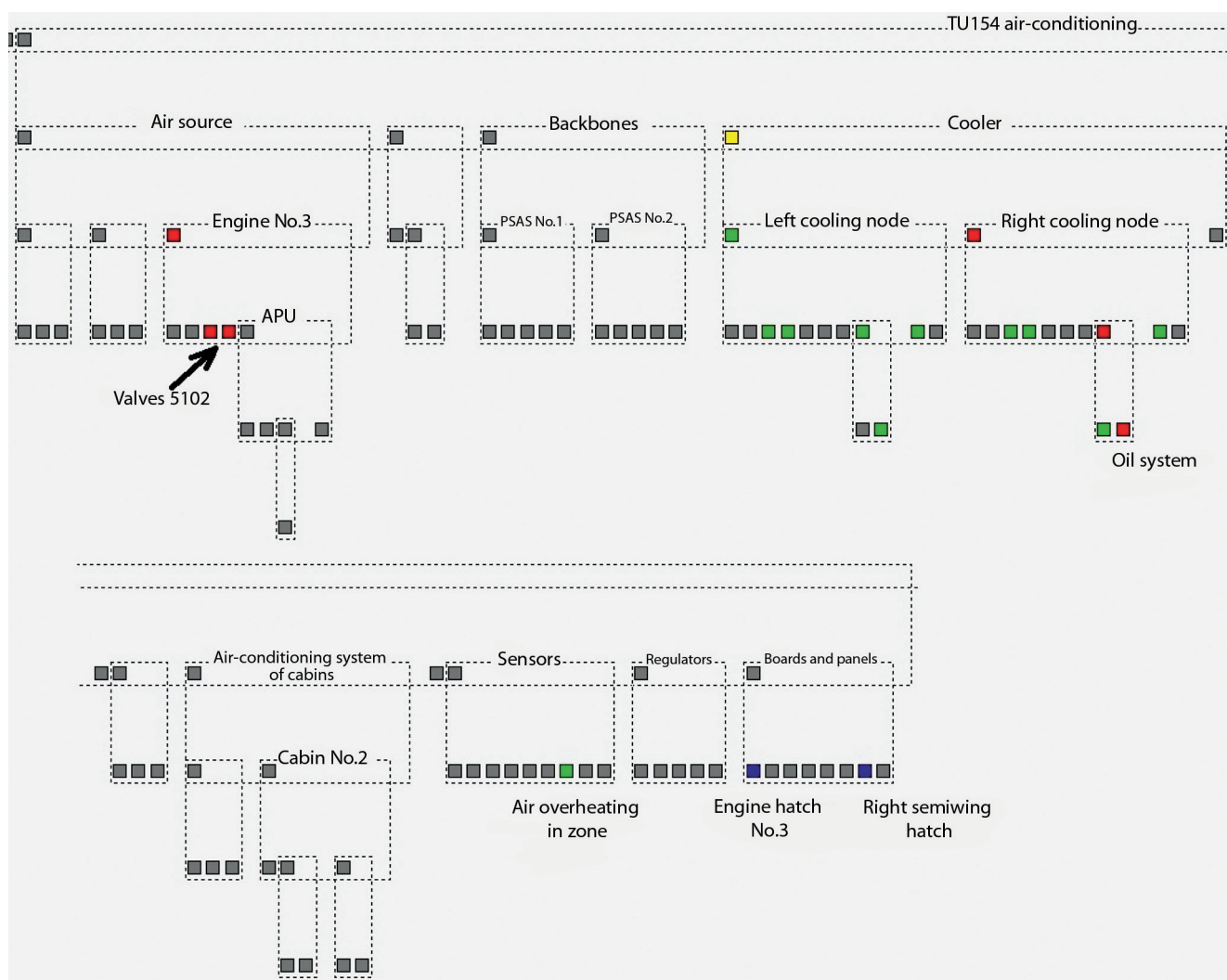


Fig. 3. Graphic representation of SM operation upon failure of valves 5102

tion system distributors for the flight deck and the passenger cabins. Those failures can be detected only by means of maintenance with defined probability.

For the majority of ADS components the activation status is defined. Each element in active state has two types of failures: operation time (normal distribution law) and sudden (exponential distribution law). For the inactive elements, wear-out failures caused by storage are possible.

Elements are replaced by removing the protective cover, uninstalling the failed element, installing the new element and adjustment. Some failed elements are replaced by replacement of the respective units, e.g. in case of oil system failure the whole turbo refrigerating unit is replaced.

Simulations can be performed with a set of independent runs or with one long run in the assumption of coming to stationary ergodic mode of the SM operation.

In the test mode, the SM provides for a visual output of information on the changes of status of any group of components of the simulated DS. In particular, fig. 3 presents the process of maintenance caused by the failure of valves 5102 of the third engine.

The figure uses the following color representation of the ADS components statuses: grey is switched off, green is activated, yellow is malfunction, red is failure, dark blue is excluded from the ADS.

Such information representation enables the logic analysis of the SM operation process and verification of its compliance with the description of the DS operation process.

Below is the graphical representation of the statistical results obtained by a set of runs of the DS operation process from the specified initial state in the form of failure frequencies in time for the whole DS.

The general description of the simulation plan is as follows.

Run time is 2 years. During this time 500 flights and 10 to 15 full maintenances operations are performed. Duration of each flight is 10 hours. All elements in the initial state have operation times of not more than 10 % of the life time. Sample size is 5000 runs.

The results of simulation of the failure frequency of the whole air-conditioning system ADS are shown in fig. 4. 6,5 MB of RAM were required for the implementation of this ADS SM. The simulation took 8 minutes and 46 seconds.

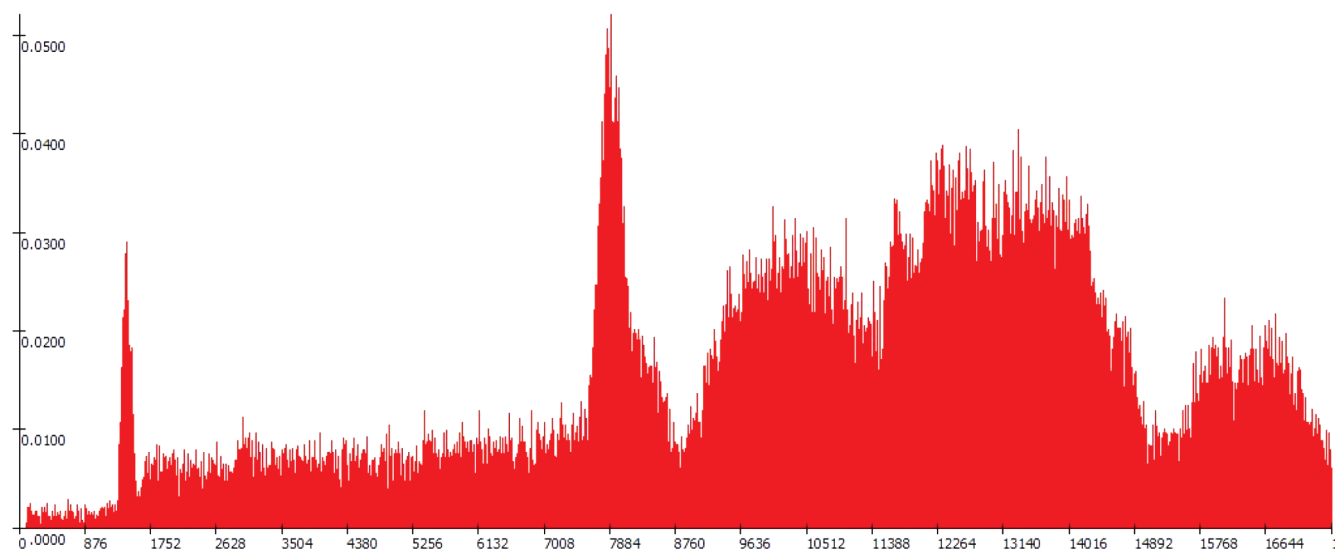


Fig. 4. The diagram of failure frequency of the whole air-conditioning system ADS in time

In fig. 4 we can observe two periods of ADS peak failure and two intervals of increased failure rate. The detailed analysis of ADS status in the specified time intervals has shown, that the first peak was caused by failures of the oil in the cooling system (according simulation results, during the SM run oil fails 5,44

times on the average and up to 12 times maximum). The second peak was caused by the failures of the valves 5102 that ensure air supply from the engine and the auxiliary power plant. The other intervals of increased failure rate were caused by failures of cooling systems: valves, turbo refrigerating units, moisture separators and ventilation systems of passenger cabins and flight deck: mixer taps, distributors and control devices.

In view of the results analysis, changes were made to the maintenance plans: scheduled replacements of oil were increased by five times; some units were to be replaced by new ones even when the replaced units are still in operating condition. These changes ensured significantly lower failure rates of the air-conditioning system ADS. The results of simulations after the specified changes under the similar plan are shown in fig. 5.

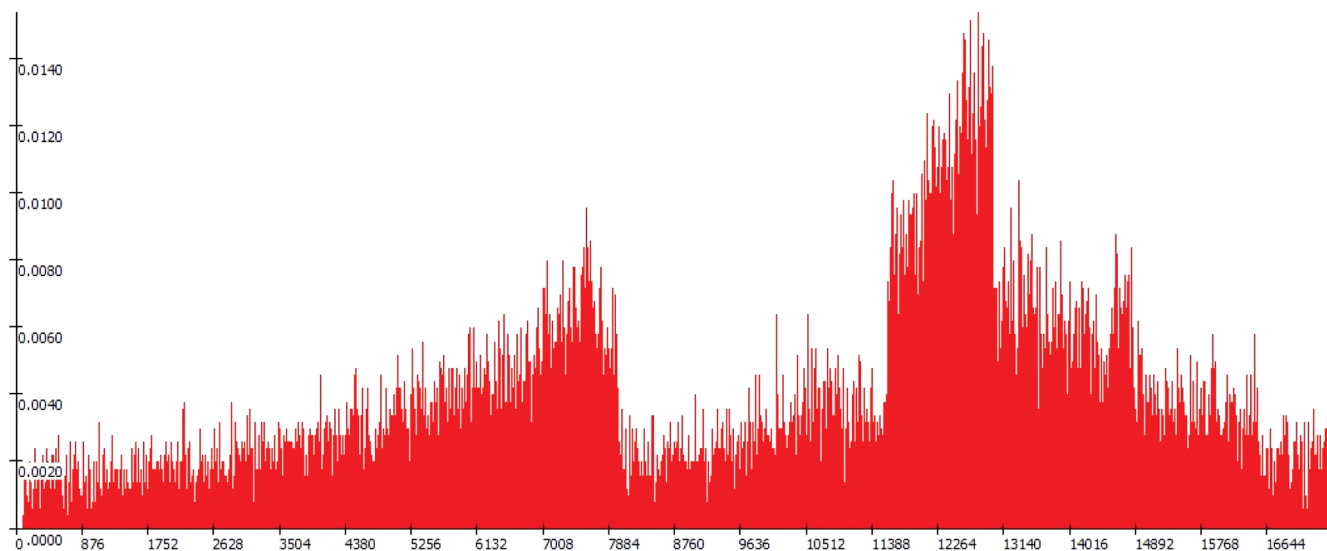


Fig. 5. The diagram of failure frequency of the whole air-conditioning system ADS in time after the changes to the maintenance plan

A comparison of the diagrams in fig. 4 and 5 shows that the changes ensured significantly lower ADS failure rates.

It can also be concluded that the developed SM is of high quality, it is sensitive to variations of parameters, and, hence, it can be used in higher level models for the analysis of aircraft after-sale service.

References

1. **Sinitsyn I.N., Shalamov A.S.** Lectures on the theory of integrated logistical support systems. Moscow. TORUS PRESS, 2012.
2. **Antselovich L.L.** Airplane dependability, safety and survivability: Coursebook for college students in Aircraft design. Moscow. Mashinostroenie, 1985.
3. **Arepiev A.N., Gromov M.S., Shapkin V.S.** Matters of operational survivability of aircraft designs. Moscow. Vozdushny transport, 2002.
4. Technology dependability and efficiency: Reference book: In 10 volumes. Volume 8. Moscow. Mashinostroenie, 1990.
5. GOST 27 002-89. Technology dependability. Basic concepts, terms and definitions.
6. **Biriuzova E.I.** Single guidelines for airframe maintenance. Moscow. DOSAAF Publishing house, 1959.
7. **Voloshin F.A., Kuznetsov A.N.** – Tu-154 aircraft. Design and maintenance. (Book 2), 1975.
8. **Khakhulin G.F.** Basic principles of simulation model design. Moscow. NPK Potok Publishing house. 2002. 224 p.



Русин А.Ю., Абдулхамед М.

УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССОМ ИСПЫТАНИЯ ОБОРУДОВАНИЯ НА НАДЕЖНОСТЬ

Повышения экономической эффективности системы испытания оборудования на надежность можно добиться сокращением времени испытаний или уменьшением количества испытываемых образцов. При сокращении времени испытаний возрастает степень цензурирования выборки, а при уменьшении количества образцов уменьшается объем выборки наработок оборудования. Сокращать параметры испытаний можно только в том случае, если методы обработки информации обеспечивают достоверность рассчитанных показателей надежности.

В результате проведения испытаний формируются малые, цензурированные выборки наработок оборудования на отказ. Расчет показателей надежности по таким выборкам выполняется методом максимального правдоподобия. В статье представлены экспериментальные исследования точности оценки максимального правдоподобия параметра экспоненциального закона распределения по малым, однократно цензурированным справа выборкам. Исследования выполнялись моделированием на компьютере цензурированных выборок, подобных выборкам, формирующимся при испытаниях оборудования на надежность. Эти экспериментальные данные показывают, что большинство оценок максимального правдоподобия, полученные по малым, однократно цензурированным справа выборкам имеют значительные отклонения от истинных значений.

В работе построены регрессионные модели, устанавливающие зависимость между отклонением оценки максимального правдоподобия от истинного значения и параметрами, характеризующими структуру выборки. Они позволяют рассчитать и ввести поправки к оценкам максимального правдоподобия. Были проведены экспериментальные исследования результатов их использования. Точность оценок максимального правдоподобия после применения разработанных моделей и введения поправки к оценкам максимального правдоподобия значительно возрастает. Разработано программное обеспечение для применения регрессионных моделей на практике.

Ключевые слова: компьютерное моделирование, обработка информации, испытания оборудования, надежность, цензурированные выборки, метод максимального правдоподобия.

На всех этапах проектирования и эксплуатации оборудования ведется контроль показателей надежности. При создании нового оборудования для определения показателей надежности проводят его испытания.

Оптимизация системы испытаний оборудования на надежность направлена на уменьшение затрат на их проведение. Один из путей их снижения – это сокращение времени проведения испытаний. Если испытываемые образцы дорогостоящие, то снижения стоимости можно добиться уменьшением их количества.

В результате проведения испытаний формируются выборки наработок на отказ исследуемого оборудования. При сокращении времени проведения испытаний и уменьшении количества образцов мы получаем малые цензурированные справа выборки наработок на отказ.

При параметрическом оценивании показателей надежности по цензурированным справа выборкам основным математическим методом является метод максимального правдоподобия.

В условиях сокращения времени испытаний и количества испытуемых изделий, становится актуальным вопрос исследования достоверности оценок максимального правдоподобия (МП).

Существует несколько разработанных планов испытаний. В данной статье рассмотрен план $[N, U, T]$, который приведен в стандарте [1]. Согласно этому плану, одновременно испытывают N объектов, отказавшие во время испытаний объекты не восстанавливают и не заменяют, испытания прекращают по окончании времени наблюдений или достижения наработки T для каждого не отказавшего объекта. В обновленном стандарте [2], действующем в настоящее время, также существует план испытаний, подобный этому. Он называется планом, ограниченным продолжительностью наблюдений.

При проведении испытаний по плану $[N, U, T]$ формируются однократно цензурированные выборки наработок на отказ. В работе выполнены экспериментальные исследования точности оценок МП экспоненциального закона распределения по малым, однократно цензурированным справа выборкам.

Для проведения исследований разработан алгоритм и подпрограмма моделирования процесса отказов на ЭВМ, возникающих при проведении испытаний по плану $[N, U, T]$, к программе моделирования отказов оборудования и обработке полученных результатов, разработанной в [7].

Использован следующий алгоритм формирования однократно цензурированной выборки:

1. Генерируется случайная величина t , распределенная по экспоненциальному закону распределения, рассчитываемая по формуле [6]

$$z = -\frac{1}{\lambda} \ln R,$$

где R – случайная величина, равномерно распределенная на интервале $(0, 1)$.

2. Полученные случайные величины сравниваются с заданным временем проведения испытаний T . Если $t < T$ к моделируемой выборке добавляется случайная величина t , соответствующая наработке до отказа. Если $t > T$ к моделируемой выборке добавляется случайная величина T , соответствующая наработке до цензурирования.

3. Процесс моделирования продолжается до тех пор, пока число полученных случайных величин не станет равным заданному числу членов выборки N (объему выборки).

На ЭВМ моделировались однократно цензурированные справа выборки случайных величин объемом $N=5, 10, 15, 20$. Генерирование выборок выполнялось при следующих ограничениях

$$\begin{aligned} 6 \leq N < 10, q &\geq 0,5 \\ 10 \leq N < 20, q &\geq 0,3 \\ 20 \leq N \leq 50, q &\geq 0,2, \end{aligned}$$

где q – степень цензурирования выборки. Ограничения приняты в соответствии с рекомендациями [7].

Количество сформированных выборок V для каждого значения N равно 3000. По каждой выборке методом максимального правдоподобия рассчитывались оценки экспоненциального распределения и их относительные отклонения δ от истинных значений, которые использовались при генерации выборки.

$$\delta = \frac{\lambda - \lambda_{ОМП}}{\lambda}, \quad (1)$$

где λ – истинное значение параметра экспоненциального распределения,

$\lambda_{ОМП}$ – оценка максимального правдоподобия экспоненциального распределения. По результатам моделирования построены гистограммы относительных отклонений оценок максимального правдоподобия экспоненциального распределения. По оси ординат отложен процент оценок от общего количества, попавших в данный интервал. Полученные результаты приведены на рис. 1.

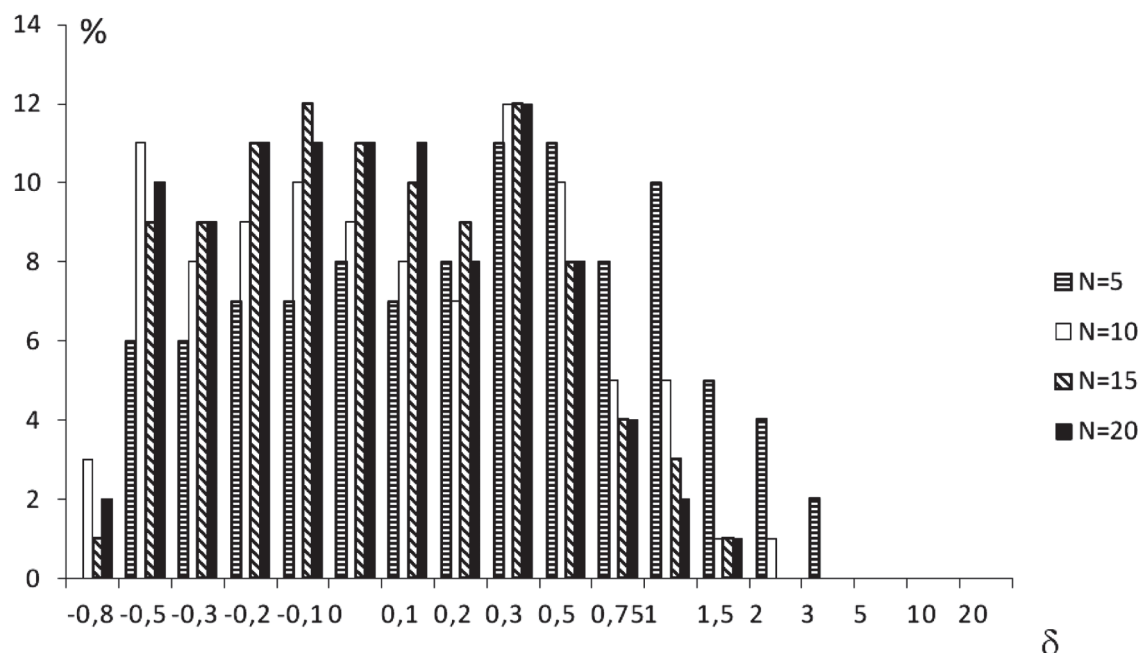


Рис. 1. Относительные отклонения оценки максимального правдоподобия

Эти экспериментальные данные показывают, что большинство оценок максимального правдоподобия, полученные по малым, однократно цензурированным справа выборкам, имеют значительные отклонения от истинных значений. Например, 2% оценок экспоненциального распределения при $N=5$ имеют относительные отклонения от 3 до 5; 4% от 2 до 3; 5% от 1,5 до 2. С увеличением объема выборки N точность оценок возрастает. При $N=20$ относительные отклонения оценок экспоненциального закона распределения не превышают 1,5. Несмотря на это, 4% оценок имеют относительные отклонения от 0,75 до 1; 8% от 0,5 до 0,75; 12% от 0,3 до 0,5.

В целом можно сделать вывод, что точность метода максимального правдоподобия при значениях $N < 20$ низка. Относительное отклонение оценок от истинных значений может достигать 5 и более, а половина всех оценок имеет отклонения больше 0,3 в зависимости от объема выборки.

В работе [7] предложена методика повышения точности оценок максимального правдоподобия по малым, многократно цензурированным выборкам, формирующимся в системе сбора информации об отказах оборудования в процессе его эксплуатации. В настоящих исследованиях осуществлялась проверка возможности применения этой методики при проведении испытаний оборудования на надежность по плану $[N, U, T]$.

Решение поставленной задачи осуществлялось в пять этапов:

1. Моделирование на ЭВМ однократно цензурированных справа выборок случайных величин, распределенных по экспоненциальному закону, характерных для плана испытаний $[N, U, T]$, и расчет параметров выборки, характеризующих ее структуру.

Для описания структуры сформированной выборки случайных величин в работе использовались стандартные параметры и их производные:

- степень цензурирования

$$X_1 = q = \frac{k}{N},$$

где k – число полных случайных величин, N – число членов выборки.

- коэффициент вариации

$$X_2 = \frac{S}{\bar{Z}},$$

где S – оценка среднеквадратического отклонения всех случайных величин в выборке;
 $\bar{Z}$ – математическое ожидание всех членов выборки.

- коэффициент вариации полных случайных величин

$$X_3 = \frac{S_{II}}{\bar{Z}},$$

где S_{II} – оценка среднеквадратического отклонения полных случайных величин.

- эмпирический коэффициент асимметрии [4]

$$X_4 = \tilde{A} = \frac{(\overline{z - \bar{Z}})^3}{\left(\sqrt{(\overline{z - \bar{Z}})^2} \right)^3}.$$

- коэффициент эксцесса

$$X_5 = \tilde{E} = \frac{\tilde{\mu}^4}{S^4} - 3,$$

где $\tilde{\mu}^4$ – центральный момент четвертого порядка.

Еще пять параметров представляют собой математические выражения, составленные из стандартных характеристик выборки:

- отношение математического ожидания полных случайных величин к математическому ожиданию всех членов выборки

$$X_6 = \frac{\bar{Z}_{II}}{\bar{Z}}.$$

- отношение математического ожидания цензурированных случайных величин к математическому ожиданию всех членов выборки

$$X_7 = \frac{\bar{Z}_{II}}{\bar{Z}}.$$

- относительное отклонение матожидания от середины вариационного размаха

$$X_8 = \frac{\frac{R}{2} - \bar{Z}}{\bar{Z}},$$

где $R = Z_{\max} - Z_{\min}$ – вариационный размах,
 $Z_{\max}, Z_{\min}$ – соответственно максимальное и минимальное значение случайной величины.

- отношение медианы к математическому ожиданию случайных величин

$$X_9 = \frac{\tilde{M}_e}{\bar{Z}},$$

где $\tilde{M}_e$ – медиана.

- отношение моды к математическому ожиданию

$$X_{10} = \frac{\tilde{M}_o}{\bar{Z}},$$

где $\tilde{M}_o$ – мода.

Все параметры измеряются в относительных единицах и не зависят от абсолютных значений случайных величин. Это позволит применять полученные уравнения к оборудованию со средними наработками на отказ разной величины.

2. Расчет оценок максимального правдоподобия.

3. Расчет зависимого параметра регрессионной модели – отклонение оценки максимального правдоподобия от истинного значения по формуле

$$Y = \frac{\lambda}{\lambda_{ОМП}}.$$

4. Построение регрессионных зависимостей. В результате исследований построены регрессионные математические модели, устанавливающие связь между отклонением оценки МП от истинного значения и параметрами, характеризующими структуру выборки. Для каждого объема выборки N построено свое уравнение регрессии.

Математические модели построены в классе линейных уравнений регрессии вида

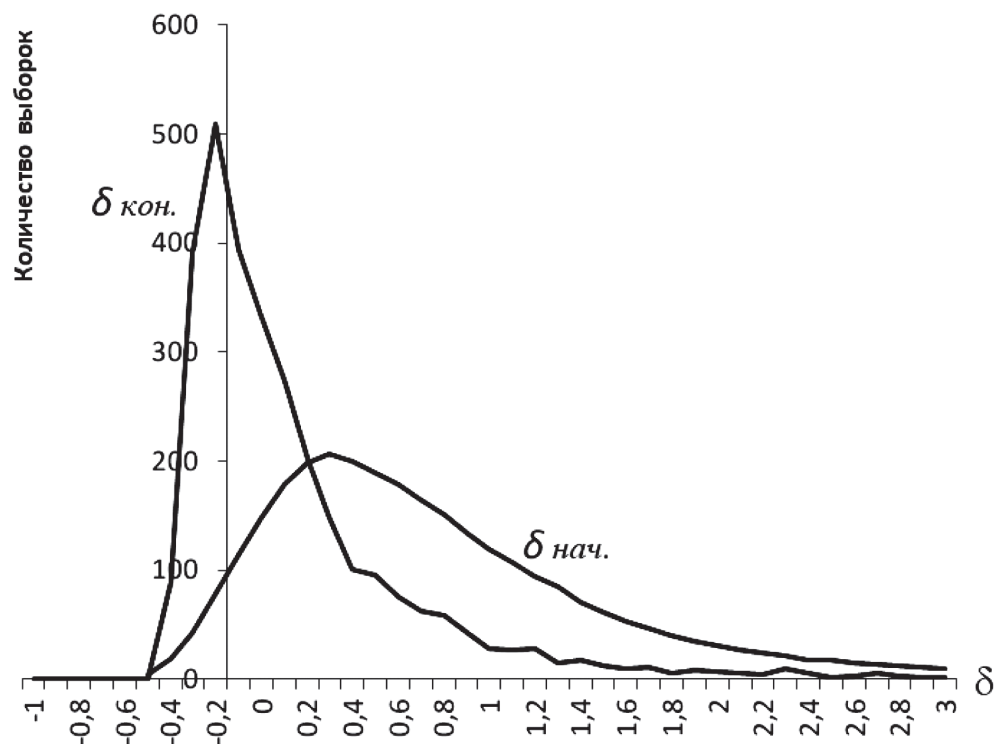
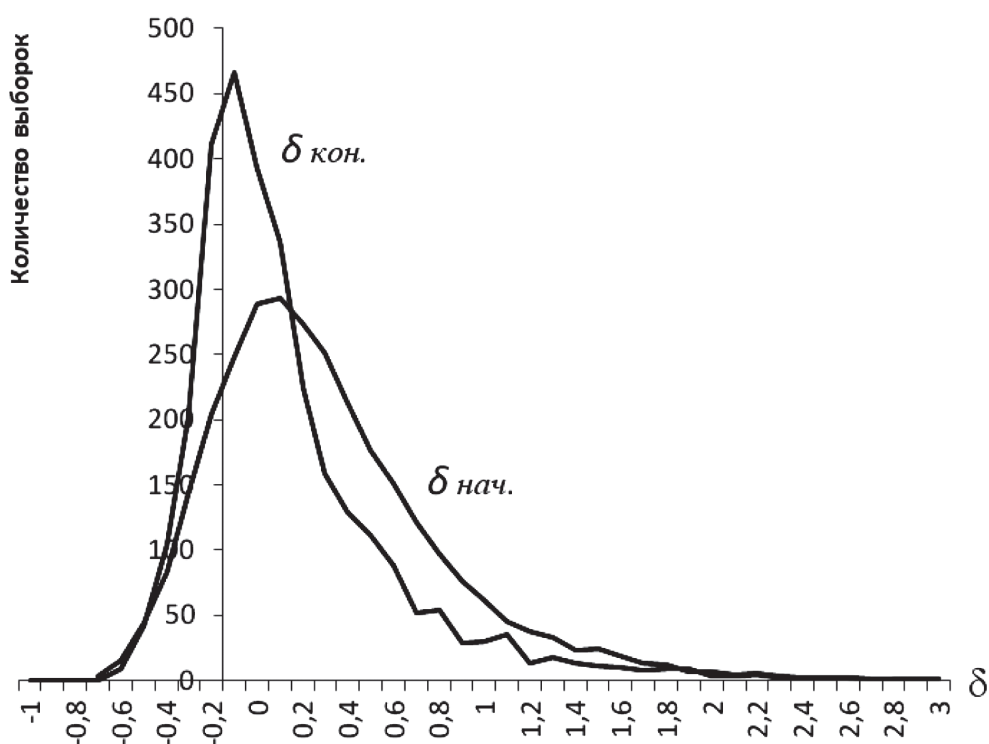
$$\bar{y}(x) = b_0 + b_1 x_1 + \dots + b_{10} x_{10}. \quad (2)$$

Полученные уравнения регрессии позволяют повысить точность оценки максимального правдоподобия введением к оценке МП поправки $\bar{y}(x)$ по формуле

$$\lambda_{кон} = \lambda_{ОМП} \cdot \bar{y}(x), \quad (3)$$

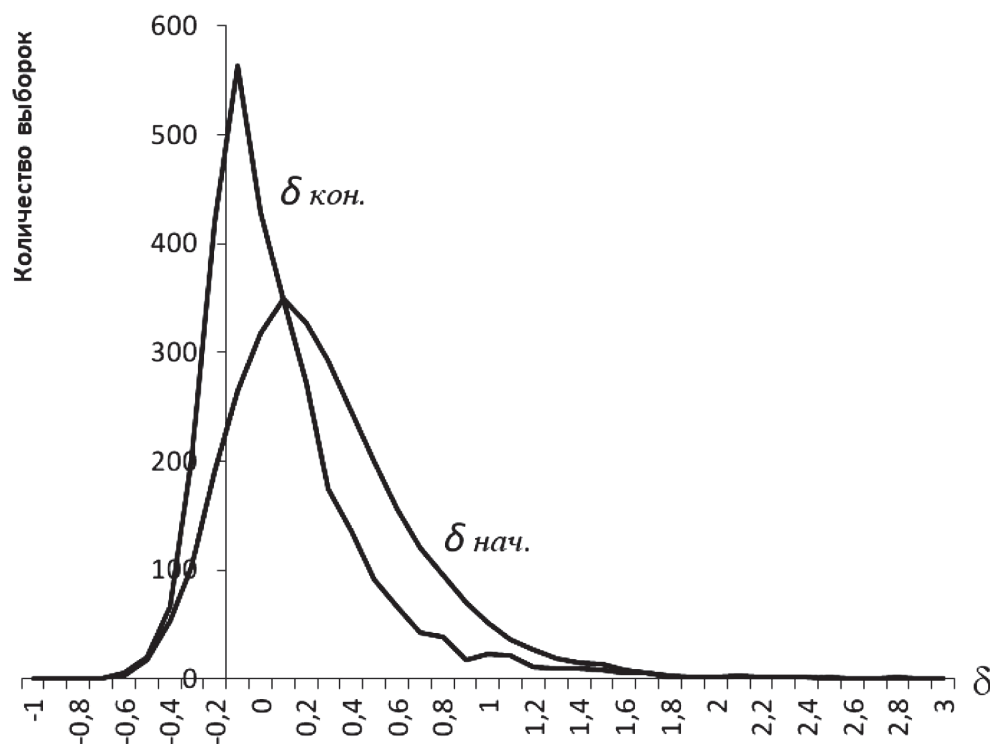
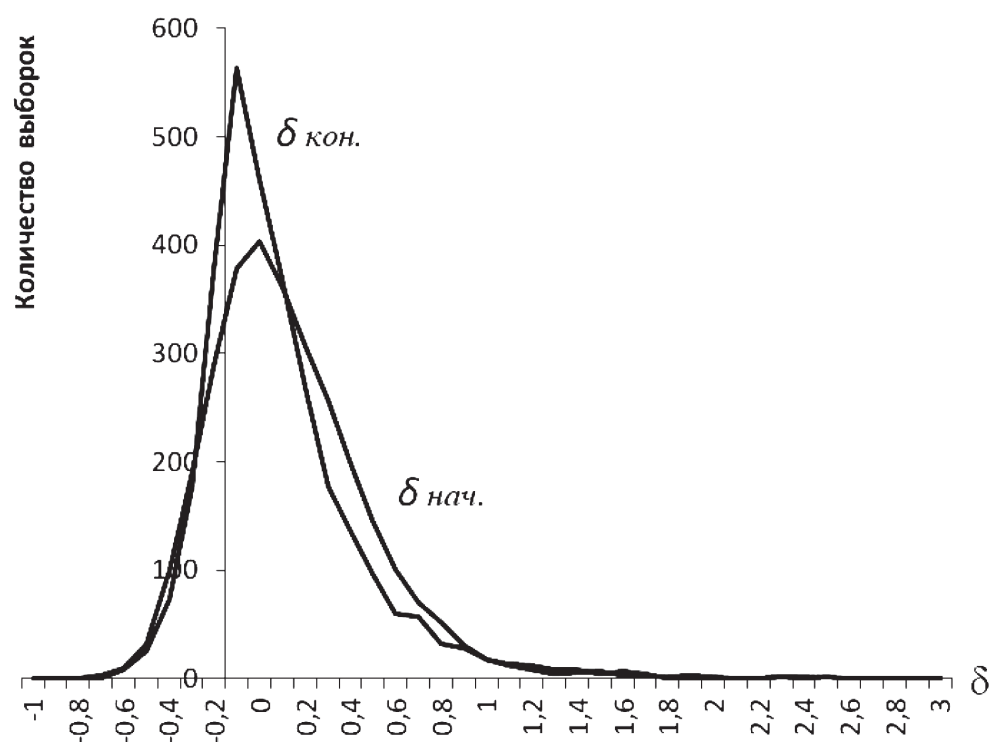
где $\lambda_{кон}$ – конечная оценка параметра распределения.

5. В исследованиях была проведена оценка эффективности построенных уравнений регрессии. Для каждой сгенерированной выборки по уравнениям регрессии (2) были рассчитаны поправки к оценке МП и конечная оценка параметра распределения по выражению (3).

Рис. 2. Начальные и конечные отклонения оценок МП для $N=5$ Рис. 3. Начальные и конечные отклонения оценок МП для $N=10$

Результаты исследований эффективности применения построенных уравнений регрессии для экспоненциального закона распределения показаны на рис. 2 – рис.5.

Графики, приведенные на рис.2 – рис.5 показывают, что точность оценок МП после применения разработанных моделей и введения поправки значительно возрастает. После введения поправки, относительные отклонения оценок от истинного значения параметров распределения, в зависимости от объема выборки N , не превышают 0,3-0,5, в то время как начальные отклонения при малых зна-

Рис. 4. Начальные и конечные отклонения оценок МП для $N=15$ Рис. 5. Начальные и конечные отклонения оценок МП для $N=20$

чениях N могут быть больше 3. Наибольший эффект от введения поправок оценкам максимального правдоподобия экспоненциального распределения достигается при числе членов выборки $N=5$. Окончательно можно сделать вывод о том, что введение поправок позволяет повысить точность оценок максимального правдоподобия, в зависимости от объема выборки, в 1,5-3 раза.

Для расчета показателей надежности электрооборудования с применением предложенной методики разработано программное обеспечение для ЭВМ.

Литература

1. ГОСТ 27.410–87. Надежность в технике. Методы контроля показателей надежности и планы контрольных испытаний на надежность. М.: Издательство стандартов, 1987. 79 с.
2. ГОСТ 27.402–95. Планы испытаний для контроля средней наработки до отказа (на отказ). Часть 1. Экспоненциальное распределение. М.: Издательство стандартов, 2002. 41 с.
3. **Баталова З.Г., Благовещенский Ю.Н.** О точности оценок ресурсов элементов изделий методом максимума правдоподобия при случайном усечении длительностей наблюдений // Надежность и контроль качества. 1979. № 9. с.12-20.
4. **Бурдасов Е.И., Зарифьянц И.Д., Дворникова Н.Н.** Об оценке параметров нормального распределения по случайно цензурированной выборке // Надежность и контроль качества. 1978. № 6. С.10-16.
5. **Бурдасов Е.И., Зарифьянц И.Д., Дворникова Н.Н., Аронов И.З.** Исследование оценок параметров распределений при анализе результатов незавершенных испытаний.// Надежность и контроль качества. 1980. № 12. с.47-55.
6. **Петрович М.Л., Давидович М.И.** Статистическое оценивание и проверка гипотез на ЭВМ. М.: Финансы и статистика, 1989.189 с.
7. **Русин А.Ю.** Имитационное моделирование процессов возникновения отказов электрооборудования с целью повышения эффективности системы технического обслуживания и ремонта. Дисс. на соиск. канд. техн. наук. Тверь: ТГТУ, 1999. 214 с.



Rusin A. Yu., Abdulhameed M.

EQUIPMENT DEPENDABILITY TEST MANAGEMENT

A higher economic efficiency of equipment dependability testing can be achieved by means of reduced testing time or smaller quantity of test samples. The reduction of testing time increases sample censoring, while a lower quantity of test samples decreases the volume of equipment operating times sample. Test parameters may be reduced only if information processing methods ensure the validity of the calculated dependability indicators.

As the result of the tests, small censored samples of equipment mean times to failure are generated. Dependability calculation using such samples is performed through the maximum likelihood method. The article presents the findings of experimental studies of precision of maximum likelihood parameter estimation of exponential law over small singly right censored samples. The studies were performed by means of computer simulation of censored samples similar to those generated as the result of equipment dependability testing. These experimental data show that most maximum likelihood estimates obtained over small singly right censored samples have significant deviations from true values.

This paper features regression models establishing dependence between deviation of maximum likelihood estimates from true values and parameters defining the sample structure. They allow calculating and introducing corrections to maximum likelihood estimates. Experimental studies of their application efficiency were conducted. The accuracy of maximum likelihood estimates significantly increased upon application of the developed models and correction of maximum likelihood estimates. Software for application of regression models was developed.

Keywords: computer simulation, information processing, equipment testing, dependability, censored samples, maximum likelihood method.

Dependability parameters are controlled at all stages of equipment design and operation. To evaluate the dependability parameters of newly developed equipment its is put to tests.

The optimization of equipment dependability testing system is aimed at reducing the associated costs. One of the ways to reduce the costs is shortening the testing time. If test samples are expensive, a lower cost can be achieved through reduction of their number.

As a result of testing, samples of times to failure of the tested equipment are generated. Shorter testing times and reduced number of samples result in small right censored samples of times to failures.

The method of maximum likelihood is the primary mathematical method used for parametric estimation of dependability over right censored samples.

In the context of reduced testing time and number of tested items, validation study of the maximum likelihood (ML) estimates is becoming more relevant.

A number of fully developed testing plans exist. This paper examines the $[N, U, T]$ plan that is presented in standard [1]. According to this plan, N objects are tested simultaneously. The objects that failed during the test are neither recovered nor replaced. The tests are stopped upon the expiry of the observation time or achievement of time to failure T for each of the nonfailed objects. The more recent and currently valid standard [2] also describes a similar test plan. It is called an observation time-limited plan.

Tests performed as per plan $[N, U, T]$ generate singly censored samples of times to failure. This paper presents the findings of experimental studies of ML accuracy estimation of exponential distribution law over small singly right censored samples.

For the purpose of the research, an algorithm and subroutine for simulation of computer failures that occur during tests as per plan $[N, U, T]$ were developed and included in the software for equipment failure simulation and data processing that is described in [7].

The following algorithm of singly censored samples was used:

1. A random variables t distributed according to an exponential distribution law calculated using formula [6] was generated

$$z = -\frac{1}{\lambda} \ln R,$$

where R is a random variable uniformly distributed over the interval $(0,1)$.

2. The obtained random variables are compared with the specified testing time T . If $t > T$, the random variable t corresponding to the time to failure is added to the simulated sample. If $t > T$, the random variable T corresponding to the time to censoring is added to the simulated sample.

3. Simulation process continues until the number of obtained random variables becomes equal to the specified number of sample members N (sample size).

Singly right censored samples of random variables with size $N = 5, 10, 15, 20$ were computer-simulated. Generation of samples was performed under the following restrictions:

$$\begin{aligned} 6 \leq N < 10, q &\geq 0,5 \\ 10 \leq N < 20, q &\geq 0,3 \\ 20 \leq N \leq 50, q &\geq 0,2, \end{aligned}$$

where q is the degree of sample censoring. Restrictions were adopted as per the recommendations of [7].

The number of generated samples V for each variable N is 3000. For each sample, through the method of maximum likelihood, exponential distributions and their relative deviations δ from the true values that are used in sample generation were estimated

$$\delta = \frac{\lambda - \lambda_{OML}}{\lambda}, \quad (1)$$

where λ is the true value of exponential distribution,

λ_{OML} is the maximum likelihood estimate of the exponential distribution.

The results of the simulation are reflected in histograms of relative deviations of maximum likelihood estimates of the exponential distribution. The Y axis shows the percentage of estimates from the total number caught in the given interval. The results are shown in fig. 1.

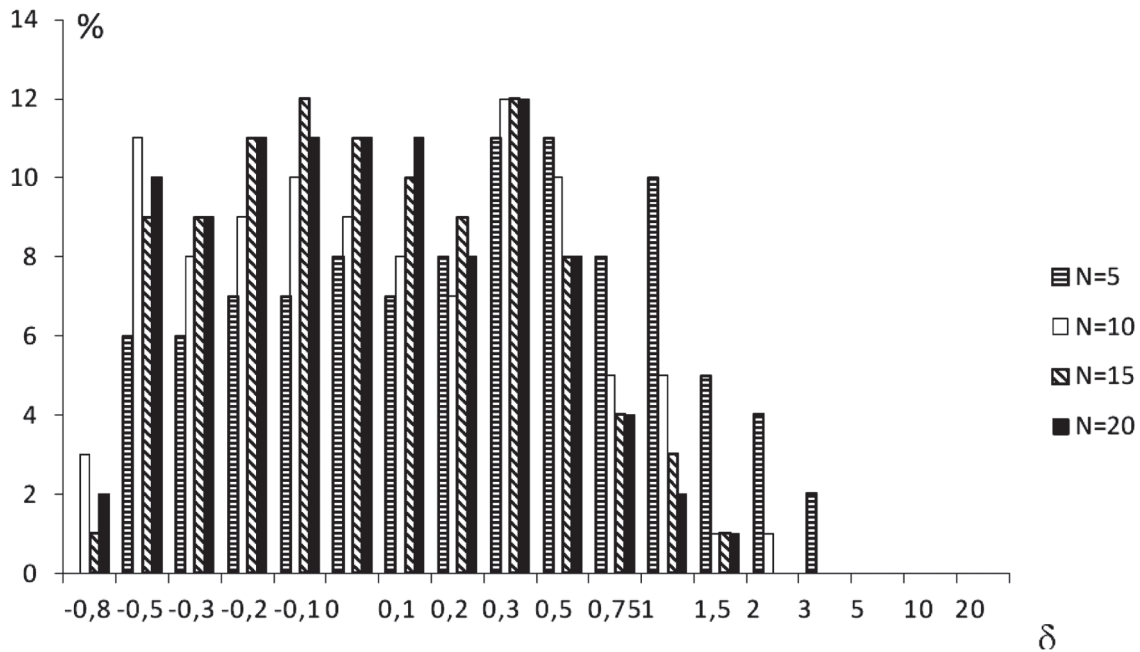


Fig. 1. Relative deviations of the maximum likelihood estimate

These experimental data show that the majority of the maximum likelihood estimates obtained from small, singly right censored samples have significant deviations from the true values. For example, 2 % of the exponential distribution estimates for $N = 5$ show relative deviations from 3 to 5; 4 % from 2 up to 3; 5 % from 1,5 up to 2. As sample size N increases the accuracy of estimations improves. For $N=20$ the relative deviations of exponential distribution law estimations do not exceed 1,5. Despite that 4 % of estimations show relative deviations from 0,75 to 1; 8 % from 0,5 to 0,75; 12 % from 0,3 to 0,5.

It can be concluded that the accuracy of the maximum likelihood method for variables $N < 20$ is low. The relative deviation of estimates from the true values can be 5 or higher, while half of all estimates show deviations above 0,3 depending on the sample size.

Paper [7] suggests a technique to improve the accuracy of the maximum likelihood estimates for small multicensored samples generated in the equipment failure data collection system in the course of its operation. The described studies were aimed to verify the applicability of this method in equipment dependability tests as per plan $[N, U, T]$.

The task was solved in five stages:

1. Computer simulation of singly right censored samples of random variables distributed exponentially typical to test plan $[N, U, T]$ and the calculation of sample parameters defining its structure.

The structure of the generated sample of random variables was described using standard parameters and their derivatives:

- the degree of censoring

$$X_1 = q = \frac{k}{N},$$

where k is the number of complete random variables, N is the number of sample members.

- coefficient of variation

$$X_2 = \frac{S}{\bar{Z}},$$

where S is the estimation of the mean-square deviation of all random variables in the sample;
 $\bar{Z}$ is the mathematical expectation of all members in the sample.

- coefficient of variation of complete random variables

$$X_3 = \frac{S_H}{\bar{Z}},$$

where S_H is the estimation of the mean-square deviation of random variables.

- empirical coefficient of skewness [4]

$$X_4 = \tilde{A} = \frac{(\overline{z - \bar{Z}})^3}{\left(\sqrt{(\overline{z - \bar{Z}})^2}\right)^3}.$$

- coefficient of excess

$$X_5 = \tilde{E} = \frac{\tilde{\mu}_4}{S^4} - 3,$$

where $\tilde{\mu}_4$ is the fourth central moment.

Five more parameters are mathematical expressions composed of standard sample characteristics:

- the ratio of the mathematical expectation of complete random variables to that of all members of the sample

$$X_6 = \frac{\bar{Z}_H}{\bar{Z}}.$$

- the ratio of the mathematical expectation of censored random variables to that of all members of the sample

$$X_7 = \frac{\bar{Z}_U}{\bar{Z}}.$$

- the relative departure of the mathematical expectation from the middle of the range

$$X_8 = \frac{\frac{R}{2} - \bar{Z}}{\bar{Z}},$$

where $R = Z_{\max} - Z_{\min}$ is the range, $Z_{\max}$, $Z_{\min}$ are respectively the maximum and minimum values of the random variables.

- the ratio of the median to the mathematical expectation of the random variables

$$X_9 = \frac{\tilde{M}_e}{\bar{Z}},$$

where $\tilde{M}_e$ is the median.

- the ratio of the mode to the mathematical expectation

$$X_{10} = \frac{\tilde{M}_0}{Z},$$

where $\tilde{M}_0$ is the mode.

All parameters are measured in relative units and do not depend on absolute values of random variables. That will allow applying the obtained equations to equipments with different mean time to failure values.

2. Calculation of maximum likelihood estimates.

3. Calculation of the dependent parameter of regression model, deviation of the maximum likelihood estimate from the true value using the following formula:

$$Y = \frac{\lambda}{\lambda_{OMI}},$$

4. Development of regressions. The study resulted in the generation of regression models that establish a connection between the deviation of ML estimates from the true value and the parameters defining the structure of the sample. For each sample size N , its own regression equation was designed.

Mathematical models were developed as linear regression equations as shown below:

$$\bar{y}(x) = b_0 + b_1x_1 + \dots + b_{10}x. \quad (2)$$

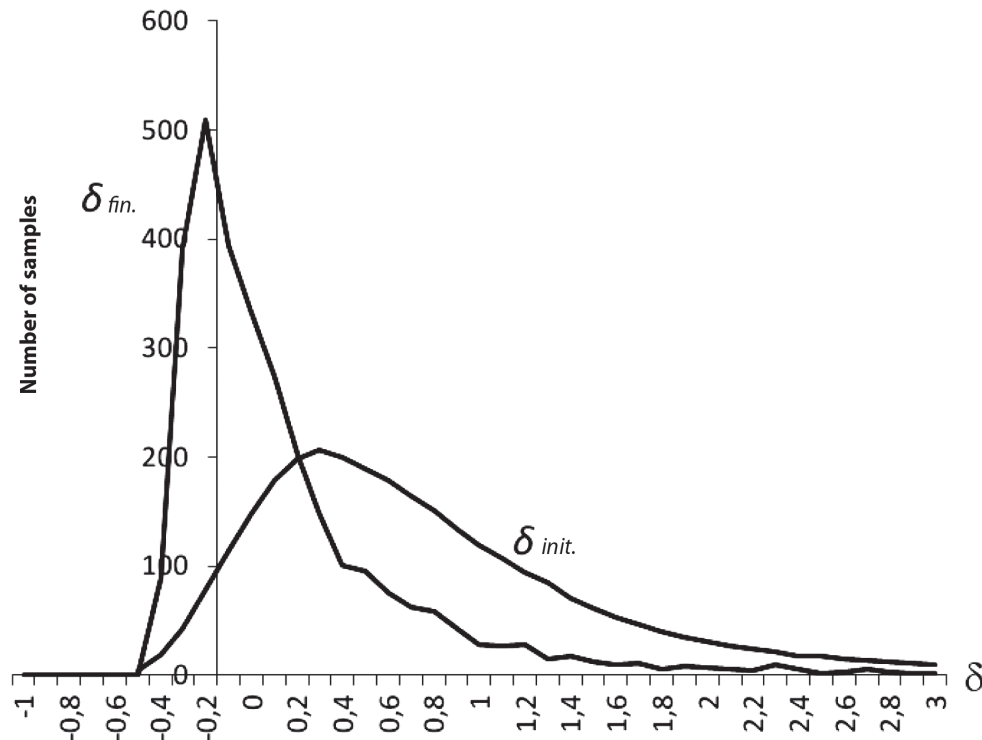


Fig. 2. Initial and final deviations of ML estimations for $N=5$

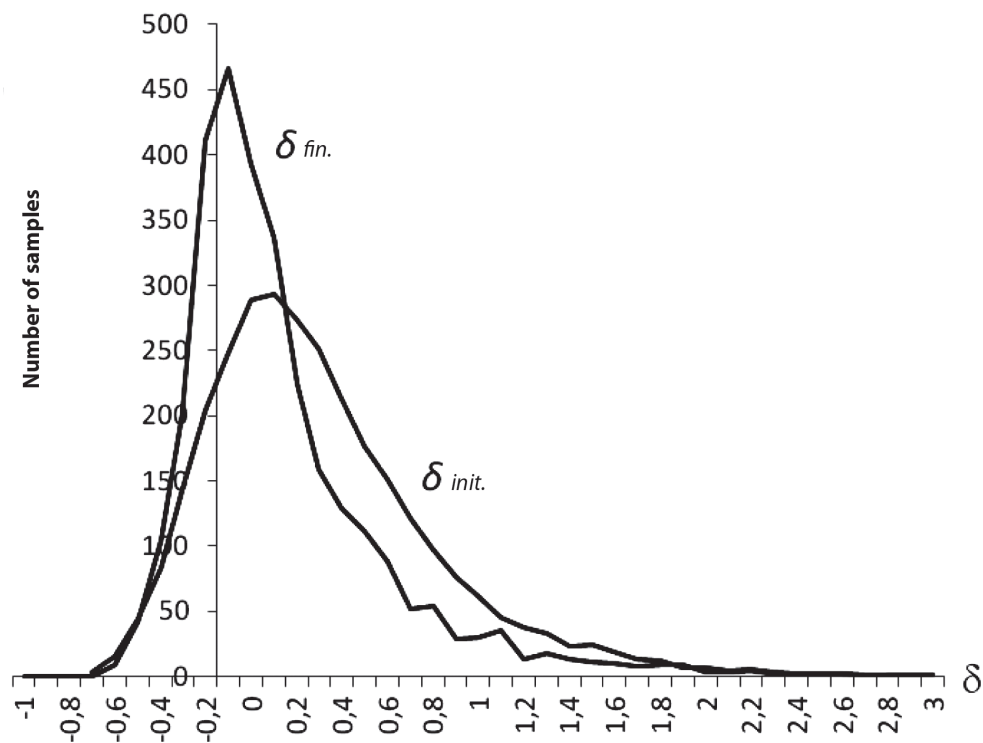


Fig. 3. Initial and final deviations of ML estimations for N=10

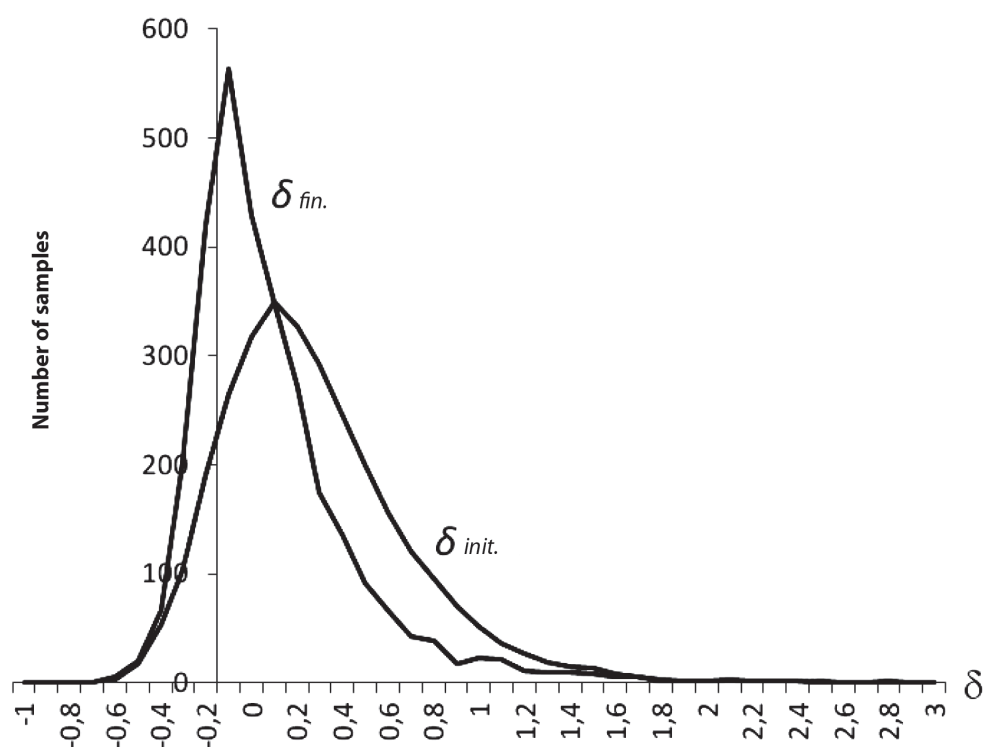


Fig. 4. Initial and final deviations of ML estimations for N=15

The resulting regression equations enable higher accuracy of maximum likelihood estimation by introducing correction data $\bar{y}(x)$ to the ML assessment using the following formula:

$$\lambda_{KOH} = \lambda_{OMI} \cdot \bar{y}(x), \quad (3)$$

where λ_{KOH} is the final estimation of the distribution parameter.

5. The effectiveness of the developed regression equations was evaluated as part of the study. For each sample generated using regression equations (2), the correction data for ML estimation and the final distribution parameter estimate were calculated using expression (3).

The results of application effectiveness study of the developed regression equations for the exponential distribution law are shown in fig. 2 – fig. 5.

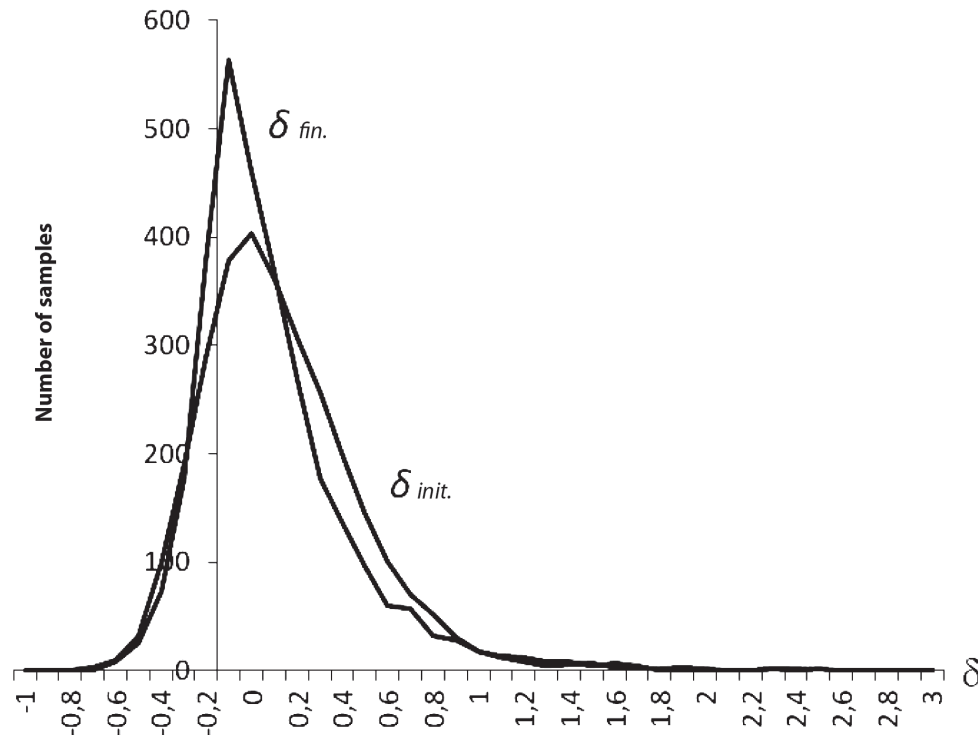


Fig. 5. Initial and final deviations of ML estimations for $N=20$

The diagrams given in fig. 2 – 6 show that the accuracy of ML estimation significantly improves with the application of the developed models and introduction of the correction data. Upon introducing the correction data, the relative deviations of estimations from true values of distribution parameters, depending on sample size N , do not exceed 0,3 – 0,5, while initial deviations at small values of N can be more than 3. The maximum effect of the correction data introduction to the maximum likelihood estimate of the exponential distribution is achieved when the number of members of the sample is $N = 5$. It can be concluded that the correction data introduction allows improving the accuracy of maximum likelihood 1,5 – 3 times depending on the sample size.

In order to ensure calculation of electrical equipment dependability using the suggested method computer software was developed.

References

1. GOST 27.410–87. Technology dependability. Dependability indices control methods and dependability control test plans. Moscow. Izdatelstvo standartov, 1987. 79 p.
2. GOST 27.402–95. Test plans for mean time to failure control. Part 1. Exponential distribution. Moscow. Izdatelstvo standartov, 2002. 41 p.

3. **Batalova Z.G., Blagoveshchensky Yu.N.** On the accuracy of product components life evaluation by means of maximum likelihood method with random truncation of observation durations. Dependability and quality control. 1979. No. 9. p.12-20.

4. **Burdasov E.I., Zarifiants I.D., Dvornikova N.N.** On the estimation of normal distribution parameters based on a randomly censored sample. Dependability and quality control. 1978. No. 6. P. 10-16.

5. **Burdasov E.I., Zarifiants I.D., Dvornikova N.N., Aronov I.Z.** A study of estimated distribution parameters as part of incomplete tests results analysis. Dependability and quality control. 1980. No. 12. p.47-55.

6. **Petrovich M.L., Davidovich M.I.** Computerized statistical estimation and hypothesis testing. Moscow. Financy i statistika, 1989. 189 p.

7. **Rusin A.Yu.** Electrical failures simulation for the purpose of improving maintenance efficiency. Candidate of Engineering thesis. Tver. TGTU, 1999. 214 p.

**Якубович Б.И.**

ФЛУКТУАЦИОННЫЙ НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ ТВЕРДЫХ МАТЕРИАЛОВ

Проанализированы экспериментальные и теоретические исследования электрических низкочастотных флуктуаций в твердых телах. Показана возможность широкого использования низкочастотных флуктуаций для неразрушающего контроля твердых материалов. Обоснована эффективность флуктуационного неразрушающего контроля твердых материалов. Отмечена перспективность применения флуктуационного неразрушающего контроля для повышения надежности электронных приборов.

Ключевые слова: флуктуации, шум, неразрушающий контроль, твердые материалы.

Усложнение современной электронной аппаратуры, увеличение ее функциональной значимости, а также необходимость работы аппаратуры при воздействии различных внешних факторов требует обеспечения высокой надежности каждого из ее элементов. Для этого необходимо обеспечить высокое качество материалов, используемых для изготовления электронной техники. Поскольку электронные приборы и устройства производятся, преимущественно, на основе твердых материалов, требуется развивать методы неразрушающего контроля твердых материалов. Для этой цели может быть применен флуктуационный неразрушающий контроль. В таком случае качество материалов оценивается по характеристикам флуктуационных процессов, протекающих в твердых телах. Наиболее эффективно применение электрических низкочастотных флуктуаций. Это связано со следующими обстоятельствами: электрические флуктуации можно довольно просто и быстро измерить. В области низких частот в различных типах твердых тел обычно доминирует один вид шума – избыточный. Его спектральные свойства хорошо изучены. Избыточный низкочастотный шум во многом связан с дефектами структуры твердых тел. Степень дефектности материала возможно оценивать по спектральным характеристикам избыточного шума. Природа электрических флуктуаций в твердых телах и вопросы применения флуктуаций для неразрушающего контроля электронных приборов рассмотрены автором в [1-3]. Далее детально рассмотрим возможности применения электрических низкочастотных флуктуаций для неразрушающего контроля твердых материалов.

Электрические флуктуации в твердых телах на низких частотах, как правило, определяются избыточным шумом, который обычно превалирует над другими типами шумов в диапазоне низких частот. Избыточным называют шум, спектральная плотность мощности которого имеет вид: $S(f) \sim 1/f^\alpha$, где α , как правило, близко к 1 (его также называют шумом $1/f$). Избыточный низко-

частотный шум широко исследуется в течение длительного времени и экспериментально достаточно хорошо изучен [1-5]. Частотная зависимость и порядок величины спектральной плотности шума известны для многих классов твердых тел и электронных устройств. Экспериментально изучены свойства избыточного шума в большом числе разнообразных объектов. Происхождение избыточного шума связывается с дефектами структуры твердых тел. На это указывают результаты многочисленных исследований, их обзор приведен в [1-5]. Рассмотрим экспериментальные и теоретические исследования, демонстрирующие связь избыточного шума с дефектами структуры твердых тел.

Получены многочисленные разноплановые экспериментальные результаты, показывающие связь избыточного низкочастотного шума с дефектами структуры твердых тел. Рассмотрим наиболее значительные из них. Наиболее ранние результаты в этом направлении [6-8] показали, что пластические деформации твердых тел, вызванные давлением и высокой температурой, усиливают избыточный шум. Впоследствии было получено большое количество аргументов, свидетельствующих о влиянии дефектов структуры твердых тел на свойства электрического низкочастотного шума. Рассмотрим основные результаты таких исследований для различных типов твердых тел.

В металлах одним из убедительных аргументов связи механизма формирования избыточного шума с дефектами структуры является зависимость шума от механических деформаций. В пленках различных металлов – свинца, олова, платины, золота, серебра – обнаружено увеличение избыточного шума приблизительно на порядок величины при их деформации [9]. После снятия деформаций уровень шума в пленках снижался, но оставался выше первоначального. Обнаруженные эффекты могут быть связаны с образованием и аннигиляцией микродефектов структуры. Результаты изучения зависимости спектральной плотности шума от механических напряжений в области упругой деформации для пленок хрома приведены в [10]. С увеличением растягивающих напряжений наблюдается обратимое возрастание интенсивности низкочастотного шума. Такое поведение может быть объяснено тем, что с ростом растягивающих напряжений увеличивается расстояние между атомами, вследствие этого уменьшается энергия активации образования вакансий, и увеличивается концентрация дефектов данного типа. Воздействие пластических деформаций на пленки хрома приводит к тому, что после снятия нагрузки уровень избыточного шума оказывается выше исходного [10]. Это может быть объяснено появлением дополнительных микродефектов вследствие пластических деформаций.

Известно, что важным фактором структурной неравновесности вакуумных конденсатов являются собственные макронапряжения. Исследовались зависимости избыточного шума от внутренних механических напряжений в тонких алюминиевых пленках, полученных методом термического испарения в вакууме [11,12]. В результате установлено, что при увеличении уровня макронапряжений возрастает величина спектральной плотности шума. Растягивающие напряжения, как известно, увеличивают концентрацию вакансий, чем и объясняется повышение уровня избыточного шума [12]. Установлено также возрастание показателя степени частоты при увеличении как положительных, так и отрицательных напряжений. Наблюдаемое увеличение показателя формы спектра с ростом механических напряжений указывает на то, что при этом увеличивается вклад нестационарных механизмов возникновения шума. Аналогичные результаты были установлены для пленок хрома. Из приведенных в [13] экспериментальных результатов следует, что в пленках хрома существует связь между уровнем и характером избыточного шума и величиной внутренних механических напряжений. При этом в пленках с большими внутренними напряжениями наблюдается и более высокий уровень низкочастотного шума. Причем показатель формы спектра больше для пленок с более высокими значениями внутренних напряжений. Экспериментальное изучение связи избыточного шума с механическими напряжениями в металлических пленках по-

казало, что зависимость спектральной плотности шума от механических напряжений для пленок алюминия, молибдена и тантала [12,14,15] подчиняется экспоненциальному закону. Возрастание спектральной плотности шума с увеличением напряжений может быть объяснено интенсивным ростом концентрации дефектов в пленке при достаточно больших механических напряжениях. Это подтверждается тем, что при растягивающих деформациях электрическое сопротивление пленки обратимо возрастает.

Установлена связь мощности избыточного шума со структурными факторами металлов. При исследовании тонких алюминиевых пленок было обнаружено [12], что спектральная плотность избыточного шума возрастает с увеличением скорости конденсации пленок, причем этот результат наблюдался при осаждении на подложки, обладающие существенно различными физическими свойствами. Вместе с тем было выяснено, что различная технология получения пленок (разная скорость осаждения алюминия) влияет на их структуру. Исследования микроструктуры образцов алюминия показали, что большей поверхностной плотности зерен соответствует большая величина спектральной плотности шума. Подобные закономерности были установлены для пленок хрома, молибдена [10] и серебра [16]. Таким образом, установлено, что диспергирование кристаллитов приводит к повышению уровня шума. При исследовании пленок хрома обнаружено, что интенсивность избыточного шума зависит от концентрации вакансий внутри зерен. Отмеченные факты показывают связь избыточного шума со структурными факторами.

Влияние отжига на избыточный шум экспериментально исследовано в пленках алюминия [11,17] и хрома [18]. Проводились измерения уровня шума до и после отжига дефектов. Показано, что в результате отжига, приводящего к уменьшению дефектности структуры, избыточный шум пленок снижался. Изучение влияния отжига наведенных дефектов на интенсивность низкочастотного шума алюминиевых пленок проведено в [19,20]. Дефекты в пленках создавались в результате облучения электронами. После облучения наблюдалось значительное увеличение интенсивности шума. Отжиг дефектов приводил к восстановлению уровня низкочастотного шума. В работе [21] при изучении влияния отжига на избыточный шум металлических пленок получены результаты, свидетельствующие в пользу того, что шум вызван движением дефектов структуры. Исследования избыточного шума в большом числе пленок различных металлов [22] показали, что с увеличением плотности примесей и дефектов в пленке, шум возрастает. Установлено, что облучение пленок меди потоками электронов приводит к увеличению спектральной плотности избыточного шума более чем на порядок. В [23] обнаружено, что радиационные повреждения пленок меди, легированных индием, вызывают увеличение избыточного шума. В [24] изучено влияние γ -излучения на избыточный шум пленок ниобия. Воздействие γ -излучения приводит к появлению дополнительных дефектов в кристаллической решетке. После облучения избыточный шум пленок возрастает. Отмеченные результаты свидетельствуют об определяющей роли дефектов структуры металлов в формировании избыточного шума.

Имеются многочисленные экспериментальные факты, позволяющие связать избыточный низкочастотный шум со структурными дефектами в полупроводниках. Рассмотрим такие результаты. Исследование влияния на избыточный шум контролируемо вводимых дислокаций в кремний показало следующее. В работе [25] установлено, что введение дислокаций вызывает возрастание уровня шума. При этом увеличение шума существенно зависит от температуры. В [26] введение дислокаций приводило к серьезному росту интенсивности избыточного шума, причем интенсивность шума монотонно возрастала с увеличением плотности дислокаций. Влияние дефектов на шум показано в экспериментах, где структурные несовершенства вводятся методом ионной имплантации. В работах [27,28] установлено, что структурные нарушения, вызванные ионной им-

плантацией, приводят к значительному увеличению избыточного шума в кремнии. Последующий отжиг, восстанавливающий структурное совершенство материала, вызывает снижение шума.

Обнаружено [29], что ультразвуковая обработка эпитаксиальных образцов GaAs вызывает рост интенсивности низкочастотного шума. Получен ряд результатов, показывающих связь избыточного низкочастотного шума в полупроводниках со структурными дефектами, возникающими при сильном (деструктивном) сжатии. Нарушения решетки полупроводников, возникающие в ходе деструктивного сжатия, качественно изучены достаточно хорошо [30,31]. Различными методами изучения структуры твердых тел показано, что воздействие на полупроводниковые материалы механических нагрузок приводит к образованию дислокаций, дисклинаций, вакансий и кластеров вакансий, других типов дефектов. В [32] приведены результаты, свидетельствующие о влиянии деструктивного сжатия на избыточный шум в GaAs. Установлено, что по мере нарастания деструкции возрастает интенсивность низкочастотного шума. Наблюдалось увеличение интенсивности шума, достигающее двух порядков. Вследствие воздействия механических нагрузок наблюдается некоторое изменение формы спектра шума, связанное с изменением показателя степени частоты. Обнаружено, что при деструктивном сжатии уровень избыточного шума возрастает в такой же степени, как и концентрация локальных уровней, обусловленных структурными дефектами. При изучении избыточного шума в кремнии обнаружено, что с понижением степени структурного совершенства материала интенсивность шума возрастает [33]. Отмеченные обстоятельства указывают на связь избыточного шума в полупроводниках со структурными дефектами.

Обнаружено возрастание низкочастотного шума в полупроводниках под воздействием излучения оптического диапазона. В [34] наблюдался эффект перестройки спектра низкочастотного шума в GaAs под действием света. При этом установлено, что в области низких температур воздействие освещения приводит к существенному увеличению уровня шума. Дано объяснение данного явления, связанное с тем, что освещение значительно изменяет концентрацию неосновных носителей, которые, захватываясь на разрешенные уровни в запрещенной зоне, способны сильно повлиять на зарядовое состояние ловушечных центров и, следовательно, на интенсивность и спектр низкочастотных шумов. В работе [35] исследовано влияние лазерного излучения на избыточный шум в кристаллах $Cd_xHg_{1-x}Te$. Установлено, что с увеличением энергии облучения возрастает интенсивность шума. В соответствии с этим делается вывод о том, что более высокий уровень шума соответствует повышенному количеству дефектов. Это дополнительно подтверждается результатами работы [36], в которой показано, что дефекты являются причиной избыточного шума в таких материалах. Обнаруженный характер влияния оптического излучения на избыточный шум в полупроводниках также указывает на связь шума с дефектами структуры.

Важным свидетельством в пользу того, что происхождение избыточного шума связано с дефектами структуры, является зависимость его свойств от состояния поверхности. На поверхности материала особенно много дефектов, поскольку она является границей раздела объем-среда, и, следовательно, на ней из-за конечности геометрических размеров образца сосредоточено большое количество оборванных электронных связей. Кроме того, часть этих связей может заполняться за счет присоединения атомов химически активных веществ из атмосферы, что приводит к химическим реакциям на поверхности. При изучении избыточного шума германиевых нитей [37] было обнаружено, что при замене окружающего сухого азота жидким CCl_4 шум значительно увеличивается, причем это сопровождается изменением частотной зависимости спектра. В других исследованиях было установлено [38], что влажная атмосфера может усиливать избыточный шум на несколько порядков.

Установлено, что уровень избыточного шума связан с адсорбцией и хемосорбцией веществ поверхностью материалов. Подобное явление наблюдается в электронных лампах и полупроводниковых структурах. Обзор таких работ приведен в [39].

В [40] была установлена корреляция избыточных шумов поверхностно-барьерных переходов с плотностью дислокаций, что также подтверждает влияние дефектов структуры на свойства избыточных шумов.

Получен ряд экспериментальных результатов, свидетельствующих о связи низкочастотного шума в диэлектриках с дефектами структуры. В работах [41-47] исследован электрический низкочастотный шум в полимерных диэлектрических пленках. Установлена хорошая корреляция между уровнем избыточного шума и электрической прочностью полимерных диэлектрических пленок [41,42]. Известно, что электрическая прочность диэлектриков связана с их дефектностью. Показано, что длительное влияние переменного электрического поля на диэлектрические пленки вызывает обратимое увеличение шума, и, вследствие такого увеличения, усиливается корреляция между уровнем шума и электрической прочностью [43]. Изучено влияние повреждающих воздействий на низкочастотный шум пленок [44,46,47]. Установлено необратимое возрастание избыточного шума диэлектрических пленок в результате воздействия на них сильных (деструктивных) электрических полей, которое указывает на связь шума с дефектностью пленок [44,46].

Разработаны разнообразные теоретические модели, в соответствии с которыми причиной возникновения избыточного низкочастотного шума являются дефекты структуры твердых тел. Подобные модели объясняют происхождение избыточного шума в твердых телах различных типов. Рассмотрим наиболее значительные подходы объяснения избыточного шума с таких позиций.

Рассмотрим избыточный низкочастотный шум в полупроводниках. Имеются многочисленные теоретические модели, связывающие его происхождение с дефектами структуры полупроводников. Большая группа моделей связывает избыточный шум в полупроводниках с захватом и эмиссией носителей заряда ловушками. В этом случае суть объяснения избыточного шума заключается в следующем. Дефекты могут образовывать разрешенные уровни в запрещенной зоне полупроводника (ловушки). Захват носителей заряда на ловушки вызывает флуктуации числа свободных носителей, вследствие которых возникают флуктуации проводимости образца, что является причиной электрического шума. Если считать, что имеет место равномерное распределение вероятности изменения зарядового состояния ловушки, то спектр флуктуаций, вызванных одной ловушкой, имеет вид лоренцевского спектра. В полупроводнике имеется совокупность ловушек с различными постоянными времени τ . Считается, что ловушки являются независимыми. Спектр флуктуаций числа свободных носителей в полупроводнике описывается формулой

$$S(f) \sim \int_{\tau_1}^{\tau_2} \frac{\tau g(\tau)}{1 + 4\pi^2 f^2 \tau^2} d\tau, \quad (1)$$

где $g(\tau)$ – плотность распределения постоянных времени. При условии $g(\tau) \sim 1/\tau$ в диапазоне частот $\frac{1}{2\pi f \tau_2} \ll f \ll \frac{1}{2\pi f \tau_1}$ спектр флуктуаций изменяется по закону: $S(f) \sim 1/f$. Таким обра-

зом, дается объяснение избыточного шума за счет процессов захвата и эмиссии носителей заряда на ловушках. Формирование шума со спектром типа $1/f$ основано на суперпозиции процессов на ловушках, имеющих широкое распределение постоянных времени. Конкретные физические механизмы, позволяющие дать такое объяснение избыточного шума, могут быть связаны как с

активационным, так и туннельным переходом носителей в связанные состояния на ловушки. Широкий обзор подобных теоретических моделей сделан в [2-4]. Сейчас направление, связывающее объяснение избыточного шума с захватом носителей ловушками представляется наиболее важным для полупроводников.

Электрические флуктуации в полупроводниках, вызванные захватом и эмиссией носителей заряда дефектами структуры, в более общем виде рассмотрены автором [2,3,48,49]. Проанализирован флуктуационный процесс, когда вероятность захвата носителя на ловушку статистически связана со временем нахождения ловушки в незаполненном состоянии, а вероятность эмиссии носителя статистически связана со временем его нахождения в связанном состоянии на ловушке; статистические связи заданы в общем виде. В итоге получено следующее выражение для спектра низкочастотного шума в полупроводнике, вызванного ловушками:

$$\frac{S(f)}{I^2} = \frac{v}{NV} \sum_{i=1}^l \frac{\sigma_i N_i}{1 + \frac{1}{g_i} e^{-\left(\frac{E_i - E_F}{kT}\right)}} \Phi_i(f), \quad (2)$$

здесь I – ток в образце, v – средняя скорость теплового движения носителей, N – число носителей в образце, V – объем образца, σ_i – эффективное сечение захвата ловушки, N_i – число ловушек каждого типа, l – число типов ловушек в образце, g_i – фактор вырождения, E_i – энергия ловушки, E_F – уровень Ферми, k – постоянная Больцмана, T – температура, $\Phi_i(f)$ – функция, определяющая зависимость спектральной плотности флуктуаций от частоты, связанная с распределениями времени нахождения ловушки в свободном и заполненном состояниях. Рассматриваемый механизм позволяет сформировать шум со спектром $1/f$.

Предложена модель избыточного шума в полупроводниках, связывающая его с флуктуациями заселенности энергетических уровней в «хвосте» функции плотности состояний, проникающем в запрещенную зону полупроводника [50]. Причиной электрического шума в рассматриваемом случае являются флуктуации концентрации свободных носителей в сильно легированных полупроводниках, вызванные обменом носителей между зоной проводимости и уровнями хвоста. К формированию хвостов плотности состояний, спадающих в глубь запрещенной зоны, приводят несовершенства структуры полупроводника: примеси, дефекты, локальные напряжения решетки и так далее. В данной модели предполагается, что сечение захвата на уровень хвоста σ_n экспоненциально убывает с ростом энергии ϵ . Постоянная времени $\tau_0(\epsilon)$ захвата на уровень с энергией ϵ :

$$\tau_0(\epsilon) \sim \frac{1}{\sigma_n(\epsilon)}, \text{ следовательно } \tau_0(\epsilon) = \tau_{00} e^{\epsilon/\epsilon_1}, \text{ где } \tau_{00} - \text{постоянная времени захвата при } \epsilon = 0, \epsilon_1 - \text{по-}$$

стоянная, характеризующая уменьшение сечения захвата с ростом энергии ϵ . Предполагалось, что хвост плотности состояний экспоненциально спадает в глубь запрещенной зоны как $\rho = \rho(0) e^{-\epsilon/\epsilon_0}$, где ρ – плотность состояний, ϵ_0 – постоянная, характеризующая скорость спада плотности состояний. В случае, когда с увеличением энергии постоянная времени τ_0 растет быстрее, чем падает плотность состояний, и температура относительно велика, в области низких частот спектральная плотность относительных флуктуаций концентрации свободных носителей (а соответственно, и относительная спектральная плотность флуктуаций сопротивления образца) имеет вид:

$$\frac{S_R(f)}{R^2} = \frac{S_n(f)}{n_0^2} \approx \frac{4N_0 e^{-\epsilon_F/\epsilon_0}}{VN_d^2 (\tau_{00} e^{\epsilon_F/\epsilon_1})^{\Gamma-1}} \frac{kT}{\epsilon_0} \frac{1}{(2\pi f)^\Gamma}, \quad (3)$$

где $N_0 = \int_0^\infty \rho(\varepsilon) d\varepsilon$, $\Gamma = 1 - \varepsilon_1 / \varepsilon_0 - \varepsilon_1 / kT$, ε_F – уровень Ферми, n_0 – равновесная концентрация

электронов, N_d – концентрация доноров, V – объем образца. При условии $\varepsilon_1 \ll \varepsilon_0$ и $\varepsilon_1 \ll kT$ спектральная плотность шума изменяется по закону $1/f$.

Избыточный шум, обусловленный флуктуациями концентрации носителей заряда, может наблюдаться в системах с прыжковым механизмом проводимости. В [51] вычислена спектральная плотность флуктуаций сопротивления слабо легированного компенсированного полупроводника в области температур, при которых проводимость носит прыжковый характер. Частота туннельных прыжков носителей между двумя примесными центрами экспоненциально зависит от расстояния между ними: $\nu(r) = \nu_0 e^{-2r/a}$, где a – эффективный боровский радиус, ν_0 – коэффициент. В связи с тем, что расстояние между примесными центрами – случайная величина, полупроводник в условиях прыжковой проводимости представляет собой неупорядоченную среду. При частотах, которые малы по сравнению с частотой прыжков носителей заряда по критической сетке (бесконечному кластеру, определяющему проводимость полупроводника) $f \ll \nu$, флуктуации проводимости связаны с флуктуациями числа носителей на критической сетке. При этом спектральная плотность шума возрастает с понижением частоты и связана с концентрацией примесей. В широком диапазоне частот спектральная плотность флуктуаций проводимости $S(f) \sim f^{-\alpha}$, где показатель $\alpha < 1$ и зависит от величины Na^3 (N – концентрация примесей). В пределе очень малых концентраций ($Na^3 \rightarrow 0$) спектральная плотность шума возрастает с понижением частоты по закону, приближающемуся к $1/f$. Однако при реалистических значениях Na^3 показатель α заметно меньше 1.

Имеются многочисленные подходы, связывающие происхождение избыточного низкочастотного шума в металлах с дефектами структуры. Среди различных типов дефектов наиболее существенное значение для металлов имеют вакансии, так как для их возникновения и миграции требуется сравнительно небольшая энергия. В связи с этим особый интерес для объяснения избыточного шума в металлах вызывают модели, связывающие шум с вакансиями. Предложены модели, в которых низкочастотный шум в металлических пленках обусловлен флуктуациями сопротивления вследствие флуктуаций числа вакансий в образце. Время жизни вакансий является случайной величиной и определяется средним расстоянием между источниками (стоками) вакансий. В модели, развитой для однородных металлов [52] стоки вакансий распределены по объему равномерно. В этом случае плотность вероятности уничтожения каждой вакансии в течение ее жизни постоянна. События рождения и уничтожения вакансий статистически независимы, а среднее время оседлой жизни

вакансий определяется соотношением: $\tau_{v0} = \tau_0 \exp\left(\frac{E_v}{kT}\right)$, здесь E_v – энергия активации образова-

ния вакансии. Спектр мощности шума, возникающего при протекании тока I_0 через однородный металлический образец со средним числом вакансий N_v , имеет следующий вид [52]:

$$S_u(f) = 4\delta R^2 I_0^2 N_v \frac{\tau_{v0}}{1 + 4\pi^2 f^2 \tau_{v0}^2}, \quad (4)$$

где R – сопротивление образца. В реальных металлических пленках вследствие неоднородного распределения стоков в образце существует большой набор времен релаксации, связанных с механизмом рождения и уничтожения вакансий, которым можно объяснить шум типа $1/f$ в широком диапазоне частот. При этом, как следует из формулы (4), уровень шума возрастает с увеличением числа вакансий.

Другим достаточно общим подходом для объяснения избыточного низкочастотного шума в металлах является концепция, связывающая шум типа $1/f$ с внутренним трением. На низких частотах внутреннее трение создается различными движениями дефектов: переориентацией, миграцией и так далее. Соответственно, низкочастотный шум, вызванный внутренним трением, может проявляться в разнообразных металлах и быть связан с дефектами их структуры. Возможность формирования спектра электрического шума типа $1/f$ за счет внутреннего трения рассмотрена в [53]. Анализировались флуктуации, вызванные случайным характером переориентации дефектов. Переориентация дефектов, симметрия которых ниже точечной симметрии кристалла, вызывает изменение рассеяния электронов на них. Вследствие этого возникают флуктуации электрического сопротивления металлов. Если имеется распределение концентрации дефектов $n(E)$ по энергиям активации E такое, что время релаксации дефектов $\tau = \tau_0 \exp(E/kT)$, тогда возникает электрический шум со спектром, близким к $1/f$, а именно:

$$\frac{S_U(f)}{U^2} \approx \frac{n(E_\omega)[l\sigma_s(E_\omega)]^2 kT}{Vf}, \quad (5)$$

$$E_\omega = kT \ln(\omega\tau_0)^{-1}$$

где σ_s – сечение рассеяния электронов дефектом, l – длина свободного пробега электрона, V – объем образца. Таким образом, данный механизм флуктуаций проводимости позволяет объяснить шум со спектром типа $1/f$ в металлических пленках.

Резюмируя экспериментальные и теоретические исследования, можно сделать следующие выводы. Результаты многочисленных исследований показывают, что избыточный низкочастотный шум связан с дефектами структуры твердых тел. Причем такие результаты получены при изучении различных типов твердых тел. Экспериментальные исследования многократно свидетельствуют о связи спектральных характеристик избыточного шума с дефектами структуры. Наиболее значительные факты следующие:

- Возрастание избыточного шума с увеличением плотности примесей и дефектов структуры;
- Усиление шума при механических деформациях как в области пластических, так и в области упругих деформаций;
- Увеличение шума вследствие воздействия проникающих излучений;
- Рост интенсивности избыточных флуктуаций в результате воздействия сильных (деструктивных) электрических полей;
- Повышение уровня шума, вызванное излучением оптического диапазона;
- Влияние ультразвуковой обработки на интенсивность флуктуаций;
- Снижение шума в результате отжига, приводящего к уменьшению дефектности структуры;
- Сильная зависимость избыточного шума от технологии получения образцов.

Разработаны теоретические модели для различных типов твердых тел, в соответствии с которыми происхождению избыточного низкочастотного шума обусловлено дефектами структуры. С позиций этих моделей удастся объяснить многие результаты экспериментального изучения шума этого типа. Совокупность экспериментальных и теоретических исследований избыточного низкочастотного шума показывает его связь с дефектами структуры и позволяет определить вид зависимостей спектральных характеристик шума от количества дефектов. Кроме того, избыточный шум может быть связан со скоростью увеличения количества дефектов [54]. Таким образом, спектр избыточного шума содержит информацию о степени дефектности твердого материала и может быть полезен для оценки скорости деградации его структуры. Следовательно, избыточный низкочастотный шум может быть эффективно использован для оценки качества твердых материалов.

Таким образом, электрические низкочастотные флуктуации возможно использовать для неразрушающего контроля твердых материалов, которые являются основой изделий электронной техники. Поэтому флуктуационный неразрушающий контроль может быть применен для повышения надежности электронных приборов и устройств. Такой метод неразрушающего контроля имеет следующие достоинства. Во многих случаях электрические низкочастотные флуктуации позволяют получить более полную информацию о дефектах структуры твердых тел, чем это возможно другими методами. Обычно избыточный шум значительно преобладает над другими типами шумов в низкочастотной области. Это позволяет надежно определять характеристики шума. Высокая чувствительность спектроскопии флуктуаций дает возможность с большой точностью измерять спектры шума. Измерения шумов можно, как правило, проводить достаточно быстро. Изложенные выше факты указывают на высокую эффективность флуктуационного неразрушающего контроля твердых материалов.

Литература

1. Якубович Б.И. Электрические флуктуации в неметаллах. – СПб.: Энергоатомиздат, 1999.
2. Якубович Б.И. Электрический шум и дефекты структуры твердых тел. – Germany: LAP Lambert Academic Publishing, 2012.
3. Якубович Б. И. Электрические флуктуации в твердых телах. – Germany: AV Akademikerverlag, 2013.
4. Kirton M.J., Uren M.J.// Adv.Phys. 1989. V.38. P.367.
5. Jones B.K.// Adv.Electron.Electron.Phys. 1993. V.87. P.201.
6. Brophy J.J.// J.Appl.Phys. 1956. V.27. P.1383.
7. Brophy J.J.// Phys.Rev. 1957. V.106. P.675.
8. Bess L.J.// Appl.Phys. 1955. V.26. P.1377.
9. Fleetwood D.M., Giordano N.// Phys.Rev.B. 1983. V.28. P.3625.
10. Жигальский Г.П.// УФН. 1997. Т.167. С.623.
11. Жигальский Г.П., Бакши И.С.// Радиотехника и электроника. 1980. Т.25. С.771.
12. Андрушко А.Ф., Бакши И.С., Жигальский Г.П. // Изв.вузов. Радиофизика. 1981. Т.24. С.498.
13. Жигальский Г.П., Куров Г.А., Сиранашвили И.Ш.// Изв.вузов. Радиофизика. 1983. Т.26. С.207.
14. Zhigalskii G.P. Proc. Int. Conf. "Noise in Physical Systems and $1/f$ Fluctuations". New York, 1993. P.81.
15. Zhigalskii G.P. Proc. Int. Conf. "Noise in Physical Systems and $1/f$ Fluctuations". Kyoto, 1991. P.39.
16. Eberhard J.W., Horn P.M.// Phys. Rev. Lett. 1977. V.39. P.643.
17. Potemkin V.V. et al. Proc. Sci. Conf. "Fluctuation Phenomena in Physical Systems". Palanga, 1991. P.79.
18. Жигальский Г.П., Федоров А.С.// Изв.вузов. Радиофизика. 1985. Т.28. С.1192.
19. Brigman J. et al. Proc. Int. Conf. "Noise in Physical Systems and $1/f$ Fluctuations". New York, 1993. P.607.
20. Dagge K. et al. Proc. Int. Conf. "Noise in Physical Systems and $1/f$ Fluctuations". Singapore, 1995. P.603.
21. Fleetwood D.M., Giordano N.// Phys.Rev.B. 1985. V.31. P.1157.
22. Scofield J.H., Mantese J.V.// Phys.Rev.B. 1985. V.32. P.736.
23. Pelz. J., Clarce J.// Phys.Rev.B. 1987. V.36. P.4479.

24. Potemkin V.V. et al. Proc. Int. Conf. "Noise in Physical Systems and $1/f$ Fluctuations". New York, 1993. P.61.
25. Yu K.K., Jordan A.G., Louqini R.L.J.// Appl.Phys. 1967. V.38. P.572.
26. Светличный А.М., Коледов Л.А., Зотов В.В. и др.// ФТП. 1980. Т.14. С.582.
27. Vandamme L.K.J., Osterhof S.J.// Appl.Phys. 1988. V.59. P.3169.
28. Clevers R.H.M.// J.Appl.Phys. 1987. V.62. P.1877.
29. Киреев О.А., Лебедев Ю.Н., Мустина Н.И. и др.// Электрон.техн. Сер. 2. Полупроводн. приб. 1986. N.1. С.66.
30. Концевой Ю.А., Литвинов Ю.М., Фаттахов Э.А.// Пластичность и прочность полупроводниковых материалов и структур. М.: Радио и связь, 1982. 240 с.
31. Алехин В.П.// Физика прочности и пластичности поверхностных слоев материалов. М.: Наука, 1983. 280 с.
32. Дьяконова Н.В., Левинштейн М.Е., Румянцев С.Л.// ФТП. 1991. Т.25. С.2065.
33. Гук Е.Г., Дьяконова Н.В., Левинштейн М.Е. и др.// ФТП. 1990, Т.24. С.813.
34. Вайнштейн С.Н., Левинштейн М.Е., Румянцев С.Л.// Письма ЖТФ. 1987. Т.13. С.645.
35. Власенко А.И., Гнатюк В.А., Копишинская Е.П. и др.// ФТП. 1997. Т.31. С.820.
36. Бакши И.С., Гринь В.Ф., Карачевцева Л.А. и др.// ФТП. 1989. Т.23. С.571.
37. Marle T.G., Bess L., Gebbie H.A.// J.Appl.Phys. 1955. V.26. P.490.
38. Ван дер Зил А. Флуктуационные явления в полупроводниках. М.: ИЛ, 1961. 232 с.
39. Нарышкин А.К., Врачев А.С. Теория низкочастотных шумов. М.: Энергия, 1972. 152 с.
40. Афанасьев В.Ф.// ФТП. 1970. Т.4. С.125.
41. Капшин Ю.С., Носкин В.А., Якубович Б.И. и др.// Л. 1983. 12 с. (Препринт ЛИЯФ; N884).
42. Капшин Ю.С., Носкин В.А., Якубович Б.И.// Изв.вузов. Радиофизика. 1984. Т.27. С. 1208.
43. Капшин Ю.С., Носкин В.А., Якубович Б.И.// Письма ЖТФ. 1984. Т.10. С.1057.
44. Якубович Б.И.// Л. 1986. 11 с. (Препринт ЛИЯФ; N1231).
45. Капшин Ю.С., Носкин В.А., Якубович Б.И. и др.// ЖТФ. 1986. Т.56. С.1187.
46. Лазебник И.М., Якубович Б.И.// Изв.вузов. Радиофизика. 1988. Т.31. С.1533.
47. Якубович Б.И.// Диэлектрики и полупроводники. 1990. В.38. С.32.
48. Якубович Б.И.// Электромагнитные волны и электронные системы. 2011. Т.16. С.12.
49. Якубович Б. И.// Успехи прикладной физики. 2013. Т.1. С.259.
50. Дьяконова Н.В., Левинштейн М.Е.// ФТП. 1989. Т.23. С.283.
51. Коган Ш.М., Шкловский Б.И.// ФТП. 1981. Т.15. С.1049.
52. Celasco M., Fiorillo F., Mazzetti P.// Phys.Rev.Lett. 1976. V.36. P.38.
53. Коган Ш.М., Нагаев К.Э.// ФТТ. 1982. Т.24. С.3381.
54. Якубович Б.И.// Надежность. 2011. Т.38. С.67.



Yakubovich B. I.

FLUCTUATION NONDESTRUCTIVE TESTING OF SOLID MATERIALS

The paper presented analysis of experimental and theoretical studies of electric low-frequency fluctuations in solids. The possibility of extensive use of low-frequency fluctuations for solid material nondestructive testing is shown. Effectiveness of fluctuation nondestructive testing of solid materials is justified. The paper also highlights the applicability of fluctuation nondestructive testing to increase dependability of electronic devices.

Keywords: *fluctuations, noise, nondestructive testing, solid materials.*

The increasing complexity of modern electronic equipment and its functional importance, as well as the need to operate when subjected to various external factors requires high dependability of all components. This requires high quality materials to be used in electronic equipment. As electronic devices and equipment are manufactured mainly of solid materials, there is a need to develop methods of nondestructive testing of solid materials. For that purpose, the fluctuation non-destructive testing can be used. In this case, the quality of materials is evaluated by the behavior of fluctuation processes occurring in solids. Electrical low-frequency fluctuations are the most effective method to solve that problem. This is due to the following circumstances. Electric fluctuations can be quickly and easily measured. One type of noise, usually excess noise, dominates in different types of solids at low frequencies. Its spectral properties are well learned. Low-frequency excess noise is largely connected with structural defects in solids. The degree of imperfection can be evaluated according to spectral-response characteristics of the excess noise. The author examines the nature of electric fluctuations in solids and their application in nondestructive testing of electronic devices in [1-3]. The paper also analyzes the applicability of electrical low-frequency fluctuations in nondestructive testing of solid materials.

At low frequencies, electric fluctuations in solids are generally identified by excess noise that usually prevails over other types of noise in the low frequency range. Excess noise is a noise the power spectral density of which has the following form: $S(f) \sim 1/f^\alpha$ where α is usually close to 1 (it is also referred to as noise $1/f$). Excess low-frequency noise has been extensively investigated and is well studied experimentally [1-5]. The frequency dependence and the order of magnitude of the noise spectral density are well known for many classes of solids and electronic devices. The properties of excess noise in a large number of different objects are experimentally studied. The origin of excess noise is associated with defects in the structure of solids. The findings of numerous studies indicate that as presented in [1-5]. Let us examine the experimental and theoretical studies that demonstrate the connection between excess noise and structure defects of solids.

Numerous and diverse experimental findings showing the connection between excess low-frequency noise and structure defects of solids have been obtained. Let us consider the most important of them. The earliest results in this area [6-8] showed that the plastic deformations of solids caused by pressure and high temperature increase the excess noise. Later, a large body of evidence of the impact of structural defects of solids on the properties of electrical low-frequency noise has been obtained. Let us consider the key findings of such studies per various types of solids.

In metals, one of the convincing arguments supporting the relationship between the mechanism of excess noise generation with structural defects is the dependence of the noise on mechanical deformations. In films of different metals such as lead, tin, platinum, gold, silver, an increase of the excess noise by approximately an order of magnitude with their deformation has been identified [9]. Upon relief of deformation, the noise level in the films decreased, but remained higher than the initial value. The observed effects may be associated with the formation and annihilation of structure microdefects. The results of the study of the spectral noise density dependence on mechanical stress in areas of elastic deformation for chromium film are given in [10]. With the increase of tensile stresses, reversible increase in the intensity of low-frequency noise is observed. This behavior can be explained by the fact that with growing tensile stress the distance between the atoms increases, thereby decreasing the activation energy for vacancy formation and increasing the concentration of defects of this type. The effects of plastic deformation on the chromium film lead to excess noise levels above initial values upon relief of the stress [10]. This can be explained by the appearance of additional microdefects as the result of plastic deformations.

It is known that the structural disequilibrium of vacuum condensates is largely due to own macrostresses. The dependence of excess noise on internal mechanical stress in thin aluminum films obtained by thermal evaporation in vacuum have been investigated [11, 12]. It was found that growing macrostress leads to the increase of noise spectral density. As it is known, tensile stress increases the concentration of vacancies, which explains the increase of excess noise level [12]. An increase of frequency exponent with growing positive and negative stress was also observed. The observed growth of the spectrum shape exponent with increasing mechanical stress indicates that in this case, the contribution of non-stationary mechanisms of noise initiation increases as well. Similar results were obtained for the films of chromium. Experimental results presented in [13] show that in chromium films there is a relationship between the level and nature of the excess noise and the quantity of internal mechanical stress. In the films with high internal stress a higher level of low-frequency noise can be observed. In addition, the spectrum shape exponent is higher for films with higher values of internal stress. Experimental study of relationship between excess noise and mechanical stress in the metal films showed that the dependence of noise spectral density of mechanical stress for films of aluminum, molybdenum and tantalum [12, 14, 15] obeys an exponential law. The growth of the noise spectral density with increasing stresses can be explained by intense growth of defect concentrations in films at sufficiently high mechanical stress. This is confirmed by the fact that electric resistance of the film reversibly increases when tensile deformations are applied.

The connection between the excess noise power with structural factors of metals was identified. The study of thin films of aluminum has shown [12] that the spectral density of the excess noise increases with the acceleration of film condensation, and this result was observed at deposition on substrates with substantially different physical properties. Moreover, it was found that the type of film production process (different aluminum deposition rate) affects their structure. The study of the microstructure of aluminum samples showed that a higher surface density of grains corresponds to a larger value of the noise spectral density. Similar behavior was identified in films of chromium, molybdenum, [10] and silver [16]. Thus, it was found that the dispersion of the crystallites leads to an increase of noise level. In chromium film, the intensity of excess noise was found to depend on the concentration of vacancies in the grains. These facts show the connection of excess noise with structural factors.

The effect of annealing on the excess noise was studied experimentally in films of aluminum [11, 17] and chromium [18]. Noise measurements were made before and after annealing of defects. It was shown that excess noise of films decreased as the result of annealing that lead to the reduction of structural defects. An investigation of the effect of annealing of induced defects on the low-frequency noise intensity in aluminum films is given in [19, 20]. Defects in the films were created by means of electron bombardment. After bombardment, a significant increase in noise intensity was observed. Annealing of defects led to the restoration of the low-frequency noise level. Paper [21] examines the influence of annealing on the excess noise in metal films and shows that the noise is caused by the motion of structural defects. Studies of excess noise in a large number of films of various metals [22] demonstrated that with increasing density of defects and impurities in the film the noise increases. It was established that the bombardment of copper films by electron beams leads to an increase of the excess noise spectral density by more than an order of magnitude. The study [23] has found that the radiation damage of indium-doped copper films cause an increase of the excess noise. The effect of γ -radiation on the excess noise in niobium films was studied in [24]. The impact of γ -radiation leads to additional defects in the crystal lattice. After the irradiation, the excess noise in the films increases. The reported results demonstrate the decisive role of metal structure defects in the generation of excess noise.

Numerous experimental facts support the connection between excess low-frequency noise and structural defects in semiconductors. Let us consider these results. The research of the influence of controllably introduced dislocations in silicon on the excess noise revealed the following. Paper [25] shows that the introduction of dislocations causes an increase in the noise level. The increase in noise strongly depends on the temperature. In [26] the introduction of dislocations led to a significant increase of the excess noise intensity, and the noise intensity increased monotonically with increasing dislocation density. The influence of defects on the noise were shown in experiments where structural imperfections were introduced by means of ion implantation. In [27,28] it was established that the structural damage caused by ion implantation leads to a significant increase in the excess noise in silicon. Subsequent annealing that restores structural perfection of the material causes a noise reduction.

It was established [29] that the ultrasonic treatment of epitaxial samples of GaAs (gallium arsenide) causes an increase of low-frequency noise intensity. A series of results has been obtained showing a connection between the excess low-frequency noise in semiconductors and structural defects arising under strong (destructive) compression. Semiconductor lattice disruptions arising in the destructive compression were well studied in [30, 31]. Various methods of studying the structure of solids show that the impact of mechanical stress on semiconductor materials leads to the generation of dislocations, declinations, vacancies, vacancy clusters and other types of defects. The study [32] presents the findings indicating the effect of compression on the destructive excess noise in GaAs samples. It was established that with the growth of destruction the intensity of low-frequency noise increases. The increase of the noise intensity was observed to reach two orders of magnitude. Due to the impact of mechanical stress a certain change in shape of the spectrum of the noise associated with the change of the frequency exponent is observed. It was found that under destructive compression the excess noise level increases to the same extent as the local concentration levels due to structural defects. The study of excess noise in silicon shown that with decreasing degree of structural perfection of the material the noise intensity grows [33]. These circumstances point out to an association of excess noise in semiconductors with structural defects.

An increase of low-frequency noise in semiconductors under the influence of radiation in the optical range has been detected. In [34] the effect of low-frequency noise spectrum readjustment in samples of GaAs under the impact of light was observed. It was also found that at low temperatures the effect of lighting results in a substantial increase in the noise level. The given explanation of this phenomenon is that the lighting significantly changes the concentration of minor carriers that being caught at permitted

levels in the band gap can strongly influence the charge state of the trap centers and, consequently, the intensity and spectrum of low-frequency noise. Paper [35] studied the effect of laser radiation on the excess noise in crystals $Cd_xHg_{1-x}Te$. It was found that with the growth of irradiation energy the noise intensity increases. Accordingly, it is concluded that a higher noise level corresponds to an increased number of defects. That further confirms by the results of the study [36] that shows that defects cause excess noise in such materials. The discovered nature of the influence of optical radiation on the excess noise in semiconductors also points to a relationship between noise and structural defects.

An important evidence in favor of the fact that the origin of the excess noise is connected with the structural defects consists in the dependence of its properties on the surface condition. The surface of the material has especially many defects as it is the interface between volume and environment and, therefore, there is a high concentration of broken electron couplings due to the finiteness of sample geometric dimensions. Furthermore, some of these couplings can be filled by atoms of chemically active substances in the atmosphere which leads to chemical reactions on the surface. When studying the excess noise of germanium strings [37], it was found that upon replacement of ambient dry nitrogen with liquid nitrogen the noise increases significantly, and this is accompanied by a change in the frequency profile of the spectrum. Other studies established [38] that humid atmosphere may amplify excess noise by several orders of magnitude.

It was also found that the level of the excess noise was associated with adsorption and chemical adsorption of substances by the materials' surface. A similar phenomenon is observed in electron tubes and semiconductor structures. An overview such studies is given in [39].

Paper [40] established a correlation between excess noise of surface-barrier transitions with the dislocation density, which also confirms the influence of structural defects on the properties of the excess noise.

A number of experimental results showing the connection between low frequency noise in dielectrics with structural defects have been obtained. Electrical low-frequency noise in polymer dielectric films was investigated in [41-47]. A conclusive correlation between the level of excess noise and dielectric strength of polymer dielectric films was established in [41, 42]. It is known that the electric strength of dielectrics is related to the presence of defects. It was shown that the long-term exposure to alternating electric field causes a reversible noise increase in dielectric film, and therefore as a result of that increase, the correlation between noise level and dielectric strength becomes stronger [43]. The effect of damaging actions on the low-frequency noise in films was investigated in [44, 46, 47]. An irreversible increase of excess noise in dielectric films due to exposure to strong (destructive) electric fields, which indicates a relationship between noise and defects in films, was established [44, 46].

A variety of theoretical models, according to which the cause of the excess low-frequency noise are the defects in the structure of solids, has been developed. These models explain the origin of the excess noise in solids of various types. Let us examine the key premises of the explanation of excess noise from that perspective.

Let us consider the excess low-frequency noise in semiconductors. There are numerous theoretical models associates the origin of the excess low-frequency noise with structure defects of semiconductors. A large group of models associates the excess noise in semiconductors with the capture and emission of charge carriers by traps. In this case the excess noise is explained as follows. The defects can generate permitted levels in the gap band (traps). The capture of charge carriers by traps causes fluctuations in the number of free charge carriers which entails fluctuations of sample conductivity and electrical noise. Assuming that there is an even probability distribution of change of the charge state of the trap, then the spectrum of the fluctuations caused by one trap has the form of the Lorentzian spectrum. In a semiconduc-

tor, there is a set of traps with different time constants. It is believed that the traps are independent. The spectrum of fluctuations in the number of free carriers in a semiconductor is described by the following expression

$$S(f) \sim \int_{\tau_1}^{\tau_2} \frac{\tau g(\tau)}{1 + 4\pi^2 f^2 \tau^2} d\tau, \quad (1)$$

where $g(\tau)$ is the density distribution of time constants. Provided that $g(\tau) \sim 1/\tau$ in the frequency band $\frac{1}{2\pi f \tau_2} \ll f \ll \frac{1}{2\pi f \tau_1}$ fluctuation spectrum obeys the law: . Thus is $S(f) \sim 1/f$ explained the excess

noise due to the processes of capture and emission of charge carriers on traps. Noise generation with the spectrum of the type $1/f$ is based on the superposition of processes on traps having a broad distribution of time constants. Specific physical mechanisms that substantiate that explanation of excess noise may be associated with the activation and tunneling of carriers into bound states on traps. An extensive overview of these theoretical models is presented in [2-4]. As of today, the theory connecting the explanation of excess noise with carrier capture by traps is the most important in semiconductor studies.

Electrical fluctuations in semiconductors caused by capture and emission of charge carriers by structural defects are more generally analyzed by the author in [2, 3, 48, 49]. The fluctuation process has been analyzed, when the probability of a carrier capture by the trap is statistically associated with the trap empty time, and the probability of the carrier emission is statistically associated with the bound time on the trap; the statistical relationships are defined in general terms. As a result, the following expression for the spectrum of low-frequency noise in the semiconductor caused by traps was obtained:

$$\frac{S(f)}{I^2} = \frac{v}{NV} \sum_{i=1}^l \frac{\sigma_i N_i}{1 + \frac{1}{g_i} e^{-\left(\frac{E_i - E_F}{kT}\right)}} \Phi_i(f), \quad (2)$$

here I is the current in the sample, v is the average thermal velocity of carriers, N is the number of carriers in the sample, V is the sample volume, σ_i is the trap capture cross-section, N_i is the number of traps of each type, l is the number of trap types in the sample, g_i is the degeneracy factor, E_i is the trap energy, E_F is the Fermi level, k is the Boltzmann constant, T is the temperature, $\Phi_i(f)$ is the function defining the dependence of the spectral density of fluctuations on the frequency associated with distributions of the trap empty and filled times. This mechanism allows generating noise with a spectrum $1/f$.

Paper [50] suggests a model of excess noise in semiconductors linking it with the fluctuations of the energy levels' population in the tail of density-of-states function penetrating the gap band of the semiconductor. The cause of the electrical noise in this case are the fluctuations in the concentration of free carriers in heavily doped semiconductors caused by exchange of carriers between the conduction band and the levels of the tail. The formation of tails of density of states falling into the depths of the gap band is a result of semiconductor structure imperfections. These are impurities, defects, local stress of lattice and so on. In this model it is assumed that the level of the capture cross-section of the tail level σ_n decreases exponentially with increasing energy ε . Time constant $\tau_0(\varepsilon)$ of capture per level with energy ε :

$\tau_0(\varepsilon) \sim \frac{1}{\sigma_n(\varepsilon)}$, consequently $\tau_0(\varepsilon) = \tau_{00} e^{\varepsilon/\varepsilon_1}$ where τ_{00} is the capture time constant at $\varepsilon=0$, ε_1 is the constant

defining the capture cross-sections decrease with increasing energy ε . It was assumed that the tail of the density of states decreases exponentially into the depth of the gap band as $\rho = \rho(0)e^{-\varepsilon/\varepsilon_0}$, where ρ is the density of states, ε_0 is the constant characterizing the droop rate of the density of states. In the case where with the increasing energy the time constant τ_0 is growing faster than the density of states decreases, and the temperature is relatively high, the low-frequency spectral density of the relative fluctuations of the free carrier concentration (and, correspondingly, the relative spectral density of fluctuations of the sample resistance) has the following form:

$$\frac{S_R(f)}{R^2} = \frac{S_n(f)}{n_0^2} \approx \frac{4N_0 e^{-\varepsilon_F/\varepsilon_0}}{VN_d^2 (\tau_{00} e^{\varepsilon_F/\varepsilon_1})^{\Gamma-1}} \frac{kT}{\varepsilon_0} \frac{1}{(2\pi f)^\Gamma}, \quad (3)$$

where $N_0 = \int_0^\infty \rho(\varepsilon) d\varepsilon$, $\Gamma = 1 - \varepsilon_1/\varepsilon_0 - \varepsilon_1/kT$, ε_F is the Fermi level, n_0 is the equilibrium concentration of electrons, N_d is the concentration of donors, V is the sample volume. Provided that $\varepsilon_1 \ll \varepsilon_0$ and $\varepsilon_1 \ll kT$ noise spectral density varies as $1/f$.

Excess noise due to fluctuations of the charge carrier concentration can be observed in systems with hopping conduction mechanism. The spectral density of the resistance fluctuations of lightly doped compensated semiconductor in the temperature range at which the conductivity is of hopping nature was calculated in [51]. Frequency of carriers' tunnel hopping between two doped centers is exponentially dependent on the distance between them: $\nu(r) = \nu_0 e^{-2r/a}$, where a is the effective Bohr radius, ν_0 is the factor. Because the distance between the defect centers is a random variable, the semiconductor under the hopping conduction represents a disordered medium. At frequencies that are low compared to the hopping frequency of charge carriers on critical grid (infinite cluster determining the conductivity of the semiconductor) $f \ll \nu$, conductivity fluctuations are associated with fluctuations in the number of carriers on the critical grid. The spectral noise density rises with decreasing frequency and is related to the concentration of impurities. In a wide frequency range spectral density of conduction fluctuations is expressed as $S(f) \sim f^{-\alpha}$, where the exponent $\alpha < 1$ and depends on the value Na^3 (N is the concentration of impurities). In the limit of very low concentrations ($Na^3 \rightarrow 0$) the noise spectral density increases with decreasing frequency according to the law, approaching $1/f$. However, with the realistic values Na^3 of the exponent α is significantly less than 1.

There are numerous approaches that associate the origin of excess low frequency noise in metals with structural defects. Among various types of defects the most essential to metals are vacancies, since their formation and migration requires relatively little energy. In this regard, models linking noise with vacancies is of particular interest to explain the excess noise in metals. Models exist which the low-frequency noise in metal films is conditioned by resistance fluctuations due to fluctuations in the number of vacancies in the sample. The lifetime of vacancies is a random variable and is determined by the average distance between sources (drain nodes) of vacancies. In the model developed for homogeneous metals [52] drain nodes are uniformly distributed throughout the volume. In this case, the probability density for each vacancy destruction during its lifetime is constant. Events of generation and annihilation of vacancies are statistically independent, and the average vacancy settled lifetime is given in the following expression:

$$\tau_{v0} = \tau_0 \exp\left(\frac{E_v}{kT}\right), \text{ where } E_v \text{ is the activation energy of a vacancy generation. The power spectrum of the}$$

noise generated when a current I_0 flows through a homogeneous metal sample with the average number of vacancies N_v has the following form [52]:

$$S_u(f) = 4\delta \overline{R^2} I_0^2 N_v \frac{\tau_{v0}}{1 + 4\pi^2 f^2 \tau_{v0}^2}, \quad (4)$$

where R is the resistance of the sample. In real metal films due to the heterogeneous distribution of drain nodes in the sample there is a wide range of relaxation times associated with the mechanism of generation and annihilation of vacancies, which explains the type of noise $1/f$ in a wide frequency range. Thus, as follows from formula (4), the noise increases with the number of vacancies.

Another sufficiently common approach to the explanation of the excess low-frequency noise in metals is the concept that associates the noise of type $1/f$ with internal friction. At low frequencies, the movements of defects create the friction reorientation, migration, etc. Accordingly, the low-frequency noise caused by internal friction can be revealed in a variety of metals and be associated with defects in their structure. The possibility of electrical noise spectrum of type $1/f$ due to internal friction is considered in [53]. Fluctuations caused by the random nature of reorientation of defects have been analyzed. The reorientation of defects whose symmetry is lower than the point symmetry of the crystal causes a change in the scattering of electrons on them. Consequently, fluctuations of the electric resistance of metals take place. If there is a distribution of the concentration of defects $n(E)$ in activation energies E such that the relaxation time of defects is expressed as $\tau = \tau_0 \exp(E/kT)$, then the electrical noise with a spectrum close to $1/f$ occurs, namely:

$$\frac{S_U(f)}{U^2} \approx \frac{n(E_\omega)[l\sigma_s(E_\omega)]^2 kT}{Vf}, \quad (5)$$

$$E_\omega = kT \ln(\omega\tau_0)^{-1}$$

where σ_s is the electron scattering cross-section by defect, l is the electron mean free path, V is the sample volume. Thus, the given mechanism of conductivity fluctuation can explain the noise with a spectrum of type $1/f$ in metal films.

Summarizing the experimental and theoretical studies, we can draw the following conclusions. The results of numerous studies show that excess low-frequency noise is associated with structural defects in solids. Those results were obtained in the study of different types of solids. Experimental studies have repeatedly demonstrated the connection between the spectral characteristics of the excess noise with the structural defects. The most important facts are as follows. The excess noise grows with increasing density of impurities and structural defects. Noise amplification takes place due to mechanical deformations both in the areas of plastic and elastic deformations. There is an increase of noise due to the impact of penetrating radiation. Growth of the intensity fluctuations is observed due to excessive exposure to strong (destructive) electric fields. There is an increase of noise level caused by optical emission. Ultrasonic treatment affects the intensity of fluctuations. Noise reduction occurs as the result of annealing that decreases structural defects. Excess noise strongly depends on the samples manufacturing technology.

Theoretical models for different types of solids, whereby the origin of the excessive low-frequency noise is conditioned by structural defects have been developed. These models allow explaining many results of experimental studies of this type of noise. The experimental and theoretical studies of excess low-frequency noise show its relation to structural defects and allow determining the dependence of noise spectral characteristics on the number of defects. In addition, excess noise may be associated with the speed at which the number of defects grows [54]. Thus, the spectrum of excess noise contains in-

formation on the degree of solid material defectiveness and may contribute to the evaluation of the rate of degradation of its structure. Consequently, the excess low-frequency noise can be effectively used to assess the quality of solid materials.

Thus, electrical low-frequency fluctuations can be used for nondestructive testing of solid materials that are the foundation of electronic products. Therefore, the fluctuation nondestructive testing can be used to improve the dependability of electronic devices. This nondestructive control method has the following advantages. In many cases, the electrical low-frequency fluctuations provide more complete information regarding the defects of solid materials structure than it is possible with other methods. Usually, excess noise dominates over other types of noise in the low-frequency range. This allows reliably evaluating the noise characteristics. High sensitivity spectroscopy of fluctuations enables high-precision noise spectra measurement. Noise measurement can usually be carried out sufficiently fast. The above facts highlight the high efficiency of the fluctuation nondestructive testing of solid materials.

References

1. **Yakubovich B.I.** Electrical fluctuations in non-metals. Saint-Petersburg. Energoatomizdat, 1999.
2. **Yakubovich B.I.** Electrical noise and structure defects in solids. Germany. LAP Lambert Academic Publishing, 2012.
3. **Yakubovich B.I.** Electrical fluctuations in solids. Germany. AV Akademikerverlag, 2013.
4. **Kirton M.J., Uren M.J.** Adv.Phys. 1989. V.38. P.367.
5. **Jones, B.K.** Adv.Electron.Electron.Phys. 1993. V.87. P.201.
6. **Brophy J.J.** J.Appl.Phys. 1956. V.27. P.1383.
7. **Brophy J.J.** Phys.Rev. 1957. V.106. P.675.
8. **Bess L.J.** Appl.Phys. 1955. V.26. P.1377.
9. **Fleetwood D.M., Giordano N.** Phys.Rev.B. 1983. V.28. P.3625.
10. **Zhigalskii G.P.** UFN. 1997. V.167. P.623.
11. **Zhigalskii G.P., Bakshi I.S.** Radio engineering and Electronics. 1980. V.25. P.771.
12. **Andrushko A.F., Bakshi I.S., Zhigalskii G.P.** Izvestia vuzov. Radio physics. 1981. V.24. P.498.
13. **Zhigalskii G.P., Kurov, G.A., Siranashvili I.Sh.** Izvestia vuzov. Radio physics. 1983. V.26. P. 207.
14. **Zhigalskii G.P.** Proc. Int. Conf. Noise in Physical Systems and $1/f$ Fluctuations. New York, 1993. P. 201.
15. **Zhigalskii G.P.** Proc. Int. Conf. Noise in Physical Systems and $1/f$ Fluctuations. Kyoto, 1991. P. 39.
16. **Eberhard J.W., Horn P.M.** Phys. Rev. Lett. 1977. V.39. P.643.
17. **Potemkin, V.V.** et al. Proc. Sci. Conf. Fluctuation Phenomena in Physical Systems. Palanga, 1991. P. 79.
18. **Zhigalskii G.P., Fedorov A.S.** Izvestia vuzov. Radio physics. 1985. V.28. P.1192.
19. **Brigman J.** et al. Proc. Int. Conf. Noise in Physical Systems and $1/f$ Fluctuations. New York, 1993. P. 607.
20. **Dagge K.** et al. Proc. Int. Conf. Noise in Physical Systems and $1/f$ Fluctuations. Singapore, 1995. P. 603.
21. **Fleetwood D.M., Giordano N.** Phys.Rev.B. 1985. V.31. P.1157.
22. **Scofield J.H., Mantese J.V.** Phys.Rev.B. 1985. V.32. P.736.
23. **Pelz, J., Clarke J.** Phys.Rev.B. 1987. V.36. P.4479.
24. **Potemkin, V.V.** et al. Proc. Int. Conf. Noise in Physical Systems and $1/f$ Fluctuations. New York, 1993. P.61.

25. Yu K.K., Jordan A.G., Louqini R.L.J. Appl. Phys. 1967. V.38. P.572.
26. Svetlichny A.M., Koledov L.A., Zotov V.V. et al. FTP. 1980. V.14. P.582.
27. Vandamme L.K.J., Osterhof S.J. Appl. Phys. 1988. V.59. P.3169.
28. Clevers R.H.M. J. Appl. Phys. 1987. V.62. P.1877.
29. Kireev O.A., Lebedev Yu.N., Mustin N.I. et al. Electronic technologies. Ser. 2. Semiconductor devices. 1986. No. 1. P.66.
30. Kontsevoy Yu.A., Litvinov Yu.M., Fattakhov E.A. Plasticity and strength of semiconductor materials and structures. Moscow. Radio i sviaz, 1982. 240 p.
31. Aliokhin V.P. Physics of strength and plasticity of material surface layers. Moscow. Nauka, 1983. 280 p.
32. Dyakonova N.V., Levinshtein M.E., Rumiantsev S.L. FTP. 1991. V.25. P.2065.
33. Gook E.G., Dyakonova, N.V., Levinshtein M.E., Rumiantsev S.L. et al. FTP. 1990, V.24. P.813.
34. Vainshtein S.N., Levinshtein M.E., Rumiantsev S.L. JTP Letters. 1987. V.13. P.645.
35. Vlasenko A.I., Gnatiuk V.A., Kopishinskaya E.P. et al. FTP. 1997. V.31. P.820.
36. Bakshi I.S., Grin V.F., Kalachevtseva L.A. et al. FTP. 1989. V.23. P.571.
37. Marle T.G., Bess L., Gebbie H.A. J. Appl. Phys. 1955. V.26. P.490.
38. Van der Ziel A. Fluctuation phenomena in semiconductors. Moscow. IL, 1961. 232 p.
39. Naryshkin A.K., Vrachev A.S. Theory of low-frequency noise. Moscow. Energia, 1972. 152 p.
40. Afanasiev V.F. FTP. 1970. V.4. P.125.
41. Kapshin Yu.S., Noskin, V.A., Yakubovich B.I. et al. Leningrad. 1983. 12 p. (Prepring LINF; No. 884).
42. Kapshin Yu.S., Noskin V.A., Yakubovich B.I. Izvestia vuzov. Radio physics. 1984. V.27. P.1208.
43. Kapshin Yu.S., Noskin V.A., Yakubovich B.I. JTP Letters. 1984. V.10. P.1057.
44. Yakubovich B.I. Leningrad. 1986. 11 p. (Preprint LINF; No. 1231).
45. Kapshin Yu.S., Noskin V.A., Yakubovich B.I. et al. JTP. 1986. V.56. P.771.
46. Lazebnik I.M., Yakubovich B.I. Izvestia vuzov Radio physics. 1988. V.31. P.1533.
47. Yakubovich B.I. Dielectrics and semiconductors. 1990. V.38. P.32.
48. Yakubovich B.I. Electromagnetic waves and electronic systems. 2011. V.16. P.12.
49. Yakubovich B.I. Progress of Applied Physics. 2013. V.1. P.259.
50. Diakonova N.V., Levinshtein M.E. FTP. 1989. V.23. P.283.
51. Kogan Sh.M., Sklovsky B.I. FTP. 1981. V.15. P.1049.
52. Celasco M., Fiorillo F., Mazzetti P. Phys. Rev. Lett. 1976. V.36. P.38.
53. Kogan Sh.M., Nagaiev K.E. FTT. 1982. V.24. P.3381.
54. Yakubovich B.I. Dependability. 2011. V.38. P.67.



Душко О.В., Мышлинская И.Х.

ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА ИЗДЕЛИЙ ИЗ ВЫСОКОТВЁРДОЙ КЕРАМИКИ ДЛЯ ТЯЖЕЛОНАГРУЖЕННЫХ ПАР ТРЕНИЯ

В статье показано, что один из способов получения беспористых керамических материалов на основе карбида кремния состоит в добавке оксида алюминия. Предложена методика прогнозирования оценки качества высокотвердых и хрупких керамических материалов по критерию их поверхностной хрупкости.

Ключевые слова: карбид кремния, оксид алюминия, микровдавливание, горячее прессование (спекание), поверхностная хрупкость, алмазная обработка, высокотвёрдая керамика, беспористые материалы.

Из практики проектирования и создания машин и механизмов следует, что дальнейшее развитие научно-технического прогресса невозможно без применения высокоэффективных технологий, высокопрочных и износостойких материалов и оригинальных инженерных решений.

Особенно остро вопрос повышения надёжности и долговечности отдельных узлов, агрегатов и целых комплексов стоит в нефтегазовой и химической промышленности, а также в строительной отрасли, где оборудование работает в крайне неблагоприятных условиях: агрессивные среды, абразив, высокие контактные температуры и т.п. Наиболее перспективным материалом, по нашему мнению, для применения в этих отраслях промышленности можно считать керамику.

Проведённые нами исследования показали высокую эффективность использования изделий из высокотвёрдой керамики в тяжело нагруженных узлах (парах трения). Однако, надёжность и долговечность изделий из керамики во многом определяются качеством рабочей поверхности, сформировавшейся на конечном этапе механической обработки изделия.

Из практического опыта известно, что в процессе снятия стружки при алмазном шлифовании керамики участвуют отдельные алмазные зерна в совокупности со связкой круга. Но в основном съём припуска с поверхности заготовки определяется действием самих алмазных зерен, которые играют главную роль в процессе диспергирования материала [1 – 2]. Нами были проведены исследования по изучению резания-царапания единичным алмазным зерном в виде алмазной пирамиды, а также необработанным алмазным зерном естественной геометрии с исходным субмикрорельефом.

Было установлено, что зерно в начале и в конце царапины оставляет четкий след без явных сколов по его краям, а зона скольжения, предшествующая внедрению алмазного зерна, отсутствует (рис. 1.). Обладая высокой твердостью, алмазное зерно, начинает срезать стружку сразу же при контакте с материалом, средняя же часть царапины имеет по краям значительные вырывы на всем своём протяжении так, что края царапины очерчены ломаной линией в средней части.

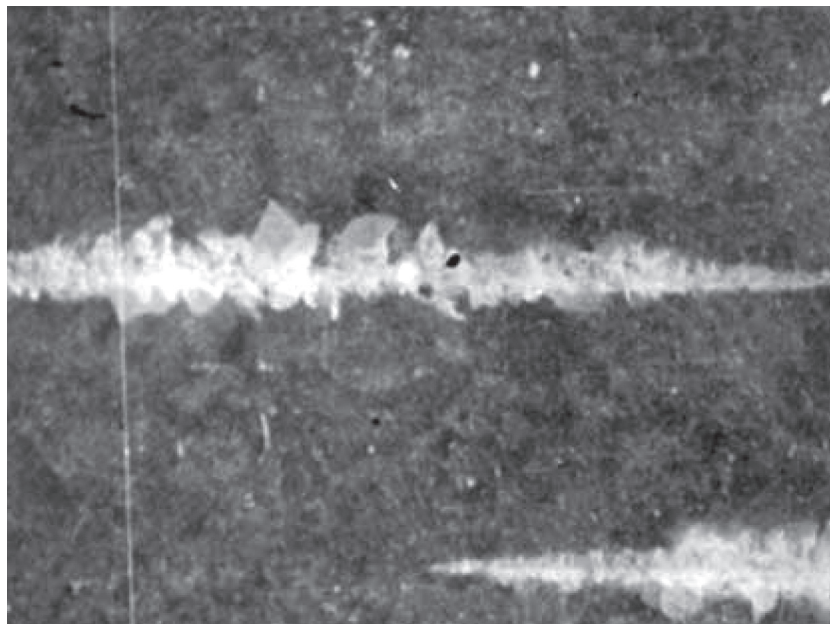


Рис. 1. Вид царапины на поверхности карбидкремниевой керамики при резании $V_{пр} = 38$ м/с единичным алмазным зерном, $\times 300$

При достижении определенной глубины внедрения зерна появляются сколы. Это можно объяснить тем, что с увеличением глубины резания, в работу вступают все новые кромки алмазного зерна, и при этом силы микрорезания возрастают в зоне его контакта с материалом образца: наблюдаются крупные участки вырывов и образование высокодисперсной стружки.

Глубина внедрения алмазного зерна, при которой начинают появляться сколы по бокам царапины, зависят от многих факторов. Она определяется прочностными свойствами обрабатываемого материала и состоянием его рабочей поверхности при прочих равных условиях. То есть, при одинаковой скорости резания характеристики алмазного зерна не должны зависеть от глубины резания, не считая ничтожного влияния незначительного изменения переднего угла при заходе и изменении угла резания. Для проверки этого положения провели измерения длины рисок царапин $l_{ш}$ (рис. 2) на предварительно прошлифованных образцах и $l_{п}$ на предварительно отполированных образцах, и длины среднего участка рисок со сколами $l_{2ш}$ на предварительно прошлифованных и $l_{2п}$ на предварительно отполированных образцах. По этим данным были рассчитаны фактическая глубина риски $t_{ш}$ ($t_{п}$) и глубина внедрения зерна, при которой появляются сколы t_2 (t_3) по формулам:

$$t_{ш,п} = R - \frac{\sqrt{4R^2 - l_{ш,п}^2}}{2};$$

$$t_{2,3} = \frac{\sqrt{4R^2 - l_{2ш,2п}^2} - \sqrt{4R^2 - l_{ш,п}^2}}{2}.$$

Результаты расчетов представлены в табл.1 и табл. 2.

В процессе проведения дисперсионного анализа для определения значимости полученных результатов было выявлено действие двух факторов: первый – глубина микрорезания – глубина внедрения индентора в царапаемую поверхность (фактор A), второй – состояние царапаемой поверхности – шлифованная или полированная (фактор B). Фактор B имеет два уровня, для фактора A было принято 16 уровней – общий диапазон глубины рисок-царапин на шлифованной и полированной поверхностях. Значения глубины залегания бесколовой части рисок-царапин при входе и выходе зерна из контакта с царапаемой поверхностью считали параллельными наблюдениями.

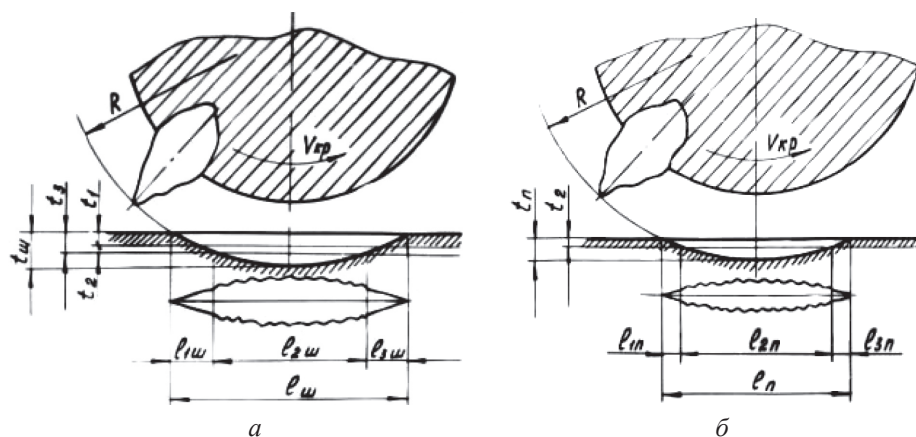


Рис. 2. Схема резания-царапания единичным алмазным зерном, соответствующая плоскому шлифованию периферией алмазного круга: a – на предварительно прошлифованных образцах; b – на предварительно отполированных образцах

Таблица 1. Результаты определения бесколовой глубины рисок при микрорезании шлифованной поверхности керамики

Глубина рисок-царапания, мкм	Глубина залегания бесколовой части рисок-царапины	
	на входе, мкм	на выходе, мкм
13,1	12,3	11,3
22,2	6,4	12,7
20,1	17,6	13,3
25,3	19,9	17,9
20,6	9,9	20,2
20,8	9,5	16,9
32,7	23,6	12,3
21,8	14,5	13,2
11,0	8,1	9,2
16,0	7,4	7,6
24,0	9,1	23,2
17,9	11,1	12,9
15,2	14,7	9,5
38,2	9,3	17,2
45,6	18,2	4,5
57,8	4,8	30,1
50,4	20,0	23,2
44,2	24,1	20,2

Таким образом, данная задача представляет собой классический образец для применения двухфакторного дисперсионного анализа, с оценкой эффекта взаимодействия факторов A и B .

Таблица 2. Результаты определения бессколовой глубины риск при микрорезании полированной поверхности керамики

Глубина риски-царапания, мкм	Глубина залегания бессколовой части риски-царапины	
	на входе, мкм	на выходе, мкм
11,7	6,2	6,2
48,3	3,3	3,3
47,6	3,2	4,6
42,9	3,3	3,3
34,2	3,2	3,4
26,3	3,0	3,2
21,2	2,4	2,4
14,5	5,6	5,5
7,0	5,2	5,1
14,2	3,2	3,1
11,9	5,0	3,0
9,9	1,8	1,5
20,7	3,1	3,0
16,0	3,5	3,3
15,2	5,7	5,8
16,9	1,8	2,2
27,6	2,9	2,3
26,8	2,0	2,4

Порядок сравнения дисперсий выполнили в соответствии с рекомендациями по критерию Фишера:

$$F_{\text{эмп}} = \frac{\sigma_{x^2}}{\sigma_{y^2}},$$

где σ_{x^2} и σ_{y^2} – дисперсии первой и второй выборки соответственно.

Согласно условию критерия величина числителя должна быть больше величины знаменателя, поэтому $F_{\text{эмп}}$ всегда будет равно или больше единицы.

Проведенный анализ показал значимость фактора B при незначительном влиянии фактора A и их взаимодействия:

$$\frac{nS_0^2}{S_2^2} = 1,13 < 2,1, F(0,95;15;32) = 2,1;$$

$$\frac{S_A^2}{S_0^2} = 0,55 < 1,6, F(0,95;15;15) = 1,6;$$

$$\frac{S_B^2}{S_0^2} = 85 \gg 1,8, F(0,95;1;15) = 1,8;$$

где S_0^2 – совместная дисперсия воспроизводимости и взаимодействия;

S^2 – дисперсия воспроизводимости;

S_A^2, S_B^2 – выборочные дисперсии.

Таким образом, нами была получена статистическая значимость влияния фактора способа подготовки поверхности (шлифование или полирование) на бесколовую глубину риски-царапины. При этом, статистической значимости влияния фактора — глубина царапины на тот же параметр не получили, что, в свою очередь, подтвердило высказанное выше предложение. Было установлено, что предельная глубина внедрения зерна, при которой образуются сколы по краям риски в случае шлифованных образцов составила в среднем 14 мкм, а в случае полированных — 4 мкм. Были проведены электронноскопическое изучение поверхностного слоя и определение его микротвёрдости на микротвердомере. Описанные выше исследования показали наличие в поверхностном слое шлифованных образцов дефектного слоя, (рис. 3), обладающего повышенной вязкостью и пониженной хрупкостью. В случае образца, у которого полированием удален внешний дефектный слой, предельная глубина сколообразования t_2 , в случае же шлифованных образцов она складывается из глубины дефектного слоя t_1 , материал которого в большей мере склонен к вязкому пластическому течению нежели к хрупкому разрушению и глубины внедрения в исходный материал t_3 , соответствующей t_2 для полированного образца. Из этих соображений была определена глубина дефектного слоя $t_1 = t_3 - t_2$, которая составила в среднем 10 мкм.

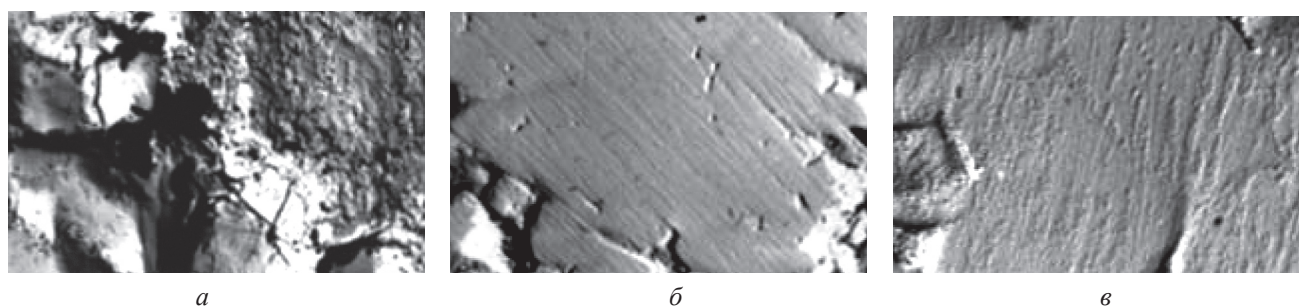


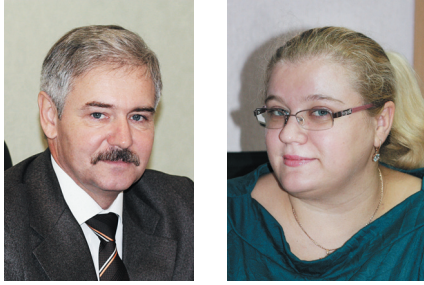
Рис. 3. Поверхность карбидкремниевой керамики после различных способов обработки поверхности:
а — после шлифования, х 7800; б — после полирования, х 7800; в — после полирования, х 7800

Таким образом, на основании критерия Фишера теоретически определена и практически установлена зависимость влияния фактора способа подготовки поверхности высокотвёрдой керамики (шлифование, полирование) на бесколовую глубину риски-царапания при алмазном шлифовании.

Предельная глубина внедрения зерна, при которой образуются сколы по краям следа для различных способов предварительной обработки поверхности керамики составляют 4 – 14 мкм, что вполне допустимо при изготовлении высокоточных деталей.

Литература

1. Душко О. В. Износостойкие керамические торцовые уплотнения для нефтехимической промышленности / О. В. Душко, Д. О. Пушкарев // Процессы абразивной обработки, абразивные инструменты и материалы. Шлифабразив – 2004 : сборник статей международной научно-технической конференции. – Волжский : ВИСТех (филиал) ВолгГАСУ, 2004. – С. 61 – 63.
2. Душко О. В. Оптимизация параметров алмазной обработки карбидкремниевой керамики / О. В. Душко, В. М. Шумячер, Д. О. Пушкарев // Наука и технологии : труды XXIV Российской школы. – : СГТУ, 2004. – С. 112 – 114.



Dushko O.V., Mishlinskaya I.H.

QUALITY IMPROVEMENT OF PRODUCTS MADE OF HIGHLY RIGID CERAMICS FOR HEAVY-LOADED FRICTION PAIRS

The paper shows that one of the ways of getting non-porous ceramic materials based on silicon carbide can be using aluminum oxide as an additive. The paper also offers the quality assessment forecast method for highly rigid and brittle ceramic materials using the criterion of their surface fragility.

Keywords: *silicon carbide, aluminum oxide, micro-indentation, hot pressing (clinkering), surface fragility, diamond polishing, highly rigid ceramics, non-porous materials.*

The practice of designing and making machinery shows that further development of scientific and technological progress is impossible without the use of high-tech, high-strength and wear-resistant materials and ingenious engineering solutions.

The issue of increasing the dependability and durability of individual components, assemblies and whole complexes is particularly urgent in the petroleum and chemical industries, as well as in the construction industry, where the equipment operates in extremely unfavorable conditions, corrosive environment, abrasives, high contact temperature, etc. We believe that ceramics can be considered as the most promising material for use in these industries.

Our studies have shown high efficiency of products made of hard ceramics in heavily loaded subassemblies (friction pairs). However, the dependability and durability of ceramics articles is largely determined by the quality of the working surface formed at the final stage of product machining.

From field experience it is known that in the chip-cutting operation during diamond grinding of ceramics individual diamond grains together with an aggregate of wheel bond take place in the process. However, basically the removal of outsize from stock surface is defined by the action of diamond grains themselves, which play a major role in the dispersion of the material [1 – 2]. We carried out a study of cutting-scratching by a single-point diamond in the form of a diamond pyramid, as well as by a raw single-point diamond of natural geometry with the original submicroscopic relief.

It was found that at the beginning and at the end of scratching the grain leaves a clear trace with no apparent chipping at the edges, and a sliding zone preceding the penetration of the diamond grain is absent (fig.1.). Possessing the high hardness, the diamond grain begins to cut the chip immediately upon contact with the material, and the middle part of the scratch has a large tear-out on the edges of its entire length so that the scratch edges are delineated by a broken line in the their middle part.

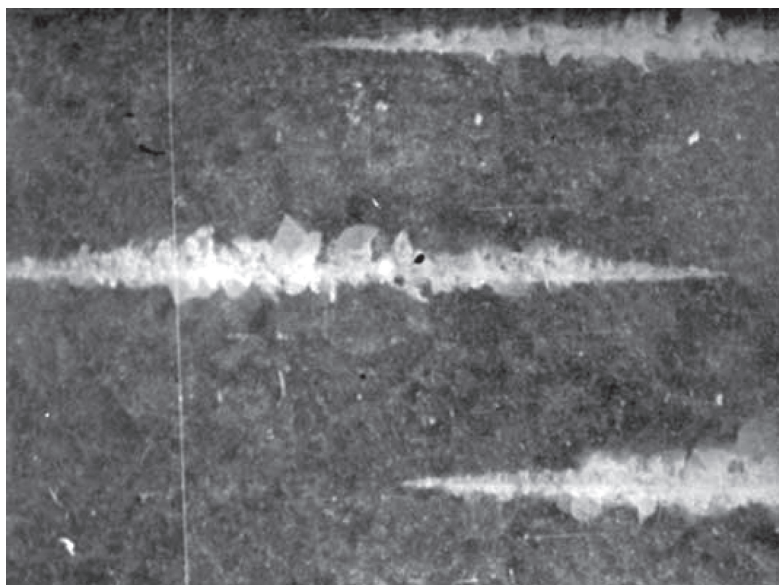


Fig. 1. The view of scratch on the surface of silicon carbide ceramics
In case of cutting $V_{np} = 38$ m/s by a single diamond grain, x 300

Chips emerge when the grain reaches a certain depth of penetration. This can be explained by the fact that with increasing depth of cutting, new edges of the diamond grain come into play and here micro-cutting forces increase in the area of the grain contact with the sample material: large sections of tear-outs and the formation of highly dispersed chips are observed.

The penetration depth of a diamond grain in which the chips are beginning to appear on the scratch sides, depends on many factors. It is determined by the strength properties of the machined material and the condition of its working surface, all other things being equal. That is, at the same cutting speed characteristics of a diamond grain should not depend on the depth of cutting, except for an insignificant effect of a slight change in a front angle at start and change of a cutting angle. To verify this statement, we carried out measurements of the length of scratch marks l_{III} (fig. 2) on the preliminary ground samples and l_{II} on the preliminary polished samples and the length of the middle section of marks with chips l_{2III} on the preliminary ground and l_{2II} on the preliminary polished samples. Using these data, the actual depth of the mark $t_{III}(t_{II})$ and the depth of grain penetration, in which chips $t_2(t_3)$ appear, have been calculated by the following formulas:

$$t_{u,n} = R - \frac{\sqrt{4R^2 - l_{u,n}^2}}{2};$$

$$t_{2,3} = \frac{\sqrt{4R^2 - l_{2u,2n}^2} - \sqrt{4R^2 - l_{u,n}^2}}{2}.$$

The results of the calculation are presented in table 1 and table. 2.

In the process of variance analysis to determine the significance of the obtained results, the action of two factors has been revealed: the first factor – micro-cutting depth – the depth of the indenter penetration into the scratched surface (factor A), the second factor – the surface condition of the scratched surface – ground or polished ones (Factor B). Factor B has two levels, and 16 levels were adopted for factor A – a total range of depth of mark-scratches on ground and polished surfaces. The values of the bedding depth of the chipless part of mark-scratches for the grain going in and out of contact with scratched surface were calculated by parallel observations.

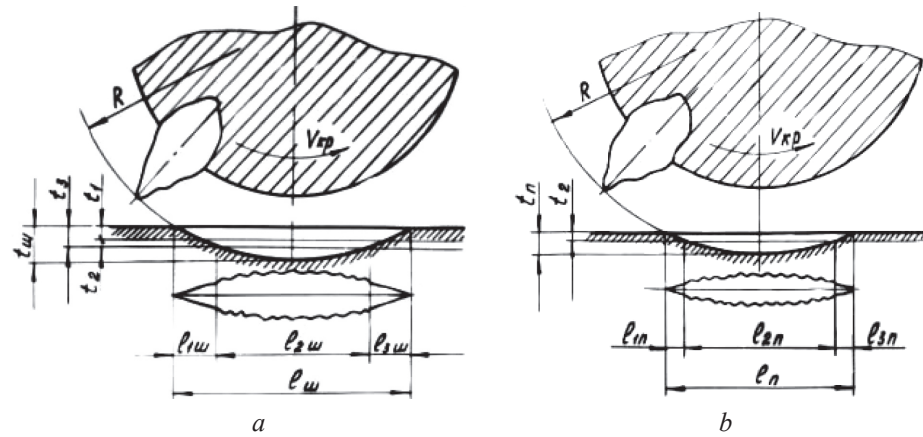


Fig. 2. Scheme of cutting-scratching by a single diamond grain corresponding to surface grinding by diamond wheel periphery: *a* – on the preliminary ground samples, *b* – on the preliminary polished samples

Table 1. The results of determining the chipless depth of scratches in case of micro-cutting of ground ceramic surface

Depth of scratching mark, micron	The depth of the bedding depth of the chipless part of mark-scratch	
	in, micron	out, micron
13.1	12.3	11.3
22.2	6.4	12.7
20.1	17.6	13.3
25.3	19.9	17.9
20.6	9.9	20.2
20.8	9.5	16.9
32.7	23.6	12.3
21.8	14.5	13.2
11.0	8.1	9.2
16.0	7.4	7.6
24.0	9.1	23.2
17.9	11.1	12.9
15.2	14.7	9.5
38.2	9.3	17.2
45.6	18.2	4.5
57.8	4.8	30.1
50.4	20.0	23.2
44.2	24.1	20.2

Thus, this problem is a classic example of the use of two-factor analysis of variance with the assessment of the effect of the interaction of factors *A* and *B*.

Table 2. The results of determining the chipless depth of scratches in case of micro-cutting of polished ceramic surface

Depth of scratch- ing mark, micron	The depth of the bedding depth of the chipless part of mark-scratch	
	in, micron	out, micron
11.7	6.2	6.2
48.3	3.3	3.3
47.6	3.2	4.6
42.9	3.3	3.3
34.2	3.2	3.4
26.3	3.0	3.2
21.2	2.4	2.4
14.5	5.6	5.5
7.0	5.2	5.1
14.2	3.2	3.1
11.9	5.0	3.0
9.9	1.8	1.5
20.7	3.1	3.0
16.0	3.5	3.3
15.2	5.7	5.8
16.9	1.8	2.2
27.6	2.9	2.3
26.8	2.0	2.4

The order of variance comparison has been performed in accordance with the recommendations by Fisher's criterion:

$$F_{\text{эмп}} = \frac{\sigma_{x^2}}{\sigma_{y^2}},$$

where σ_{x^2} and σ_{y^2} are variances of the first and the second sample respectively.

According to the criterion, the quantity of the numerator should be greater than the quantity of the denominator, therefore $F_{\text{эмп}}$ will always be equal to or greater than 1.

The performed analysis showed the significance of factor B with a minor impact of factor A and their interaction:

$$\frac{nS_0^2}{S_2^2} = 1,13 < 2,1, F(0,95;15;32) = 2,1;$$

$$\frac{S_A^2}{S_0^2} = 0,55 < 1,6, F(0,95;15;15) = 1,6;$$

$$\frac{S_B^2}{S_0^2} = 85 > 1,8, F(0,95;1;15) = 1,8;$$

where S_0^2 is combined variance of reproducibility and interaction; S^2 is variance of reproducibility; S_A^2 , S_B^2 are sample variances.

Thus, we obtained a statistically significant influence of the factor of surface preparation method (grinding or polishing) on the chipless depth of a mark-scratch. At the same time, we did not detect any statistical significance of the influence of the factor — the scratch depth — on the same parameter, that, in turn, confirmed the proposal made above. It was found that the maximum grain depth of penetration at which the chips are formed on the mark edges of ground samples makes up at the average 14 microns, and in case of polished samples — 4 microns. The electroscope study of the surface layer and the determination of its micro-hardness were carried out on micro-hardness testing machine.

The studies described above have revealed the presence of the defective layer in the surface layer of grounded samples (fig. 3), which has a higher viscosity and reduced fragility. In case of the sample, the outer defect layer of which was removed by polishing, the maximum depth of chip formation makes up t_2 , but in case of the ground sample the maximum depth is formed by the sum of the defect layer depth t_1 , the material of which is more inclined to the viscous plastic flow rather than to brittle fracture and the depth of penetration in source material t_3 , corresponding to t_2 for the polished sample. From these considerations, the depth defective layer was determined as $t_3 = t_1 - t_2$, which made up at the average 10 microns.

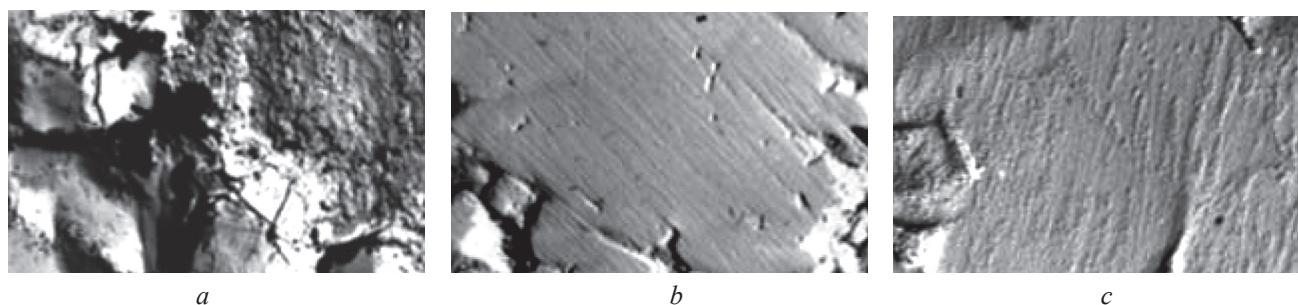


Fig. 3. The surface of silicon carbide ceramics after various surface treatment:
 a – after grinding, $\times 7800$; b – after polishing, $\times 7800$ c – after polishing, $\times 7800$

Thus, based on the Fisher criterion, the relation of influence of the method of highly rigid ceramics surface preparation (grinding, polishing) on chipless depth of grinding mark at diamond polishing has been theoretically determined and practically established.

The maximum depth of grain penetration, which leads to chips' formation on the trace edges for various methods of ceramic surface pretreatment makes up 4 – 14 mm, which is quite acceptable in the manufacture of high-precision articles and components.

References

1. **Dusko O.V.** Durable (wear-resistant) ceramic face compactions for the petrochemical industry / O.V. Dusko, D. A. Pushkarev // Abrasive machining processes, abrasive tools and materials. Grinding abrasive – 2004: The collection of papers of international scientific and technical conference. – Volga: VISTeh (branch) VolgGASU, 2004. – pp. 61 – 63.
2. **Dusko O.V.** Optimization of parameters of diamond machining silicon carbide ceramics / O.V. Dusko, V.M. Shumyacher, D. A. Pushkarev // Science and Technologies: Proceedings of the XXIV Russian school. -: Saratov State Technical University, 2004. – pp. 112 – 114.



Семенов С.С., Полтавский А.В., Маклаков В.В., Крянев А.В.

ОБЗОР МЕТОДОВ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ПРИ РАЗРАБОТКЕ СЛОЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

С переходом нашей страны на рыночные отношения существенно возросла роль этапа принятия решений при создании высокотехнологичной продукции. В данной статье рассмотрена математическая модель принятия решений при создании сложной технической системы (СТС), позволяющая выбрать предпочтительные варианты реализации СТС из числа альтернативных. Даны определения понятия «эффективность» СТС и основные критерии эффективности, приведены различные типы классификации методов принятия решений, основные свойства и проведен сравнительный анализ наиболее известных методов принятия решений, а также результаты сравнительного анализа различных методов принятия решений при оценке инновационных проектов.

Ключевые слова: системный анализ, сложная техническая система, процедура принятия решений, методы принятия решений, лицо принимающее решение, альтернативный вариант (альтернатива), эффективность, критерии эффективности, сравнительный анализ.

1. Введение и постановка задачи

Затраты на осуществление решений, связанных с СТС и процессами, непрерывно возрастают, а последствия неудачных решений становятся все серьезнее. В современных условиях опыт и интуиция не всегда оказываются в состоянии обеспечить выбор наилучшего решения. В связи с этим стали интенсивно развиваться научные методы принятия решений, возникло новое научное направление – теория принятия решений. Основное назначение теории принятия решений – помочь лицу, принимающему решение, разобраться в своем отношении к возможным последствиям выбора.

Последствия выбора различных вариантов альтернативных решений характеризуются определенной степенью достижения цели выбора и оцениваются лицом, принимающим решение (ЛПР). В сложных реальных ситуациях представления ЛПР о задаче обычно оказываются неполными и нечеткими. Эти обстоятельства не позволяют ему априори полностью проанализировать различные аспекты последствий сравниваемых вариантов решений, установить их существенность при выборе, сформировать целостное отношение к альтернативным вариантам, а значит, и сформу-

лизовать критерий выбора или целевую функцию¹. Таким образом, система предпочтений лица, принимающего решение, является слабо структурированной [1].

Для решения задач выбора разрабатываются математические модели. Использование модели позволяет провести объективный анализ и сравнение альтернативных вариантов с учетом различных аспектов их последствий, а также отношения ЛПР, к этим последствиям, структуризацию исходной содержательной задачи и сформировать критерий или, чаще всего, систему критериев выбора. В таком виде задача принятия решений становится многокритериальной.

Бурное развитие компьютерных и информационных технологий привело к тому, что начиная с 90-х годов XX в. на основе современного математического аппарата в области теории принятия решений в различных областях знаний и техники были созданы автоматизированные системы поддержки принятия решений (СППР). При этом сохраняется актуальность проблемы использования того или иного метода теории принятия решений, на базе которого создается СППР [2-10].

Целью данной обзорной статьи является рассмотрение методов теории принятия решений, которые могут быть использованы при создании СТС, в том числе и при оценке их технического уровня. Требуется показать значимость методов и моделей принятия решений при формировании новых направлений развития техники и технического облика СТС; рассмотреть процедуры и математическую модель принятия решений при создании СТС; дать понятия об эффективности СТС и основных критериях эффективности.

2. Математическое моделирование в процессе принятия решений при создании и модернизации объектов сложных технических систем

2.1. Особенности моделирования многокритериальных задач

Характерной особенностью СТС является многокритериальность, которая означает, что степень совершенства системы, качеств выполнения ею своих функций зависит от нескольких выходных характеристик. Поэтому и при проектировании системы, и при сравнении альтернативных технических решений надо учитывать вклад каждой из этих характеристик.

Основные положения, которые должны учитываться при построении многокритериальных моделей задач принятия решений следующие:

1. Модель создается исследователем для структуризации и уточнения предпочтений лица, принимающего решение, которое непосредственно участвует в ее разработке.
2. Модель должна быть логически непротиворечивой.
3. Модель должна содержать описание всех важнейших элементов задачи принятия решения, их свойств.
4. Модель должна давать возможность использования реальной информации о задаче, получаемой от экспертов и лица, принимающего решение.
5. Модель должна быть простой и удобной для анализа и использования лицом, принимающим решение.

¹ Конструктор всегда работает в условиях альтернатив: и принимая решения на участие в конкурсе, и в ходе проектирования и разработки оружия. Конечно, случаются и озарения, когда первый вариант оказывается и единственно верным. Но это исключение из правил. Выход на качественно новый уровень в разработке конструкций обеспечивают все-таки альтернативные решения. Они требуют от конструктора решительности, точности в выборе наиболее оптимального и целесообразного варианта (Калашников М.Т. Записки конструктора-оружейника. – М.: Воениздат, 1992. – 300 с. – С. 271).

Многокритериальная модель задачи принятия решений может быть представлена в следующем обобщенном виде [11]:

$$\langle t, K, X, S, P, r \rangle, \quad (1)$$

где t – постановка (тип) задачи; K – множество критериев; X – множество шкал критериев; S – множество решений; P – система предпочтений лица, принимающего решение; r – выбор окончательного решения.

Практическое проектирование неизбежно приводит к появлению альтернативных технических решений. Они возникают, когда проектирование ведется на конкурсных началах разными коллективами, а также одним коллективом. Поэтому переход от проекта к разработке и к освоению системы в производстве настоятельно требует выбрать из имеющихся альтернатив предпочтительную. Многокритериальность системы вызывает трудность решения задачи выбора, если одна из альтернатив превосходит другую по одной группе критериев, но уступает ей по другой.

Важной особенностью разработки многокритериальной модели задачи принятия решений является необходимость получения требуемой информации у людей – лица, принимающего решение, или экспертов, являющихся специалистами в определенной области знаний. Эта особенность, задач принятия решений требует специальной организации всей деятельности по разработке многокритериальной модели, ее исследованию, использованию формализованных методов сравнения вариантов решений. Организация процесса принятия решений является специфической деятельностью, требующей специальных знаний. Поэтому в процессе разработки и исследования многокритериальной модели наряду с ЛПР, и экспертами в тех областях знаний, с которыми связана исследуемая задача, как правило, участвует и консультант – специалист в области теории принятия решений.

При постановке и решении многокритериальных задач чрезвычайно важную роль играет учет большого количества содержательных обстоятельств и представлений, которым трудно дать строгое математическое обоснование. Поэтому в математической модели при решении конкретных многокритериальных задач должны быть отражены как содержательные соображения, не поддающиеся строгой формализации, так и формализованные описания задачи. Только такой совместный подход может привести к практически полезным результатам.

2.2. Структурная схема процесса построения и использования модели

Построение моделей многокритериальных задач принятия решений является сложной процедурой, состоящей из формализованных и неформализованных этапов. В процессе построения и исследования многокритериальной модели участвуют три группы лиц: лицо, принимающее решение, консультант и эксперты.

На рис. 1 в качестве примера представлена одна из множества процедур принятия решения из 13 этапов при решении дискретной многокритериальной задачи. Результаты исследования модели позволяют получить упорядочение множества допустимых решений, согласованное с принятыми допущениями и используемой информацией. Возможно построение различных вариантов моделей, достоинства и недостатки которых могут быть выявлены только на основе их сравнительного анализа и практического использования.

Рассмотрим теперь структурную схему итеративной диалоговой процедуры принятия решений.

На первом этапе осуществляется постановка задачи, т.е. устанавливается вид требуемого упорядочения вариантов решений, формируется цель предстоящего исследования и содержательное значение понятия «вариант решения».

На втором этапе формируется множество вариантов решений, проверяется возможность использования их для достижения поставленной цели, устанавливается смысл понятия «допустимость», разрабатывается способ проверки допустимости вариантов решений и выделяется их множество.

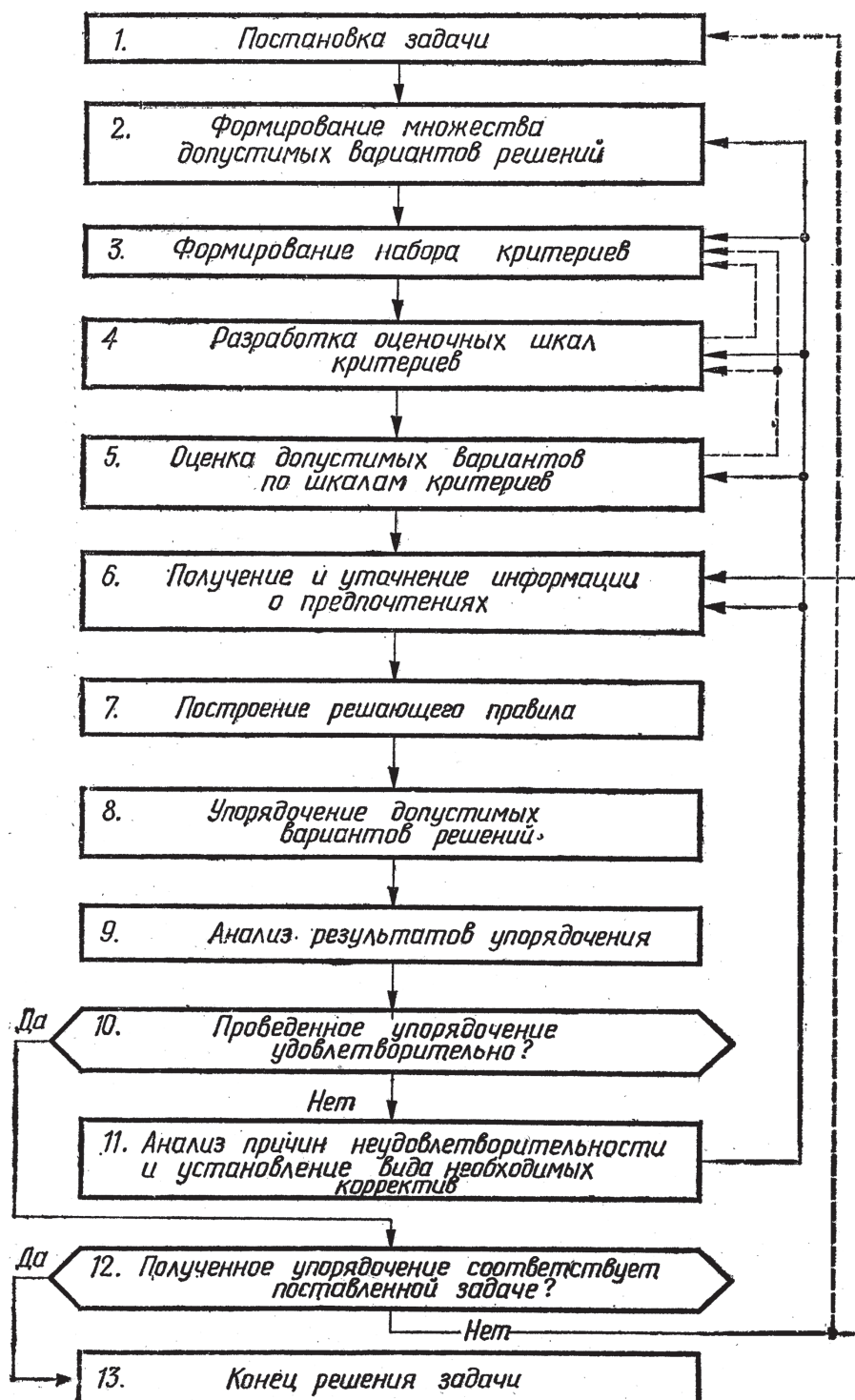


Рис. 1. Структурная схема итеративной диалоговой процедуры принятия решений

Затем (третий этап) проводится анализ возможных последствий реализации выделенных вариантов решений, определяется перечень показателей, характеризующих возможные последствия, и формируется набор критериев, достаточно полно характеризующих эти последствия.

На четвертом этапе разрабатываются оценочные шкалы выделенного набора критериев. Реализация операций третьего и четвертого этапов, представляет собой сложную процедуру. Эти два этапа очень тесно связаны друг с другом.

Для пятого этапа характерным является оценка допустимых вариантов решений по шкалам выделенных критериев.

Построение общего решающего правила, приводящего к требуемому упорядочению вариантов решений, может проводиться в несколько этапов. На шестом этапе осуществляется получение некоторой информации о предпочтениях лица, принимающего решение. Эта информация характеризует оценку влияния различных изменений оценок по шкалам критериев на общее качество (полезность, ценность) решения. После этого на седьмом этапе информация используется для построения соответствующего решающего правила. На основе построенного решающего правила проводится сравнение и упорядочение вариантов решений (этап 8). Результаты упорядочения анализируются на этапе 9.

При невозможности полученного упорядочения (этап 10) исследуются причины неудовлетворительности (этап 11). Такими причинами могут являться:

- неадекватность использованной информации или допущений интуитивным предпочтениям;
- исключение из анализа какого-либо допустимого варианта решения;
- неполнота набора критериев, используемых в модели;
- несоответствие шкал критериев возможностям оценки;
- неточности или ошибки при оценке некоторых допустимых вариантов;
- неточное определение понятия «допустимый вариант».

В зависимости от причин, которые привели к неудовлетворительности проведенного упорядочения вариантов решений, в рассматриваемую модель вносятся необходимые уточнения, дополнения или исправления (возможные коррективы указаны) и повторяются соответствующие этапы. Если упорядочение вариантов оказывается удовлетворительным (этап 10), то при использовании решающих правил, приводящих к частичному упорядочению векторных оценок, проверяется, соответствует ли его вид поставленной задаче (этап 12).

В случае, когда упорядочение вариантов решений, полученное на некотором шаге, признается лицом, принимающим решение, удовлетворительным и отвечает поставленной задаче, это упорядочение выбирается в качестве окончательного (этап 13). Если лицо, принимающее решение, действует рационально, оно должно выбрать вариант решения в соответствии с полученным упорядочением¹.

¹ Для выбора предпочтительной альтернативы между двумя вариантами СТС достаточно установить перечень частных критериев анализируемой системы $(x_1, x_2, \dots, x_n)$ и выбрать обобщенный критерий X (целевую функцию) и установить аналитическую зависимость X от частных критериев $X = \Phi(x_1, x_2, \dots, x_n)$. Затем определяется численное значение обобщенного критерия X^1 для системы варианта 1 и X^2 для системы варианта 2. Далее подставляются в выражение для обобщенного критерия численные значения частных критериев, содержащихся в проектах двух сравниваемых вариантов СТС. Предпочтительным является тот вариант, для которого обобщенный критерий имеет большую величину. Формирование обобщенных критериев на основе объективно существующих связей с частными критериями должно способствовать правильному выбору предпочтительной альтернативы. (Брахман Т.Р. Многокритериальность и выбор альтернативы в технике. – М.: Радио и связь, 1984. – 288 с. – С. 56).

3. Критерии эффективности СТС

В конечном итоге ЛПР, анализируя возможные альтернативные пути реализации достижения поставленной цели и задачи, выбирает наиболее эффективные.

Эффективность есть обобщенное определяющее функциональное свойство системы, реализующее операцию, которое раскрывается через категорию цели (желаемый результат) и объективно выражается степенью достижения цели с учетом затрат ресурсов и времени на реализацию операции [12]. Формирование критерия оценки качества принимаемых решений является одной из основных задач в процессе управления любым объектом. Для нахождения оптимального (рационального) управления (решения) необходимо установить зависимость между выбранным критерием эффективности и факторами, влияющими на его величину.

Критерий эффективности W в общем виде может быть записан следующим образом [7]:

$$W = \Phi(U, S, C), \quad (2)$$

где Φ – некоторый функционал; U – вектор управления СТС:

$$U = (u_1, u_2, \dots, u_n),$$

S – вектор, характеризующий внешнюю среду; C – вектор, характеризующий процесс (или систему).

Вектор C можно представить в виде

$$C = (K, P),$$

где вектор $K = (k_1, \dots, k_m)$ характеризует структуру системы, а вектор $P = (p_1, \dots, p_k)$ является вектором параметров (или конкретных числовых характеристик системы).

Широко известное выражение (2) можно рассматривать как математическую модель управляемого процесса (системы). С помощью этой модели можно искать наилучшее (рациональное) управление, структуру и параметры при заданной структуре.

Критерий эффективности может быть скалярным, т.е. характеризоваться одним единственным числом, или может быть векторным, характеризующимся совокупностью чисел. В соответствии с характером выбранного метода исследования и критерия принято различать однокритериальные и многокритериальные задачи принятия решений.

Классификация критериев эффективности приведена в табл. 1. При выборе критерия эффективности операции всегда следует придерживаться согласованности цели, задачам операции и критерия эффективности. В случаях, когда определен требуемый результат операции, критерий наибольшей вероятностной гарантии лучше согласован с целью операции, чем критерий наибольшего среднего результата.

Таблица 1. Классификация критериев эффективности

Критерии эффективности		
Критерий пригодности	Критерий оптимальности	Критерий адаптивности
Критерии приемлемого результата: допустимой гарантии; допустимого гарантированного результата и др.	Критерии наибольшего результата: наибольшего среднего результата; наибольшей вероятности гарантии; наибольшего гарантированного результата и др.	Критерии селекции: свободы выбора решений; самоорганизации и др.

Следует отметить, что критерий «эффективность-стоимость» широко используется в военном деле при анализе боевого применения оружия [13]. Рассмотрим соотношение между стоимостью и эффективностью системы оружия в решении поставленных задач. Обычно это соотношение выражается, как правило, графиком, показанным на рис. 2.

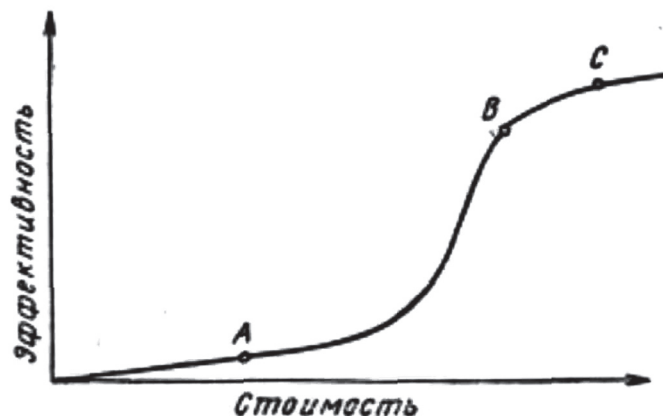


Рис. 2. Типовая кривая соотношения стоимости и эффективности систем оружия

Если некую систему оружия можно представить точкой *A* на графике, то задачи этой системы явно превышают возможности бюджета. Тогда следует либо выбрать более скромные цели, либо вовсе отказаться от такой системы оружия, либо решиться на большие расходы и создать систему оружия с характеристиками, соответствующими точке *B*. Если у нас будет достаточно средств, то можно создать систему, соответствующую точке *C*. Однако здесь мы вкладываем в систему больше денег, чем это экономически целесообразно, и следует либо искать другие системы оружия, либо ставить более ограниченные задачи. Если по оценке исследователя и того, кто использует результаты его работы, альтернативы, признанные лучшими в анализе по модели, будут приемлемы, то процесс анализа на этом заканчивается. В противном случае следует продолжать поиск других лучших альтернатив или выбрать более скромные цели.

Введение критерия «эффективность-стоимость» в виде отношения «эффективности» к «стоимости» позволяет ЛПР принимать обоснованные решения при создании СТС. Популярность данного критерия объясняется тем, что он очень прост и ясен. Отношение эффективности принимаемого решения к затратам на его реализацию показывает, с одной стороны, насколько оправданы производимые вложения, и, с другой стороны, во что может обойтись неоправданная экономия средств. Однако заложенная в нем идеология не столь проста, как кажется на первый взгляд. Дело в том, что зависимость критерия от эффективности линейная, а зависимость его от стоимости гиперболическая (рис. 3) [7]. В силу этого он отдает явное предпочтение дешевым решениям (проектам), а в дорогих относится к затратам весьма «снисходительно».

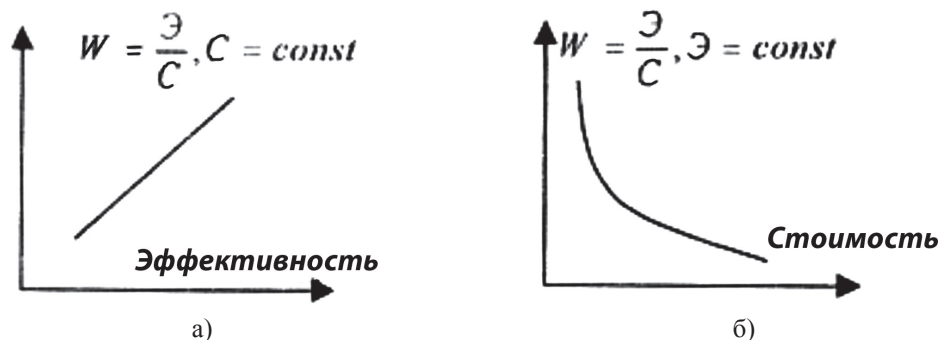


Рис. 3. Зависимость отношения
а – $W = (\mathcal{E}/C)$ от эффективности (при $C = \text{const}$); б – $W = (\mathcal{E}/C)$ от стоимости (при $\mathcal{E} = \text{const}$).

К достоинствам критерия «эффективность-стоимость» следует отнести простоту и прозрачность, к недостаткам – зависимость критерия от эффективности – линейная, а от стоимости – гиперболическая.

При обращении к критериям «эффективность-стоимость» пользователь должен внимательно относиться к тому, насколько критерий отвечает пользовательскому пониманию задачи, и корректировать его особенности путем ограничения области применения типа: «стоимость не выше, чем ...», «эффективность не ниже, чем ...».

С 28 апреля по 3 мая 2014 г. в Мексике прошел Первый международный конгресс передовой науки (The First International Congress of Advanced Science), посвященный исследованию перспектив развития человечества в XXI веке. В ходе него видные ученые разных стран мира обменивались результатами своих научных исследований по проблемам перспектив социального развития общества с учетом новейших достижений современной науки и технологий. В работе конгресса приняли участие ученые восьми стран мира: Мексики, Венесуэлы, Германии, России, Бразилии, Кубы, Китая и Норвегии.

На конференции высказывалось мнение о том, что важнейшим условием поступательного развития общества является правильно выбранная критериальная база качества общественной жизнедеятельности. При этом отмечалось, что современные подходы основываются на понятиях выгоды и прибыли, а смысл развития общества в целом и его подсистем (вплоть до отдельного человека) сводится к достижению максимальной прибыли. Такой подход ориентирует экономическую и любую другую деятельность на максимизацию прибыли, но не на прирост общественно полезного продукта. То есть целью развития общества становится не достижение в максимальной степени развития каждого отдельного человека и общества в целом, а извлечение наибольшей прибыли на всех уровнях организации общества, порой в ущерб объективным общественно значимым интересам. А это влечет разбалансировку всей системы общественного производства. Собственно, известные кризисы капитализма и являются такой разбалансировкой.

Поэтому высшим критерием эффективности любого производства на любом уровне его иерархии должно стать соответствие его потребностям общества. Эффективность общественного производства в целом должна оцениваться степенью соответствия номенклатуры и объема потребностей номенклатуре и объему производства продукции всех видов. В таком понимании такие критерии, как прибыль, выгода или рентабельность, носят сугубо частный и локальный, вспомогательный характер и не могут быть использованы в качестве главных, как это имеет место сегодня. Тогда смысл развития общества будет сводиться не к гонке за прибылью, а к устранению возникающих естественных дисбалансов, позволяя осуществлять реально бескризисное развитие общества. То есть целью развития общества становится не извлечение наибольшей прибыли, а достижение максимальной степени развития общества в целом¹.

4. Классификация методов принятия решений

Существует множество классификаций методов и моделей принятия решений, основанных на применении различных признаков [14]. При классификации каждый из элементов выражения (1) может служить ее признаком и характеризоваться следующими свойствами:

1. По виду отображения f . Отображение множества S и K может иметь детерминированный характер, вероятностный или неопределенный вид, в соответствии с чем задачи принятия решений могут быть разделены на задачи в условиях риска и задачи в условиях неопределенности.

2. По насыщенности множества K . Множество критериев выбора может содержать один элемент или несколько, что дает основание определить задачи принятия решений как задачи со скалярным критерием или задачи с векторным критерием (многокритериальное принятие решений).

¹ Сивков К. Будущее за социализмом // Военно-промышленный курьер. – 2014. – № 19 (537). – 28 мая – 3 июня. – С. 3

3. По типу системы предпочтения P . Предпочтения могут формироваться одним лицом или коллективом, и в зависимости от этого задачи принятия решений можно классифицировать на задачи индивидуального принятия решений и задачи коллективного принятия решений [15, 16].

Методы и модели индивидуального принятия решений при многих критериях можно разделить на следующие основные группы:

Блоки первой группы:

- лексикографические методы;
- аксиоматические методы многокритериальной теории полезности;
- методы сравнения многомерных альтернатив (методы доминирования, компенсации, порогов несравнимости).

Блоки второй группы:

- методы построения обобщенного критерия;
- вербальные методы;
- методы теории нечетких множеств;
- интеллектуальные методы.

Методы принятия коллективных решений можно разделить на следующие группы:

Блоки первой группы:

- методы коллективного бесконфликтного выбора;
- методы группового выбора;
- методы кооперации (распределение затрат и прибыли).

Блоки второй группы:

- динамические методы коллективного выбора в конфликтных ситуациях;
- задачи о назначениях;
- методы формирования коллективного поведения.

Краткая характеристика указанных методов приведена в монографии [15]. Используемый принцип классификации позволяет наглядно, на наш взгляд, достаточно четко выделить четыре большие группы методов, причем три группы относятся к принятию решений в условиях определенности, а четвертая – к принятию решений в условиях неопределенности.

5. Сравнительный анализ методов принятия решений при создании СТС

5.1. Обзор методов принятия решений

В области теории принятия решений за последние годы опубликовано много научных работ, посвященных как выбору вариантов при создании СТС, [15, 17-20], так и непосредственно развитию методов теории принятия решений. Среди них можно отметить монографию [15], в которой изложены методы теории принятия решений, включающие методы анализа иерархий и аналитических сетей, методы, основанные на теории нечетких множеств, метод кластерного анализа и комбинаторно-морфологического анализа и синтеза систем, эвристические методы поиска новых решений, интеллектуальные методы и системы для поддержки процедур принятия стратегических решений и методы теории полезности и теории игр. Особенности задач системного анализа и проблемы, связанные с решением многокритериальных задач рассмотрены в монографии [10], в которой изложены методы многовекторной оптимизации и многовекторного ранжирования.

Анализ методической литературы по теории принятия решений и научно-технической литературы по проектированию СТС показывает, что при выборе основных направлений развития объектов

техники и создании СТС, в том числе при оценке их технического уровня могут быть использованы следующие методы принятия решений:

- методы свертки векторного критерия;
- метод минимизации уступок;
- метод оптимизации по доминирующему критерию;
- методы ранжирования (метод парных (бинарных) отношений), метод последовательных уступок);
- метод весовых коэффициентов;
- метод идеальной точки;
- метод ЭЛЕКТРА;
- метод анализа иерархий;
- статистические методы оценки уровня качества продукции (корреляционный анализ и регрессионный анализ);
- спектральный метод ранжирования альтернативных вариантов;
- метод анализа иерархий;
- метод нечеткого отношения предпочтения;
- метод предпочтения;
- метод решающих матриц;
- метод документаций;
- метод тестов;
- метод Парето;
- метод оценки непротиворечивости суждений,
- метод смешанной альтернативы;
- метод согласования оценок;
- экспертные методы (метод Дельфи, метод комиссий, метод суда, метод «мозговой атаки» или «мозгового штурма», или «коллективной генерации идей» и разновидности – индивидуальный «мозговой штурм», массовый «мозговой штурм», письменный «мозговой штурм», двойной «мозговой штурм», обратный «мозговой штурм», конференция идей); метод взаимной оценки и самооценки, метод сложных экспертиз).

Таблица 2. Основные признаки метода ранжирования

Наименование метода	Сущность метода	Область применения	Достоинства метода	Недостатки метода	Примечание
Метод ранжирования	При ранжировании эксперт должен расположить объекты (факторы) в порядке, который представляется ему наиболее рациональным, и приписать каждому из них числа натурального ряда (1, 2, 3, и т.д.).	На практике данный метод в чистом виде используется редко. Чаще всего он используется в сочетании с другим методом упорядочения, обеспечивающим более четкое различие сравниваемых объектов.	1. Простота. 2. Оперативность. 3. Малые финансовые затраты.	1. Зависимость точности и надежности ранжирования от количества объектов. 2. Субъективность оценки. 3. Метод не дает ответа на степень удаления одного объекта от другого.	Порядковая шкала получаемая в результате ранжирования должна удовлетворять условию равенства числа рангов числу ранжируемых объектов.

Методы упорядочения могут использоваться в случаях, когда:

- затруднено использование вероятностных методов;
- из общего числа альтернатив или каких-либо характерных признаков (факторов) необходимо выделить наиболее важные;
- нужно сравнить некоторые количественные факторы, точные измерения которых связаны со значительными трудностями;
- необходимо оценить какие-либо качественные факторы, которые нельзя точно измерить, но можно сопоставить степень обладания каждым из них этим качеством («лучше», «важнее», «полезнее»). Основные свойства метода ранжирования сведены в табл. 2.

Для ЛПР при проектировании новых образцов техники или оценке их технического уровня всегда возникает вопрос целесообразности использования того или другого метода принятия решений. Еще более ответственная задача встает перед разработчиками СППР, когда они выбирают математический аппарат теории принятия решений, на базе которого разрабатывается в дальнейшем автоматизированный программно-аппаратный комплекс. Известен ряд работ, в которых приведены основные свойства популярных методов теории принятия решений и рекомендации по их использованию [5, 7, 16, 21, 22].

5.2. Пример сравнительного анализа методов принятия решений

В монографии [22] на основе обзора методов теории принятия решений, используемых при оценке СТС и других объектов, и их сопоставительного анализа рекомендованы для практического анализа: метод весовых коэффициентов, метод идеальной точки, метод ЭЛЕКТРА. В информационно-аналитической системе «Оценка и выбор» для оценки объектов имеется возможность применить два первых метода.

Сопоставительный анализ различных методов принятия решений приведен в монографии [15]. На рис. 4 приведены результаты решения задач выбора рационального инновационного проекта, полученные разными методами: метод анализа иерархий [23], метод отношения предпочтения, нечеткий метод, аддитивная свертка, максимальная свертка. Заметим, что при оценке инновационных проектов возможно использование групповой экспертизы [24].

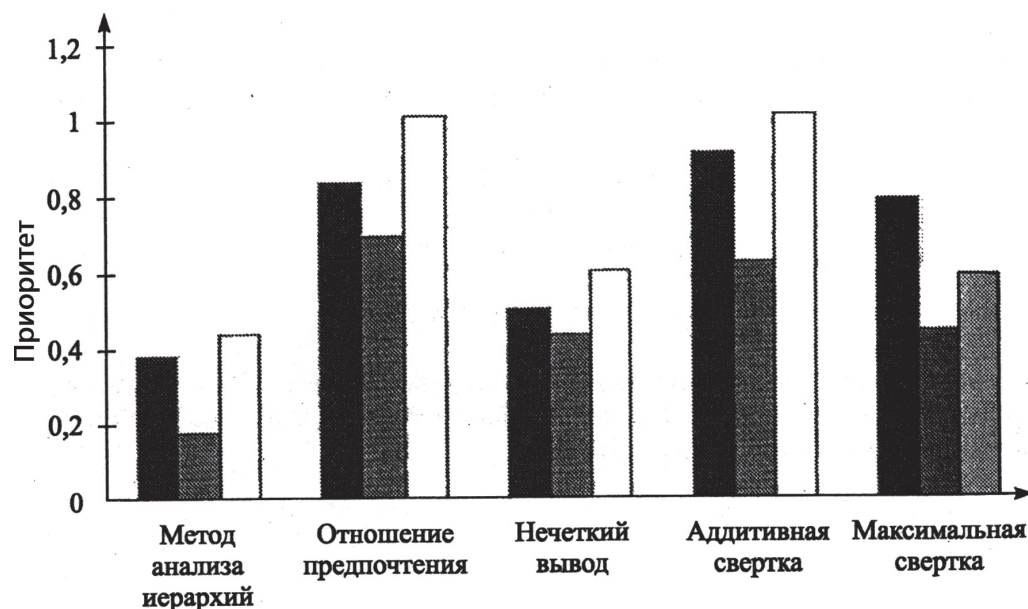


Рис. 4. Результаты сравнительного анализа, полученных различными методами принятия решений при оценке инновационных проектов

Несмотря на то, что исходная информация является последовательной и непротиворечивой, полученные результаты отличаются. Как отмечено в работе [15] несовпадение результатов, полученных разными методами, объясняется, с одной стороны, разными способами представления экспертной информации, с другой стороны, различием подходов к принятию решений. В основу метода анализа иерархий и метода отношений предпочтения заложен подход, основанный на попарных сравнениях объектов и нормированных весовых коэффициентов. Максимальная свертка использует подход, при котором лучшей считается альтернатива, имеющая минимальные недостатки по всем критериям. Аддитивная свертка предполагает подход, когда низкие оценки по критериям имеют одинаковый статус по сравнению с высокими. Нечеткий вывод реализует эвристический подход.

На основе проведенного анализа вытекает вывод, что:

- каждый метод имеет свои ограничения, исследователь должен досконально изучить метод перед его дальнейшим применением.
- основной проблемой многокритериального выбора из структур СТС является выбор критериев, а также возможные способы вычисления интегральных оценок;
- широкие возможности для представления информации дает эвристический подход.

6. Заключение

1. В ходе проведенных исследований:

- показана значимость методов и моделей принятия решений при формировании новых направлений развития техники и технического облика СТС;
- рассмотрена одна из процедур и возможная математическая модель принятия решений при создании СТС;
- приведены понятия об эффективности СТС и основные критерии эффективности;
- рассмотрены различные типы методов принятия решений.

По взглядам ведущих экономистов мира для осуществления поступательного движения общества высшим критерием эффективности любого производства на любом уровне его иерархии должно стать соответствие его потребностям общества, а не достижение максимальной прибыли.

2. Анализ источников по проблемам теории и практики принятия решений показал, что сопоставительный анализ методов принятия решений является важным фактором выбора рационального метода принятия решений для проведения конкретных практических работ и недостаточно представлен в научно-методической литературе в интересах оценки технического уровня СТС.

3. Для получения достоверных оценок о техническом уровне анализируемых объектов техники необходимо использовать новые методические подходы, основанные на комплексном моделировании и рациональном применении уже зарекомендовавших себя методов теории принятия решений.

Литература

1. **Оптнер С.А.** Системный анализ для решения деловых и промышленных проблем. – М.: Сов. Радио, 1969. – 216 с.
2. **Лотов А.В., Бушенков В.А., Каменев Г.К.** Компьютер и поиск компромисса. Метод достижимых целей. – М.: Наука, 1997. – 240 с.
3. **Трахтенгерц Э.А.** Компьютерная поддержка принятия решений. – М.: Синтек, 1998. – 376 с.

4. **Андрейчиков А.В., Андрейчикова О.Н.** Компьютерная поддержка изобретательства (методы, системы, примеры применения). – М.: Машиностроение, 1998. – 476 с.
5. **Тоценко В.Г.** Методы и системы поддержки принятия решений. Алгоритмический аспект. – Киев: Наукова думка, 2002. – 382 с.
6. **Костогрызов А.И., Нистратов Г.А.** Стандартизация, математическое моделирование, рациональное управление и сертификация в области системной и прикладной инженерии. – М.: Изд-во ВПК и 3 ЦНИИ МО РФ, 2004. – 396 с.
7. **Бомас В.В., Судаков В.А., Афонин К.А.** Поддержка принятия многокритериальных решений по предпочтениям пользователя. СППР DSB/UTES. Под ред. В.В. Бомаса. – М.: Изд-во МАИ, 2006. – 172 с.
8. **Семенов С.С.** Оценка технического уровня систем наведения управляемого авиационного оружия класса «воздух-поверхность» // Вестник компьютерных и информационных технологий. – 2006. – № 8 – С. 7-11; № 9 – С. 13-23; № 10 – С. 12-18.
9. **Лотов А.В., Поспелова И.И.** Многокритериальные задачи принятия решений. Метод достижимых целей. – М.: МАКС Пресс, 2008. – 197 с.
10. **Сафронов В.В.** Основы системного анализа: методы многовекторной оптимизации и многовекторного ранжирования. – Саратов. Научная книга, 2009. – 329 с.
11. **Гафт М. Г.** Принятие решений при многих критериях. – М.: «Знание», 1979. – 64 с.
12. Надежность и эффективность в технике: Справочник. Т. 3. Эффективность технических систем / Под общ. ред. В. Ф. Уткина, Ю. В. Крючкова. – М.: Машиностроение, 1988. – 328 с.
13. **Квейд Э.** Анализ сложных систем. Под ред. П.И. Ануреева, И. М. Верещагина. – М., Сов. радио, 1969. – 520 с.
14. **Ларичев О.И.** Теория и методы принятия решений, а также Хроника событий в Волшебных странах. – М.: Логос, 2000. – 296 с.
15. **Андрейчиков А.В., Андрейчикова О.Н.** Системный анализ стратегических решений в инноватике. Математические, эвристические и интеллектуальные методы системного анализа и синтеза инноваций. – М. Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2013. – 304 с.
16. **Андрейчиков А.В., Андрейчикова О.Н.** Анализ, синтез, планирование решений в экономике. – М.: «Финансы и статистика», 2000. – 368 с.
17. **Разумов О.С., Благодатских В.А.** Системные знания: концепция, методология, практика. – М.: Финансы и статистика, 2006. – 400 с.
18. **Дубов Ю. А., Травкин С.И., Якимец В.Н.** Многокритериальные модели формирования и выбора вариантов систем. – М.: Наука, 1986. – 296 с.
19. **Айзерман М.А., Алескерев Ф.Т.** Выбор вариантов. Основы теории. – М.: Наука, Гл. ред. физ.-мат. лит., 1990. – 237 с.
20. **Березовский Б.А., Гнедин А.В.** Задача наилучшего выбора. – М.: Наука, 1984. – 196 с.
21. **Мушик Э., Мюллер П.** Методы принятия технических решений. – М.: Мир, 1990. – 208 с.
22. **Семенов С.С., Харчев В.Н., Иоффин А.И.** Оценка технического уровня образцов вооружения и военной техники. – М.: Радио и связь, 2004. – 552 с.
23. **Саати Т.** Принятие решений. Метод анализа иерархий. – М.: Радио и связь, 1993. – 320 с.
24. **Крянев А.В., Тихомирова А.Н., Сидоренко Е.В.** Групповая экспертиза инновационных проектов с использованием байесовского подхода // Экономика и математические методы. – 2013. – 49 (2). – С. – 134-139.



Semenov S.S., Poltavsky A.V., Krianev A.V., Maklakov V.V.

OVERVIEW OF DECISION-MAKING TECHNIQUES USED IN THE DEVELOPMENT OF COMPLEX ENGINEERING SYSTEMS

With the advent of market economy in Russia the role of the decision-making stage in the development of high-technology products significantly rose in significance. The article analyzes the mathematical model of decision-making used in the development of complex engineering systems (CES) that allows identifying the optimal engineering solutions out of a number of alternatives. In order to define the “efficiency” of CES and primary criteria thereof the authors set forth a number of classifications of decision-making techniques along with their main features. They also provide the results of comparative analysis of the best known decision-making techniques, as well those used for evaluation of innovation projects.

Keywords: system analysis, complex engineering system, decision-making procedure, decision-making techniques, decision-maker, alternative, efficiency, efficiency criteria, comparative analysis.

1. Introduction and problem definition

The costs of CES-related decision-making are on a constant rise, while the consequences of wrong decisions are getting more and more severe. In the present conditions, experience and intuition do not always ensure the choice of the optimal decision. In this context, scientific decision-making methods started developing rapidly, a new scientific field, the decision-making theory, has emerged. The main purpose of the decision-making theory is to help the decision-maker clarify his or her attitude to the potential consequences of the choice.

The consequences of the choice from a number of alternatives are characterized by the degree of achievement of the goal of the choice and are evaluated by the decision-maker (DM). In complex real-life situations the decision-maker's perception of the goal is usually incomplete and unclear. That a priori does not allow him or her completely analyze the various aspects of the consequences of the compared alternative solutions, identify their importance, develop a cohesive attitude to the alternatives and therefore formulate the selection criterion or the objective function¹. Therefore, the decision-maker's system of preference is poorly structured [1].

¹ A designer always works with a number of alternative solutions, both while making the decision to participate in a contest, and during the design and development of a weapon system. In rare cases the first solution turns out to be the only correct one. That is an exception though. Qualitative improvements to designs are after all achieved by means of alternative solutions. In order to find those, the designer must show resolution and correctly choose the most optimal and viable alternative (Kalashnikov, M.T. Notes of the weapons designer. Moscow. Voenizdat, 1992. – 300 p. – P. 271).

Mathematical models are developed for the purpose of solving the choice problem. Models enable objective analysis and comparison of alternatives taking into consideration all aspects of consequences, as well as the DM's attitude to those consequences, structuring of the initial task and generation of the selection criterion, or, in most cases, a system of criteria. Thus, the decision-making task becomes multicriterial.

The rapid development of computer and information technologies in the 1990s paved the way for the creation of automated decision support (ADS) systems based on advanced mathematical tools of decision-making theory covering various fields of knowledge and technology. Nevertheless, the problem of application of particular ADS-defining decision-making methods still remains [2-10].

The purpose of this article is to provide an overview of the decision-making methods that can be used in the development of CESs, namely for their performance evaluation. The goal is to demonstrate the significance of the decision-making methods and models involved in the development of new opportunities in technology and CES design; analyze the procedures and mathematical model of decision-making in CES development; introduce the concepts of CES efficiency and primary criteria of efficiency.

2. Mathematical simulation in decision-making as part of development and modernization of complex engineering systems

2.1. Distinctive features of modeling of multicriterial tasks

The distinctive feature of a CES is its multicriteriality, which means that the level of sophistication of a system and the quality of its performance depend on a number of output characteristics. Therefore, the design of a system and comparison of alternative technical solutions should take into consideration the contribution of each of the said characteristics.

Below are the primary considerations that should be taken into account when designing multicriterial decision-making models:

1. The model is designed for the sole purpose of structuring and specification of the preferences of the decision-maker directly involved in the development.
2. The model must be logically consistent.
3. The model must contain the description of all important elements of the decision-making tasks and their properties.
4. The model must enable the use of actual information regarding the task received from experts and the decision-maker.
5. The model must be simple and well-behaved and easily usable by the decision-maker.

A multicriterial model of a decision-making task can be represented in the following generalized form:

$$\langle t, K, X, S, P, r \rangle, \quad (1)$$

where t is the task definition (type); K is the set of criteria; X is the set of criteria scales; S is the set of solutions; P is the system of preferences of the decision-maker, r is the choice of the final decision.

Practical design inevitably generates alternative engineering solutions. They arise when design is performed by different teams on competitive basis or by a single team. That is why the transition from the design to the development and manufacturing of a system requires the selection of the most preferable alternative. The multicriteriality of a system complicates the decision-making process if one of the alternatives is superior to another in one group of criteria and inferior in another.

The development of a multicriterial decision-making model is characterized by the requirement to request necessary information from people, i.e. the decision-maker and subject matter experts. This feature of the decision-making tasks requires a specific organization of the whole process of multicriterial model development, its evaluation, application of formalized methods of alternatives comparison. The organization of the decision-making process requires special knowledge. Therefore, the development and subsequent evaluation of a multicriterial model involves not only the DM and subject area experts, but also a consultant who specializes in decision-making theory.

Most importantly, the definition and solution of multicriterial tasks must take into consideration a large number of essential circumstances and notions that are difficult to justify mathematically. Therefore, mathematical models intended for solving specific multicriterial tasks must reflect both conceptual considerations that are impossible to properly formalize and formalized task descriptions. Only this comprehensive approach can ensure practically useful results.

2.2. Structure of the model design and application process

The design of multicriterial decision-making models is a complex procedure that includes formalized and non-formalized stages. The process of design and evaluation of a multicriterial model involves three groups of people: the decision-maker, the consultant and the experts.

Fig. 1 shows an example out of a large number of decision making procedures that consists of 13 stages of a discrete multicriterial problem solution. The results of model evaluation allow obtaining ranked sets of allowable solutions coordinated with the specified assumptions and used information. Several versions of a model can be designed. Their advantages and disadvantages can be identified only by comparative analysis and practical application.

Let us examine the structure of the iterative decision-making procedure.

At the first stage, the task is defined, i.e. the required ranking of alternative solutions is specified, the purpose of the research and meaning of the “alternative solution” are defined.

At the second stage, a set of alternative solutions is generated, their applicability for the purpose of the defined goal is verified, the meaning of the term “acceptability” is specified, the solution applicability verification procedure is developed and a set of such alternative solutions is identified.

At the third stage, the possible consequences of the identified alternative solutions are analyzed, the list of indicators characterizing the possible consequences is drawn up, a set of criteria that characterize those consequences in sufficient detail.

At the fourth stage, evaluation scales for the identified set of criteria are developed. The implementation of the third and fourth stage activities is a complex procedure. Those two stages are closely connected to each other.

At the fifth stage, the acceptable alternative solutions are evaluated using the scales of identified criteria.

The general decision rule that ensures the required ranking of alternative solutions can be designed step by step. At the sixth stage, information regarding the decision-maker’s preferences is obtained. This information defines the assessment of the impact of various changes in ratings on the general quality (utility, value) of a solution. At the seventh stage, the information is used to generate the respective decision rule. The decision rule is used to compare and rank the alternative solutions (stage 8). The ranking results are analyzed at stage 9.

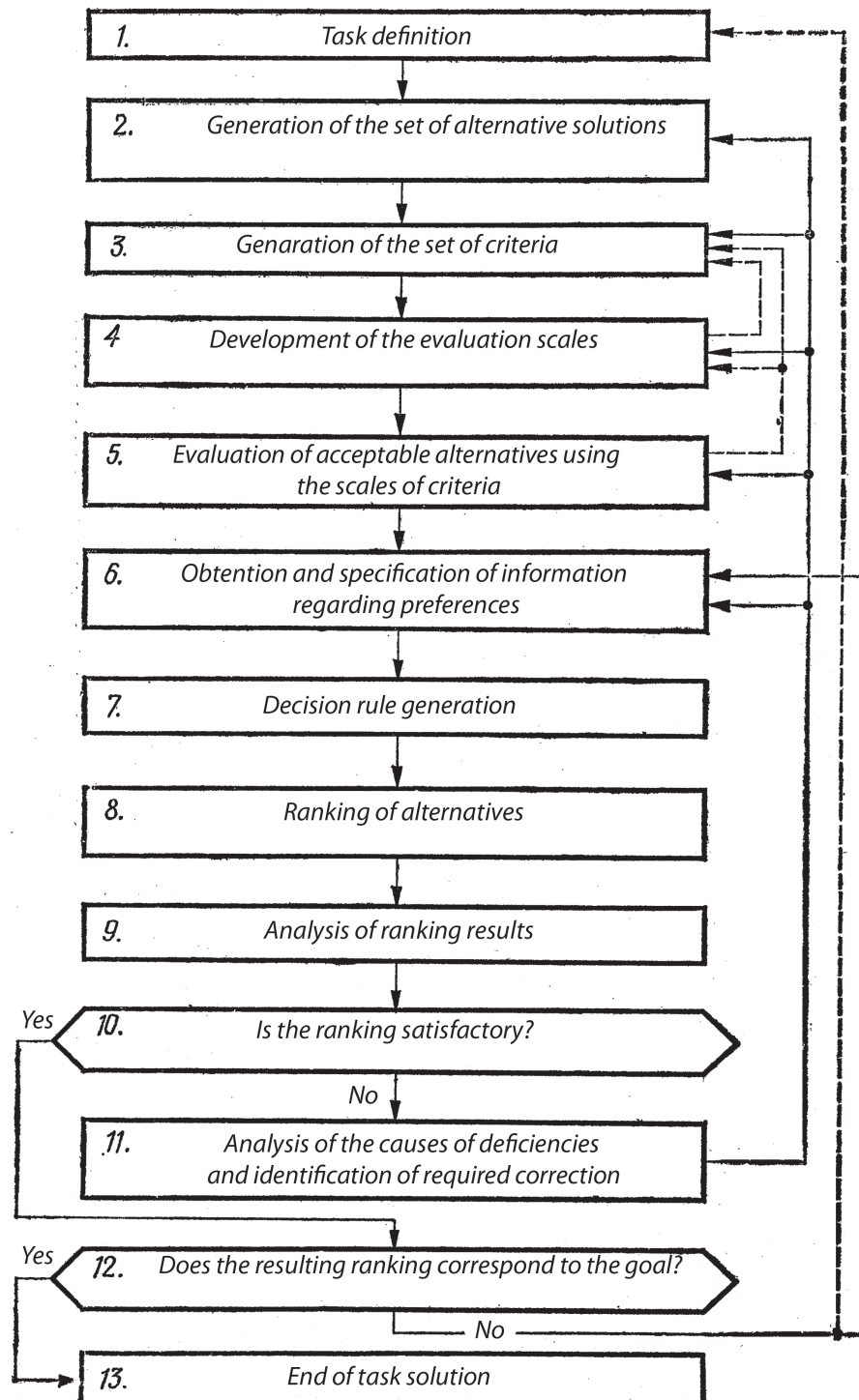


Fig. 1. Structure of the iterative decision-making procedure

If ranking is impossible (stage 10) the causes of the deficiency are examined (stage 11). The possible causes are:

- unconformity of the used information or assumption with intuitive preferences;
- exclusion of an acceptable alternative solution from the analysis;
- incomplete set of criteria used in the model;
- unconformity of criteria scales with the evaluation capability;
- inaccuracies or errors in the evaluation of some of the acceptable alternatives;
- inaccurate definition of an “acceptable alternative”.

Depending on the causes of unsatisfactory ranking, the model is amended and all necessary stages are repeated. If the ranking of alternatives is satisfactory (stage 10), the decision rules that ensure partial ranking of vector evaluations are used upon verification of its compliance with the specified purposes (stage 12).

In case when the ranking of alternatives obtained at a certain stage is considered by the decision-maker as being satisfactory and compliant with the specified purpose, the ranking is accepted as final (stage 13). If the decision-maker acts rationally, he or she must choose the alternative in accordance with the obtained ranking¹.

3. CES efficiency criteria

Finally, by analyzing the available alternative solutions the DM chooses the most efficient one.

Efficiency is the generalized constitutive functional property of a system that implements an operation, is defined by the goal (expected result) and objectively expressed through the degree of goal completion subject to the costs and operation implementation time [12]. The development of decision quality evaluation criterion is one of the primary goals in any object management activity. In order to find the optimal (rational) management (solution), it is required to establish the dependence of the chosen efficiency criterion on the factors affecting its magnitude.

The efficiency criterion W can generally be written as follows [7]:

$$W = F(U, S, C), \quad (2)$$

where F is a functional; U is a CES control vector:

$$U = (u_1, u_2, \dots, u_n)$$

S is a vector that defines the environment; C is a vector that defines the process (or system). Vector C can be represented as

$$C = (K, P),$$

where the vector defines the structure of the system, while vector is the parameter vector (or specific numerical characteristics of the system).

The widely known expression (2) can be considered as the mathematical model of a controlled process (system). This model can help find the best (rational) control, structure and parameters specific to the given structure.

The efficiency criterion can be scalar, i.e. be defined by a single number, or vectorial that is defined by a set of numbers. Depending on the nature of the chosen research method and criterion, monocriterial and multicriterial decision-making tasks are usually distinguished.

¹ In order to choose the preferable alternative out of two CES solutions, it suffices to establish a list of partial criteria of the analyzed system ($x_1, x_2, \dots, x_n$) and choose the generalized criterion X (objective function) and establish the analytic dependence of X from the partial criteria $X = F(x_1, x_2, \dots, x_n)$. Then, the value of the generalized criterion X^1 is determined for the system variant 1 and X^2 for the system variant 2. Further, the values of the partial criteria from the designs of the two compared CESs are inserted in the formula of the generalized criterion. The preference is given to the alternative that features the highest generalized criterion value. Generation of generalized criteria on the basis of real connections with partial criteria should help choose the correct preferable alternative (Brakhman, T.R. Multicriteriality and choice of alternative in technology. Moscow. Radio i sviaz, 1984. – 288 p. – P. 56).

The efficiency criteria classification is given in table 1. The choice of an operation's efficiency criterion must always ensure conformity of the goal with the purpose of the operation and the efficiency criteria. In cases when the required result of the operation is defined, the maximum probabilistic guarantee criterion is more consistent with the purpose of the operation than the maximum average result criterion.

Table 1. Efficiency criteria classification

Efficiency criteria		
Suitability criterion	Optimality criterion	Adaptability criterion
Acceptable result criteria: acceptable guarantee; acceptable guaranteed results, etc.	Maximum result criteria: maximum average result; maximum probable guarantee; maximum guaranteed result, etc.	Selection criteria: freedom of decision-making; self-organization, etc.

It should be noted that the cost-effectiveness criterion is widely used in the analysis of combat deployment of weapon systems [13]. Let us examine the cost-effectiveness ratio of a weapons system for the purpose of the current tasks. Normally, this ratio is expressed in the graph shown in fig. 2.

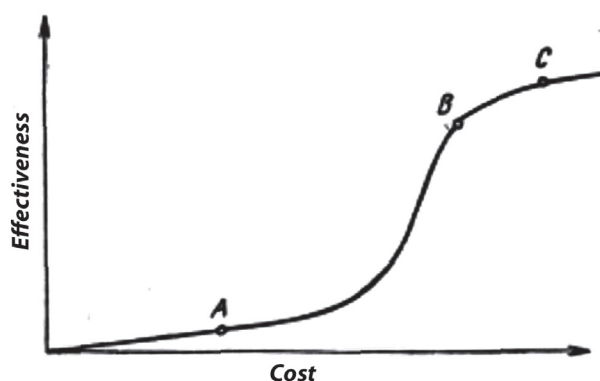


Fig. 2. Standard curve of weapon systems cost-effectiveness ration

If a weapon system can be represented as point A on the graph, then the tasks of the system clearly exceed the budget. In that case either more humble goals should be set, or the whole weapon system should be abandoned, or higher expenditure accepted in order to ensure the development of a weapon system with performance corresponding to point B. If sufficient funding is provided, a system with performance corresponding to point C can be developed as well. However, that would mean that we invest more funds than economically feasible, and we should either look for other weapon systems or set more conservative goals. If, according to the researcher and the person who uses the results of his or her activity, the alternatives identified as the best as the result of model-based analysis, are acceptable, the analysis process concludes. Otherwise, the search for better alternatives should continue or more humble goals should be set.

The introduction of the cost-effectiveness criterion as the relation between the «effectiveness» and «cost» allows the DM to make justified decisions in designing CESs. The popularity of this criterion is due to the fact that it is very simple and clear. The correlation between the effectiveness of a decision taken and the cost of its implementation shows, on the one hand, how much the investments are justified and, on the other hand, the consequences of unjustified cost cutting. However, this philosophy is not as simple as it may initially seem. The dependence of the criterion from the effectiveness is linear, while its

dependence from the cost is hyperbolic (fig. 3). [7]. Due to that it gives clear preference to cheap solutions (projects), while in expensive ones it is quite «condescending» to the costs.

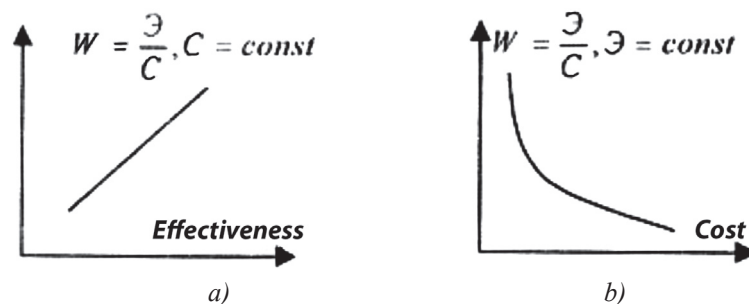


Fig. 3. Dependence of the relation
 a – $W = (E/C)$ on the effectiveness ($C = \text{const}$); b – $W = (E/C)$ on the cost ($E = \text{const}$)

One of the advantages of the cost-effectiveness criterion is that it is simple and transparent. Its disadvantage is that the dependence of the criterion from the effectiveness is linear, yet the dependence of the criterion on the cost is hyperbolic.

When using the cost-effectiveness criterion, the user should be fully aware if the criterion corresponds to his or her understanding of the task and address its disadvantages by limiting the application area as: “cost not higher than ...”, “effectiveness not lower than ...”.

From April 28 to May 3, 2014 in Mexico hosted the First international Congress of advanced science (The First International Congress of Advanced Science devoted to the study of the prospects of development of mankind in the XXI century. During eminent scientists from different countries exchanged the results of their scientific research on the prospects of social development of the society, taking into account the latest achievements of modern science and technology. The Congress was attended by scientists from eight countries: Mexico, Venezuela, Germany, Russia, Brazil, Cuba, China and Norway.

The conference expressed the view that the most important condition for the development of society is correctly selected criteria base the quality of public life.

It was noted that current approaches are based on the concepts of gain and profit, and the sense of the development of society as a whole and its subsystems (up to the individual person) is reduced to achieve maximum profit.

This approach directs economic and other activities on Maxi-optimization profit, but not on the growth of socially useful product. That is the purpose of development of society is not achieving the maximum extent of development of each individual and society as a whole, and extract the maximum profit at all levels of society, sometimes to the detriment of the objective with significant public interest. And this leads to the imbalance of the whole system of social production. In fact, the well-known crises of capitalism are such an imbalance.

Therefore, the highest criterion of efficiency of any production at any level of its hierarchy should be the needs of society.

The efficiency of social production as a whole should be evaluated by the degree of conformity of range and volume needs of the nomenclature and production of all kinds.

In this understanding, criteria such as income, profit or rent-turn profits are purely private and local, auxiliary in nature and may not be used as the main, as is the case today.

Then the sense of the development of society is not confined to race for profit, but to the elimination of appearing natural imbalances, allowing real crisis-free development of society. That is the purpose of development of society is not extracting the most profit, and achievement of the maximum degree of development of society as a whole¹.

¹ Sivkov K. Future for socialism // Military-industrial courier. - 2014. - № 19 (537). - 28 May - 3 June. - 3 p.

4. Classification of decision-making methods

There are a number of decision-making methods and models classifications based on various attributes [14]. In a classification, each of the elements of the expression (1) may serve as its attribute and be characterized by the following properties:

1. By presentation f . The presentation of the sets S and K may be deterministic, probabilistic or undetermined, whereby the decision-making tasks may be divided into tasks under risk and tasks under uncertainty.

2. By saturation of set K . A set of choice criteria may contain one or more elements, thus the decision-making tasks may be defined as tasks with scalar or vector criterion (multicriterial decision-making).

3. By system of preferences P . Preferences may be defined by one person or a team, subject to which the decision-making tasks can be classified as individual and collective [15].

The individual decision-making methods and models with multiple criteria may be divided in the following main groups:

The first group includes:

- lexicographic methods;
- axiomatic methods of the multicriterial utility theory;
- methods of comparison of multidimensional alternatives (domination methods, compensations, non-comparability thresholds).

The second group includes:

- methods of generalized criterion construction;
- verbal methods;
- methods of the fuzzy sets theory;
- intellectual methods.

The collective decision-making can be divided into the following groups:

The first group includes:

- methods of collective conflict-free decision-making;
- methods of collective selection;
- cooperation methods (expenses and profits distribution).

The second group includes:

- dynamic methods of collective selection in conflict situations;
- problems of allocation;
- collective behavior-shaping methods.

A brief description of the above methods is given in monograph [15]. The utilized classification principle allows for, as we think, a clear definition of four major groups of methods. Three of them pertain to decision-making under certainty, while the fourth one to decision-making under uncertainty.

5. Comparative analysis of decision-making methods in CES design

5.1. Overview of the decision-making methods

Over the past few years, a significant number of scientific papers in decision-making theory have appeared. They deal both with the selection of alternatives in CES design [15, 18-20], and the development of decision-making methods. Among those we can note monograph [15] that details the decision-making

methods, including hierarchy analysis methods and analytic network methods, as well as methods based on the fuzzy sets theory, cluster analysis method and combinatorial morphological analysis and synthesis of systems, heuristic methods of search for new solutions, intellectual methods and systems of strategic decision support and methods of the utility theory and game theory. The specificity of system analysis and multicriterial task solving problems is covered in monograph [10] that details the methods of multivector optimization and multivector classification.

The analysis of methodological decision-making theory literature, as well as scientific and technical CES design literature shows that the following decision-making methods can be used for the purpose of selecting primary areas of technology and CES development, namely performance evaluation:

- methods of convolution of vectorial criterion;
- tradeoffs minimization method;
- method of optimization based on the dominant criterion;
- ranking methods (binary relation method, successive tradeoff method);
- weight coefficient method;
- ideal point method;
- ELECTRA method;
- analytic hierarchy method;
- statistical methods of product quality evaluation (correlation analysis and regression analysis);
- spectral method of alternatives ranking;
- analytic hierarchy method;
- method of fuzzy preference relation;
- preference method;
- decision matrix method;
- documentation method;
- test method;
- Pareto method;
- reasoning consistency evaluation method;
- mixed alternative method;
- consensus method;

Table 2. Primary features of the ranking method

Name of the method	Essence of the method	Application area	Advantages of the method	Disadvantages of the method	Notes
Ranking method	While performing the ranking, the expert must arrange the objects (factors) in an order that appears to be the most rational and assign a counting numeral (1, 2, 3, etc.) to each of them.	In practice, this method in its pure form is rarely used. In most cases it is used along with another ranking method that ensures a clearer distinction of the compared objects.	Simplicity Promptness Low cost	Dependence of precision and reliability of ranking on the quantity of objects. Subjective evaluations. The method does not allow identifying the distance from one object to another.	The order scale generated as the result of ranking must meet the requirement of the number of ranks being equal to the number of ranked objects.

– expert evaluation methods (Delphi method, commission method, court method, brainstorming method and its variants, i.e. individual brainstorming, mass brainstorming, written brainstorming, dual brainstorming, reverse brainstorming, idea conference); mutual evaluation and self-evaluation method, complex examination method).

Methods of ordering can be used if:

- the use of probabilistic methods is complicated;
 - it is required to identify the most important alternatives or distinctive features out of a total number thereof;
 - it is required to compare certain quantitative factors that are very difficult to accurately measure;
 - it is required to evaluate certain qualitative factors that are impossible to accurately measure, but it is possible to compare to which extent they possess the said quality (“better”, “more important”, “more useful”).
- The primary features of the ranking method are given in table 2.

During the design of new technology or performance evaluation, a DM must always answer the question of applicability of certain decision-making methods. ADS developers face an even more demanding challenge when they choose the mathematical tools of decision-making that are subsequently used in the development of an automated hardware and software system. There are a number of papers that detail the key features of popular decision-making methods and guidelines to their application [5, 7, 16, 21, 22].

5.2. An example comparative analysis of decision-making methods

Monograph [22] gives an overview and comparative analysis of decision-making methods used in performance evaluation of CESs and other objects and recommends studying the weight coefficient method, ideal point method and ELECTRA method. In the Otsenka i Vybor (Assessment and Choice) system an object can be evaluated using the first two methods.

A comparative analysis of various decision-making methods is given in monograph [15]. fig. 4 shows the results of a rational innovative project selection generated using a number of methods: analytic hierarchy method [23], preference relation method, fuzzy method, additive convolution, maximum convolution. It should be noted that innovative projects can be evaluated by a group of experts [24].

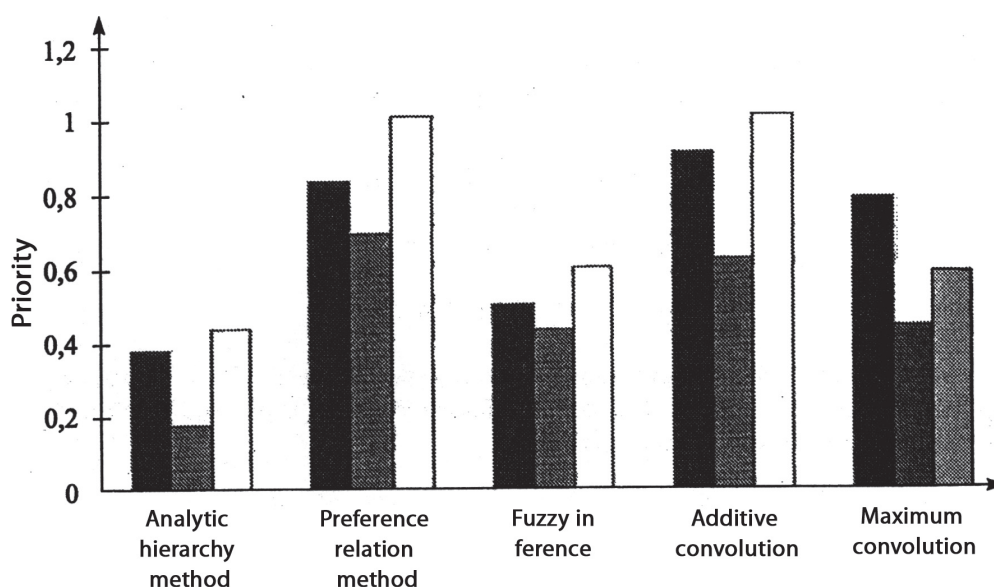


Fig. 4. Results of comparative analysis obtained using various decision-making methods as part of innovation projects evaluation

Despite the fact that the input information is consistent, the results differ. As it is noted in [15], the mismatching results can be explained, on the one hand, by different representations of expert information and different approaches to decision-making, on the other hand. The analytic hierarchy method and the preference relation method are based on the approach that involves pair-wise comparison of objects and standard weight coefficients. The maximum convolution uses the approach that is based on the assumption that the best alternative is the one with minimum drawbacks according to all criteria. The additive convolution uses the approach when low ratings have equal status compared to the high ones. The fuzzy inference implements the heuristic approach.

The performed analysis shows that:

- each method has its restrictions and the researcher must get acquainted with a method before using it;
- the main problem of multicriterial choice in CES design is the choice of criteria, as well as the possible integral estimations calculation;
- the heuristic approach provides ample opportunities of information representation.

6. Conclusion

1. In the course of the performed research:
 - the significance of the decision-making methods and models involved in the development of new opportunities in technology and CES design was demonstrated;
 - one of the procedures and the possible mathematical model of decision-making in CES development were analyzed;
 - CES effectiveness was defined along with the criteria thereof;
 - various types of decision-making methods were examined.
2. An analysis of sources regarding the theory and practice of decision-making has demonstrated that comparative analysis of decision-making methods is an important factor in choosing the rational decision-making method as part of practical activities and is underrepresented in scientific and methodological literature as a CES performance evaluation method.
3. A reliable evaluation of technology performance requires the application of new approaches based on comprehensive modeling and rational use of proven decision-making methods.

References

1. **Optner S.L.** Systems Analysis for Business and Industrial Problem Solving. Moscow. Sov. Radio, 1969. – 216 p.
2. **Lotov A.V., Bushenkov V.A., Kamenev G.K.** Computer and search for balanced tradeoff. The Feasible Goals Method. Moscow. Nauka, 1997. – 240 p.
3. **Trakhtengerts E.A.** Computer support of decision-making. Moscow. Sintek, 1998. – 376 p.
4. **Andreichikov A.V., Andreichikova O.N.** Computer support of invention process (methods, systems, examples of application). Moscow. Mashinostroyeniye, 1998. – 476 p.
5. **Totsenko V.G.** Decision Support Systems and Methods. Algorithmic aspect. – Kiev: Naukova dumka, 2002. – 382 p.
6. **Kostogryzov A.I., Nistartov G.A.** Standardization, mathematical modeling, rational management and certification in the field of system and software engineering. Moscow. Publishing house of VPK and 3 TsNII MO RF, 2004. – 396 p.
7. **Bomas V.V., Sudakov V.A., Afonin K.A.** Support of multicriterial decision-making based on user preferences. SPPR DSB/UTES. Edited by Bomas, V.V. Moscow. Publishing house MAI, 2006. – 172 p.

8. **Semionov S.S.** Performance evaluation of the guidance systems of air-to-surface aircraft weapon systems. *Vestnik kompiuternykh i informatsionnykh tekhnologiy*. – 2006. – No. 8 – P. 7-11; No. 9 – P. 13-23; No. 10 – P. 12-18.
9. **Lotov A.V., Pospelova I.I.** Multicriterial tasks of decision-making. The Feasible Goals Method. Moscow. MAKS Press, 2008. – 197 p.
10. **Safronov V.V.** Introduction to system analysis: methods of multivector optimization and multivector classification. Saratov. Nauchnaya kniga, 2009. – 329 p.
11. **Gaft M.G.** Decision-making with multiple criteria. Moscow. Znanie, 1979. – 64 p.
12. Technology dependability and efficiency: Reference book. Efficiency of engineering systems / Edited by V. F. Utkin, Yu.V. Kriushkov. Moscow. Mashinostroenie, 1988. – 328 p.
13. **Quade E.** Complex system analysis. Edited by Anureev, E.E., Vereshchagin, I.M. Moscow, Sov. radio, 1969. – 520 p.
14. **Larichev O.I.** Theory and methods of decision-making and Chronicle of events in magic lands. Moscow. Logos, 2000. – 296 p.
15. **Andreichikov A.V., Andreichikova O.N.** System analysis of strategic decisions in innovation theory. Mathematical, heuristic and intellectual methods of system analysis and innovation synergy. – Moscow. Knizhny dom LIBROKOM, 2013. – 304 p.
16. **Andreichikov A.V., Andreichikova O.N.** Analysis, synthesis, decision planning in economics. Moscow. Financy i statistika, 2000. – 368 p.
17. **Razumov O.S., Blagodatskikh V.A.** System knowledge: concept, methodology, practice. Moscow. Financy i statistika, 2006. – 400 p.
18. **Dubov Yu.A., Travkin S.I., Yakimets V.N.** Multicriterial models of development and selection of system options. Moscow. Nauka, 1986. – 296 p.
19. **Aizerman M.A., Aleskerov F.T.** Selection of options. Foundations of the theory. Moscow. Nauka, Main office of physics and mathematics literature, 1990. – 237 p.
20. **Berezovsky B.A., Gnedin A.V.** The problem of optimal choice. Moscow. Nauka, 1984. – 196 p.
21. **Mushin E., Muller P.** Methods of engineering decision-making. Moscow. Mir, 1990. – 208 p.
22. **Semionov S.S., Kharchev V.N., Ioffin A.I.** Performance evaluation of weapon systems and hardware. Moscow. Radio i svyaz, 2004. – 552 p.
23. **Saaty, T.** Decision making. Analytic hierarchy method. Moscow. Radio i svyaz, 2003. – 320 p.
24. **Krianov A.V., Tikhomirova A.N., Sidorenko E.V.** Group expert evaluation of innovation projects using the Bayesian approach. *Ekonomika i matematicheskie metody*. – 2013. – 49 (2). – P. – 134-139.



Шубинский И.Б., Шебе Х.

СИСТЕМАТИЧЕСКИЙ ПОДХОД К ЗАЩИТЕ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ОТ СБОЕВ АППАРАТУРЫ

В статье описывается суть сбойных ошибок, их возникновение и воздействие на результаты функционирования системы. Рассматриваются методы обнаружения сбойных ошибок. Описываются методы защиты от сбоев и предлагается комплексный подход к обеспечению устойчивости системы к сбоям. Принцип, который излагается в статье, показывает каким основным свойством должна обладать устойчивая к сбоям система. Далее приводится пример и заключение по результатам исследования.

Ключевые слова: сбои, сбойные ошибки, помехи, искажение данных, искажение последовательности программы, устойчивость к сбоям.

1. Введение

Обычно в теории надежности и безопасности много внимания уделяют отказам, в особенности опасным. Однако помимо них существуют другие события, которые на первый взгляд кажутся гораздо менее важными. Это – сбои [1,2].

Сбои определяются следующим образом. Сбой функционального характера – событие, заключающееся в однократном искажении перерабатываемой или хранящейся в информационной технике информации, возникающее под воздействием внутренних или внешних дестабилизирующих факторов (помех) [1].

Тема становится более актуальной по двум причинам. Во-первых, миниатюризация вычислительной техники приводит к растущей чувствительности аппаратных средств. Во-вторых, ослабление магнитного поля земли приводит к увеличению попадания на землю заряженных космических частиц. В результате частота сбоев на три и более порядка превышает частоту отказов технических средств [1]. В данной статье предлагается подход к созданию устойчивой по отношению к сбоям системы.

2. Сбои

В информационных системах (ИС) сбои, которые относятся к категории перемежающихся отказов, не оказывают существенного влияния на надежность функционирования ИС. Это объясняется следующими основными причинами:

Многие ИС относятся к категории критически важных систем. Поэтому при создании средств информационной техники применяются специальные меры по стабилизации в приемлемых границах температуры и влажности, обеспечивается качественное кондиционирование помещений и стативов, тщательное проектирование электрических режимов, исключение событий «гонок и состязаний сигналов» и др.;

Многие информационные системы работают в реальном масштабе времени и в директивные сроки выполняют строго определенные информационные функции. Для этих систем приоритетное влияние на результаты функционирования оказывают сбои функционального характера, т.е. такие сбои техники, которые при определенных обстоятельствах могут привести к ошибкам в управлении и иметь серьезные последствия для работы всей системы в целом и даже для окружающей среды;

Сбои характеризуются тем, что они существуют очень короткое время. Они возникают в аппаратных средствах и исправляются сами по себе, т.е. аппаратные средства возвращаются в исходное физическое состояние, но не обязательно в исходное функциональное состояние.

Сбои аппаратных средств могут быть вызваны следующими причинами:

Помехи по входам и цепи питания (рис.1.)

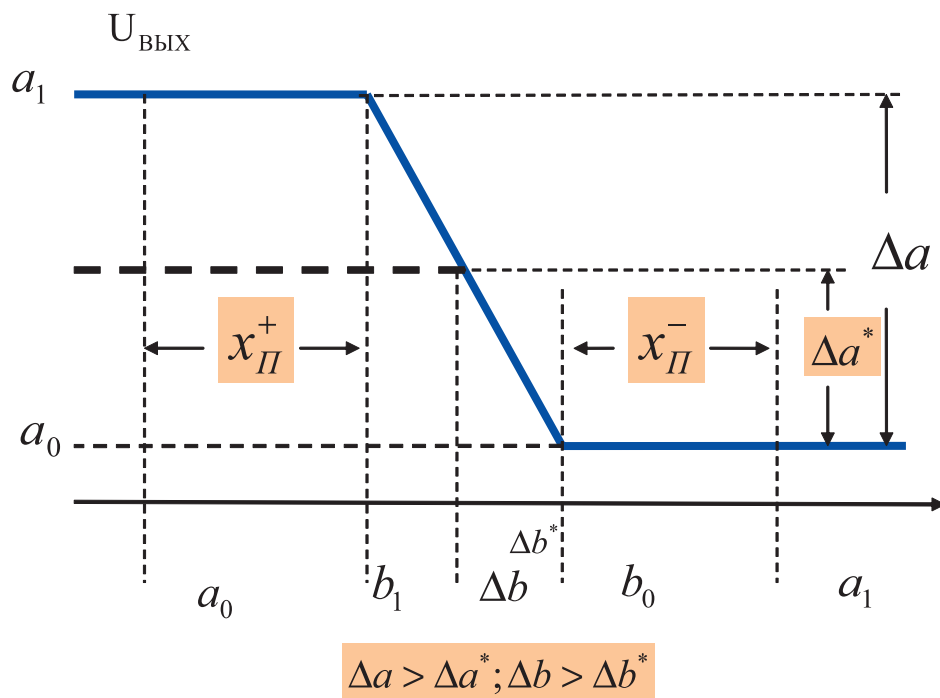


Рис. 1. Типовая передаточная характеристика цифровой интегральной схемы

Реальная передаточная характеристика схемы может быть аппроксимирована кусочно-линейной функцией. На рис. 1 приведен пример типовой передаточной характеристики и указаны ее параметры: a_i ($i = 1, 0$) — выходной уровень напряжения логической единицы или нуля; b_i — пороговое значение входного сигнала при переключении типа $1 \rightarrow 0$ ($i = 1$) или типа $0 \rightarrow 1$ ($i = 0$); $\bar{b} = \frac{b_1 + b_0}{2}$;

возможная ширина зоны переключения $\Delta b = |b_1 - b_0|$. На типовой передаточной характеристике выделяются три области, соответствующие различным состояниям схемы. Область I — закрытое состояние, область III — открытое состояние схемы, а промежуточная область II — состояние пере-

ключения. Под воздействием отпирающей помехи возможен переход схемы из области I в область III, т.е. неправильное формирование на выходе схемы кода „I“ вместо кода „0“ (сбой типа $I \rightarrow 0$). Под воздействием запирающей помехи возможен сбой типа $0 \rightarrow I$.

Из рис. 1 следует, что при заданной величине логического перепада Δa технологический разброс пороговых напряжений b_1 и b_0 приводит к уменьшению максимально допустимых амплитуд отпирающей x_{II}^+ и запирающей x_{II}^- помех, а, следовательно, к снижению статической помехоустойчивости схемы. Аналогичный результат имеет место при уменьшении логического перепада Δa , который осуществляется в интересах повышения быстродействия схем. Чем меньше величина логического перепада $\Delta a^* < \Delta a$, тем меньше время переключения схемы $\Delta b^* < \Delta b$ и, следовательно, тем выше ее быстродействие.

Экспериментальные данные по сбоям интегральных схем отсутствуют. Для оценки характеристик сбоев применяются экспериментально-расчетные методы прогнозирования, основанные на экспериментальных данных о входных сигналах и помехах, передаточных и амплитудно-частотных характеристиках схем. Эти данные являются исходными для расчета диапазона возможных вероятностей сбоя цифрового логического элемента в интегральном исполнении, который часто именуют вентилем по аналогии с транзистором в элементной базе второго поколения. По полученным расчетным значениям сбоев вентилях, известной структуре и реализуемым логическим функциям рассчитываются вероятности и интенсивности сбоев ЦИС.

Помехи электромагнитного характера

Если помехи могут воздействовать на систему через входы, питание и массу, то система также может быть подвержена электромагнитному излучению. Вследствие этого может индуцироваться ток, представляющий собой помеху. Эта помеха действует таким же методом на контакты ИС, как помеха, прямо проходящая по контактам и проводам и как это описано выше.

Пролет радиоактивных частиц

Третий механизм – это воздействие радиоактивных частиц. Обычно на первом шаге гамма-излучение проходит близко к ИС. Это, скорее всего, излучение, возникающее вследствие радиоактивного распада. Гамма-излучение имеет свойство хорошей проходимости через материал. Защищаться от гамма-излучения трудно. Квант гамма-излучения может выбивать альфа частицу, которая как заряженная частица может воздействовать на входы или прямо внутри ИС на регистры и память. Вследствие такого воздействия может исказиться хотя бы бит информации.

Последствия сбоев могут заключаться в следующем:

- *Искажение записанных данных*

В этом случае система работает на основе неправильных данных. В этом случае даже при корректно выполненных функциях возникает ложный результат. Причем этот процесс продолжается в дальнейшем, если ошибка в данных не скорректирована. Ошибка может оказаться в выходных результатах работы ИС, сформировать ложную команду и привести в итоге к опасному отказу.

- *Изменение последовательности программы*

Это значит, что система функцию не выполняет вообще, либо выполняет другую функцию. Возможны также события преждевременного выполнения функции, или недопустимо позднего или неуместного выполнения функции, что в итоге может привести к опасному отказу системы.

3. Обнаружение сбойных ошибок и защита от их опасных последствий

Существует ряд хорошо известных методов защиты от последствий сбоев [1]. В первую очередь требуется наличие методов обнаружения сбойных ошибок. Известны следующие методы обнаружения:

- *Многоканальность.* При этом подходе сравниваются результаты двух или более каналов. Если они различаются, то в устройстве обнаруживается сбой или отказ.
- *Проверочные суммы.* Помимо самих данных запоминается контрольная сумма. Изменения данных приведут к тому, что принятая и вновь сформированная по принятым данным контрольные суммы не совпадают. Этим методом можно обнаружить многие сбои, но далеко не все.
- *Алгоритмы.* Используются алгоритмы, которые толерантны по отношению к сбоям. Однако для ряда задач не удастся найти или построить подобные алгоритмы.
- *Многоверсионное программирование.* Создаются две или более версии программного обеспечения, основанные на том же алгоритме. Сравняются результаты. Так как действие сбоя предполагается различным на обе версии программного обеспечения, сбои должны обнаруживаться.

Эти обычные классические методы защиты от сбоев пригодны для широкого класса ошибок и отказов.

После обнаружения сбоев необходимо с помощью программно-аппаратных средств осуществить их устранение в системе. Однако дополнительные средства как для обнаружения, так и для устранения сбойных ошибок также подвергаются воздействию сбоев. Следовательно, они в свою очередь должны защищаться от сбоев.

4. Систематический подход

Построим сейчас систематический метод защиты от сбоев.

Отказ вследствие сбойной ошибки появляется как путем нарушения логических условий работы системы, так и в виде нарушения точности или пропускной способности работы системы. Эти искаженные промежуточные или выходные результаты запоминаются системой прямым или косвенным образом. Причем косвенное запоминание более опасно, так как оно трудно обнаруживается.

Пример прямого запоминания – это искажение данных, например, параметров системы. Косвенное запоминание появляется, если система выполняет неправильную операцию, что приведет к искаженным данным, которые потом заносятся в память.

Программное обеспечение (ПО) можно представить в форме конечного автомата. Состояние автомата определяется данными, записанными в памяти, которые либо поступили извне (данные датчиков, состояния внешних устройств), либо сформировались при выполнении процессов самого ПО (результаты расчетов, команды от ПО, направленные внешним устройствам и др.). Причем вся информация дискретна и зависит только от всей истории системы, но не от ее будущего. Теперь вычислительную систему можно описать следующим образом. Состояние в определенный момент описывается вектором в пространстве состояний системы, который содержит всю необходимую информацию для однозначного описания системы: все полученные данные, код ПО, значения регистров и т.д. Вектор состояния, хотя и очень большого размера, но конечен. Тогда ПО и цифровую систему можно описать с помощью модели Марковской цепи. Это объясняется тем, что так же как и в вычислительной системе, в модели Марковской цепи поведение системы в будущем зависит от настоящего и не зависит от того, когда и каким образом система перешла в это состояние.

Задача защиты от сбойных ошибок сводится, таким образом, к двум подзадачам:

1. Защита зафиксированного состояния от искажения сбоями;
2. Защита перехода в следующее состояние от искажения сбоями.

Для решения этих подзадач можно использовать, применительно к каждой из них, следующие меры:

1. *Проверочные суммы, избыточная запись.* С помощью таких методов можно детектировать искажение данных о состоянии и, если метод запоминания содержит избыточную информацию, можно даже восстановить искаженную информацию. Это возможно, если используется проверочный код с восстановлением, как, например, для CD, или информация запоминается дважды с проверочной суммой для каждой версии отдельно. Для того чтобы система работала эффективно, можно встроить машину состояний, которая отражает все важные аспекты процесса, в особенности различие между опасными и безопасными состояниями. Важно найти или сформировать машину состояний минимального объема. В стандарте EN 50128 (2011) упоминается в приложении D.24 метод Finite State Machines [3]. Это мероприятие как раз мотивировано защитой от сбойных ошибок.

2. *Многоверсионное программирование.* Если программное обеспечение спрограммировано в различных версиях именно так что они проводят расчеты различными методами, то сбои не смогут исказить обработку данных в обеих версиях так, чтобы результаты совпали. Также возможно использовать тот же код на различных компьютерах, на которых он транслируется разным образом в разных исполняемых ПО. Если использовать машины состояний, то перед каждым переходом состояний можно установить проверку, которая использует различный алгоритм.

5. Пример

В этом разделе приводится пример системы, в которой применяется систематический подход защиты от сбоев, представленный выше. Предполагается, что для проведения расчетов требуется безопасный компьютер. Причем расчет должен проводиться циклически. Например, каждые 100 миллисекунд вычисляется тормозной путь, с целью проверки того, что поезд будет останавливаться перед светофором с запрещающим показанием.

На первом шаге следует определить тот запас данных, который ясно описывает состояние системы. В примере это позиция, скорость, замедление и кривая, описывающая способность торможения поезда. Далее важно время или номер цикла. Очевидно, эти данные следует записать в память вместе с проверочными суммами. Тогда можно обнаружить искажения данных, вызванные сбоями. Если важно не только обнаружение, но и восстановление корректных данных и тем самым восстановление корректного состояния, то следует использовать либо избыточную запись данных, либо использование корректирующих кодов. В первом случае данные запоминаются дважды со своим проверочным кодом. Тогда легко установить, какая версия данных искажена. Во втором случае следует уделить внимание тому обстоятельству, что при большом количестве сбоев станет вероятным ложное восстановление, т.е. восстановление данных в неправильном состоянии. Во всяком случае требуется доказать расчетом, что мероприятия защиты от сбоев обнаруживают ошибки с достаточно высокой вероятностью, так что вероятность незамеченных искажений мала.

На втором шаге следует защищаться от последствий сбоев при переходе из одного состояния в другое. Самый простой вариант – это определение следующего состояния несколько раз. Расчет, проведенный дважды, позволяет обнаруживать ошибку. Если в таком случае повторить расчет третий раз, можно корректировать ошибку путем перехода в то состояние, которое определилось большинством расчетов.

При этом повторные расчеты проводятся на том же процессоре и той же самой версией программного обеспечения, как первый. Это возможно потому, что сбои не приведут к постоянным отказам. Надо отметить, что описанные меры не помогают при постоянных или систематических отказах.

В связи с переходами следует рассматривать программное обеспечение, которое проводит расчеты для определения последующего состояния. Если сбойная ошибка искажает программное обеспечение, то оно и остается в искаженном виде в памяти, хотя сама память при следующей записи программного обеспечения ее бы запомнила правильно. Поэтому программное обеспечение следует записать в память вместе с проверочной суммой. Более того, при каждом применении, т.е. и при повторном расчете перехода системы в следующее состояние следует проверить целостность программного обеспечения (или его части) с помощью проверочной суммы.

6. Заключение

В этой статье мы исследовали сбойные отказы. Мы описали причины сбойных отказов и методы защиты от них. Отсюда мы вывели систематический подход, который состоит в двух шагах. На первом шаге система представляется как Марковский автомат, состояние которого запоминается защищенным методом, например с помощью проверочных сумм. На втором шаге строится надежный метод перехода между состояниями, например, с помощью избыточных расчетов.

Подход проиллюстрирован на примере.

Литература

1. **Шубинский И.Б.** Функциональная надежность информационных систем, Москва, 2012.
2. **Haiyu Qi, Sanka Ganesan, Michael Pecht**, No-fault-found and intermittent failures in electronic products, *Microelectronics Reliability* 48 (2008) 663–674.
3. EN 50128, Railway applications — Communication, signaling and processing systems — Software for railway control and protection systems, 2011.



Shubinsky I.B., Schäbe H.

A SYSTEMATIC APPROACH TO PROTECTION AGAINST GLITCHES

The paper describes the essence of glitches, their emergence and influence on the results of a system's operation. Methods of identification of transient failures are considered. The paper describes methods of protection against glitches and offers an integrated approach to ensuring the resilience of a system to glitches. The principle put forth in the paper shows what key property a system has to own to be resilient to glitches. The paper further provides an example and a conclusion on the study results.

Keywords: glitches, transient failures, data corruption, distortion of a program sequence.

1. Introduction

Usually the theory of reliability and safety pays much attention to failures, in particular hazardous ones. Besides them, however, there are other types of events that at first glance seem to be less important. These are glitches [1,2].

Glitches are defined the following way. Functional glitches are events non-recurrently distorting information processed or stored in IT systems caused by external or internal destabilizing factors (disturbances) [1].

The issue has become more critical for two reasons. First, the miniaturization of computer systems leads to an increasing sensitivity of hardware. Second, the weakening of the Earth magnetic field leads to a growing number of charged cosmic particles arriving at the Earth's surface. As a result, the rate of glitches is three or more times greater than the failure rate of hardware [1].

This paper presents a systematic method for developing a system that is resilient to glitches.

The second section of the paper describes what glitches are, how they occur and what follows. The third section discusses detecting methods. The further section describes methods of protection against glitches and provides a systematic approach. The principle presented below shows what main feature a system should have to be resilient to glitches. At the end of the paper an example is provided and a conclusion is made.

2. Glitches

In information systems, glitches that belong to intermittent failures have no significant effect on the reliability of an information system. This is explained by the following reasons:

• Many information systems are classified as mission-critical systems. Therefore, when designing an information system special measures to stabilize the system are taken regarding acceptable limits of temperature and humidity, required conditioning of rooms and racks, careful design of electrical schemes, excluding events as races and competition of signals, etc.

• Many information systems work in real time and perform well-defined informational tasks according to a given schedule. For these systems, the results of operation are primarily influenced by functional glitches, i.e. such hardware failures that, under certain circumstances, can lead to management errors and have serious consequences for the entire system, and even for the environment.

• Glitches are characterized by the fact that they exist only for a very short time. They occur in hardware and disappear by themselves, i.e. hardware returns to its original physical state, but not necessarily to its original functional state.

Hardware glitches can be caused by:

Disturbances of inputs and power supply

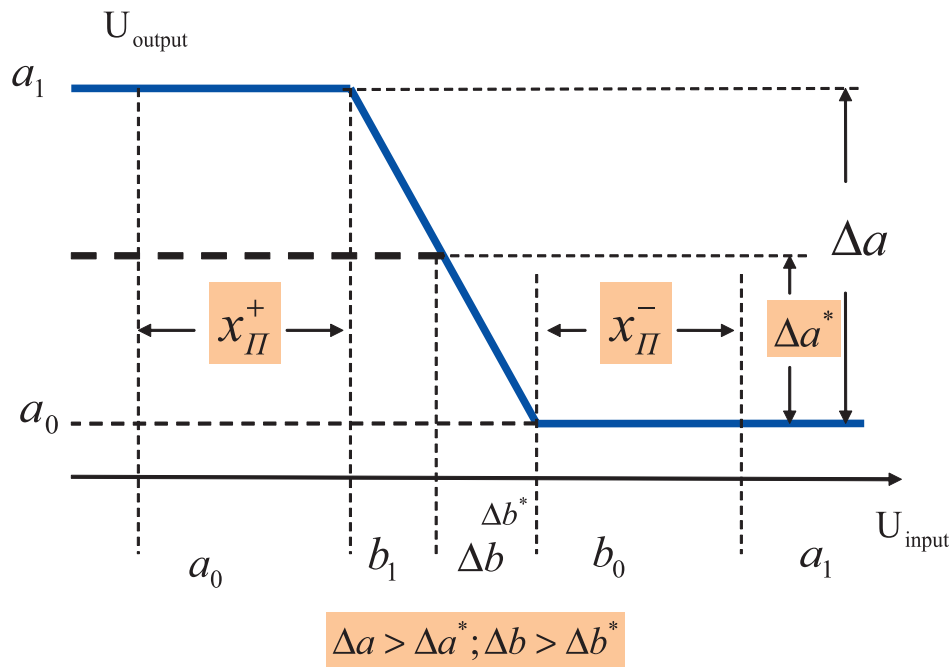


Fig. 1. Typical transfer characteristics of a digital integrated circuit

The actual transfer characteristic of a circuit can be approximated by a piecewise linear function. Fig. 1 provides an example of transfer characteristics with their parameters: a_i ($i = 1, 0$) is the output voltage level of a logic one or zero; b_i is the threshold value of input signal for switches like $1 \rightarrow 0$ ($i = 1$) or $0 \rightarrow 1$ ($i = 0$); $\bar{b} = \frac{b_1 + b_0}{2}$ – the possible band of switching $\Delta b = |b_1 - b_0|$. For a typical transfer characteristic,

we single out three areas corresponding to different states of a circuit. Area I is closed state of a circuit, area III is open state of a circuit, and intermediate area II is switching state. Under the influence of trigger disturbance, the circuit can move from area I to area III, i.e. producing an incorrect output code “1” instead of the “0” code (glitch of $1 \rightarrow 0$ type). Under the influence of blocking disturbance, there can be a glitch of $0 \rightarrow 1$ type.

From fig.1 it can be seen that for a given value of logic swing Δa , a technological variance between threshold voltages b_1 and b_0 leads to smaller admissible amplitudes of input disturbances x_D^+ and x_D^- , and

consequently to reduction of circuit noise immunity. The similar result occurs in case of reduction of logic swing Δa , which is made to increase a circuit speed of response. The smaller is the value of logic swing $\Delta a^* < \Delta a$, the lesser is the time of circuit switching $\Delta b^* < \Delta b$ and thus the better is its speed of response.

Experimental data on glitches of integrated circuits are not available. To assess the characteristics of glitches, they use experimental and computational methods of prediction based on experimental data about on input signals and disturbances, transfer and amplitude frequency characteristics of circuits. These data are source data for calculating a range of possible probabilities for transient failures of a digital logic element in an integrated circuit, which is often called as a gate similar to a transistor in the second generation element base. Based on the calculated values of gate transient failures, the known structure and functions implemented, glitch rate and probabilities are calculated for digital integrated circuits (IC).

Electromagnetic interference

If disturbances can affect the system through inputs, power supply and weight, then the system can also be exposed to electromagnetic interference. Consequently, it can induce a disturbing current. This disturbance influences the same way on circuit contacts as a disturbance coming directly through contacts and wires and as described above.

Passing of radioactive particles

The third mechanism is the impact of radioactive particles. Usually, at the first step gamma rays pass close to IC. This is likely to be radiation produced due to radioactive decay. Gamma radiation has the property of passing through material easily, and it is difficult to protect against it. A gamma quantum can yank out an alpha particle that as a charged particle can come to inputs or directly inside of IC on registers and memory. Due to this impact, at least one bit might be distorted.

The consequences of glitches can be as follows:

- *Distortion of written data.*

In this case, the system functions on the basis of incorrect information. In this case, even correctly executed functions provide a false result. And this process continues further if an error in the data has not been corrected. An error can get into the output results of IC functioning, making a false command and causing a hazardous failure.

- *Changing a program sequence.*

This means that the system will not perform a function at all, or will perform another function instead. There can also be events of too early, too late or inappropriate performing a function, which as a result can lead to a hazardous failure.

3. Detection of transient failures and protection against their hazardous consequences

There are a number of well-known methods of protection against the effects of transient failures [1]. First of all, methods for detecting transient failures are required. The following methods of detection are known:

- *Multi-channeling.* In this approach, the results of two or more channels are compared. If their results differ, a failure or a glitch is detected in a system.

- *Checksums.* Besides the data themselves, a checksum is saved. Changing the data will cause an event when a checksum received and a checksum newly obtained on the basis of the received data will not match. Using this method, we can detect many faults, but not all of them.

- *Algorithms.* Developers use algorithms that are tolerant to transient failures. However, for some tasks one cannot find or construct such algorithms.

- *Multi-version programming*. Based on the same algorithm, two or more versions of the software are developed. The results are compared. Since the impact of a transient failure is supposed to be different for both of the software versions, glitches have to be detected.

These well-known, classical methods of protection are suitable for a wide class of faults and failures.

After having detected transient failures, one has to eliminate them in a system using HW/SW means. However, additional HW/SW means used for detection and elimination are also susceptible to transient failures. Therefore, they should also be protected against transient failures.

4. A systematic approach

In this section we construct a systematic method for protection against transient failures.

A system failure caused by a glitch represents itself through violation of logic conditions of system functioning as well as through decreased accuracy or capacity of a system. These distorted intermediate or output results are registered by a system directly or indirectly. And implicit saving is more dangerous, as it is more difficult to detect.

An example of direct saving is the distortion of data such as system parameters. Indirect saving occurs, for example, if a system performs an incorrect operation that will lead to distortion of data, which are then saved to the memory.

Software can be imagined as finite-state automaton. The state of automaton is defined by the data recorded in the memory that either came from the outside (sensor data, the state of external devices etc.) or were derived as a result of the software processes themselves (calculation results, commands from software to external devices etc.). We should keep in mind that all information is discrete and depends only on the entire history of the system, but not on its future.

Now the computing system can be described as follows. Its state at a given moment of time is described as a vector in a space of a system's states that contain all necessary information for the unambiguous description of a system: all data received, SW code, register values etc. Though of a big size, a state vector is finite. Then software and a digital system can be described by means of a Markov chain model. This is explained by the fact that in a Markov chain model as in a computing system, the behavior of a system in the future depends on the present and does not depend on when and how the system came into that state.

Therefore, the task of protection against glitches is bolted down two subtasks:

1. Protection of a fixed state against transient failures;
2. Protection of the transition into next state against distortion by transient faults.

In order to solve both of these subtasks, for each of them the following measures can be applied:

1. *Checksums, redundant recording*. With these methods it is possible to detect distortion of data about the system state, and if the method of information storage includes redundant information, it is even possible to restore distorted information. This may be possible if one uses an error-correcting code, as applied on CD, or information is saved twice with separate checksums for each version.

In order to have a safe working system, one can implement a finite-state machine, which reflects all important aspects of the information processing process, especially the distinction between hazardous and safe states. It is important to find or construct a state machine, which is as small as possible.

The standard EN 50128 (2011) in Annex D.24 mentions a method of Finite State Machines [3]. It is this measure that was motivated by protection against transient failures.

2. *Multi-version programming*. If software is programmed in various versions carrying out calculations using different methods, transient failures cannot distort the data processing in both versions of the software in such a manner that the results will be the same. It is also possible to apply the same code on different computers where it is translated in a different way in different executable software. If a finite-state machine is used, before each state transition one can set checking that uses different algorithms.

5. Example

This section gives an example of a system that uses a systematic approach for protection against transient failures presented above. It is assumed that a safe computer is required for calculations. In addition, these computations have to be carried out cyclically. For example, the braking distance is computed every 100 milliseconds in order to verify that the train will be able to stop before the next signal at danger.

As the first step, we should define those data, which clearly describes the state of a system. In this example, these are a position, speed, deceleration and a braking curve, which describes the braking parameters of a train. Further, the time or cycle number is required. Obviously, these data should be written into memory together with a checksum. Then it is possible to detect data corruption caused by glitches. If, however, it is important not only to detect but also restore the correct data, i.e. restoring the correct state, then it is necessary either to store data redundantly or to use error-correcting codes. In the first case, the data is stored twice with a hash code. Then it is easy to determine which version of the data has been damaged. In the second case, one needs to pay attention to the fact that with a large number of transient failures a false recovery, i.e. recovery of wrong state would become probable.

In any case we need to prove by calculations that the measures implemented against transient failures detect errors with a sufficiently high probability, so that the probability of undetected distortions is sufficiently low.

As the second step, the system needs to be protected against the consequences of transient failures when transition from one state to another occurs. The easiest option is to determine the next state several times. Calculations are carried out twice, so that possible errors can be detected. If in this case the calculation is repeated for the third time, then an error can be corrected by switching to that state, which has been determined by the majority of calculations.

In this example, calculations are repeated on the same processor and with the same software version, as in the first calculation. This is possible because transient failures will not lead to a permanent failure. It should be noted that the described measures do not protect against permanent or systematic failures.

In connection with the transition, however, one needs to consider the software that carries out calculations to determine the subsequent state. If a transient failure distorts the software, then the software remains in a distorted form in the memory, although the memory would store the software correctly at the next occasion of software uploading to the system. Therefore, the software must be written into memory together with a checksum. Moreover, for each application of this software, i.e. also when re-computing the transition to the next system state, it is necessary to check the integrity of the software (or portions thereof) with the checksum.

6. Conclusion

In this paper, we have studied transient failures. We have described the causes of transient failures and methods of protection against them. Hence, we have derived a systematic approach, which consists in two steps. At the first step, the system is represented as a Markov automaton, the state of which is memorized using protection methods, for example using a checksum. At the second step, a reliable method of transition between states is constructed, e.g. using redundant calculations. The approach is illustrated by an example.

References

1. **Shubinsky I.B.** Functional reliability of information systems. Moscow, 2012.
2. **Haiyu Qi, Sanka Ganesan, Michael Pecht.** No-fault-found and intermittent failures in electronic products. *Microelectronics Reliability* 48 (2008) 663-674.
3. EN 50128 Railway applications – Communication, signalling and processing systems – Software for railway control and safety systems, 2011.



Абрамова Н.А., Макаренко Д.И.

СИСТЕМАТИЗАЦИЯ КРИТЕРИЕВ И ЗНАЧИМЫХ ФАКТОРОВ ДЛЯ ОЦЕНКИ ПОДВЕРЖЕННОСТИ СЛОЖНЫХ СИСТЕМ ДЕСТАБИЛИЗИРУЮЩИМ ВОЗДЕЙСТВИЯМ

Проведен анализ отечественной и зарубежной научно-методической литературы и нормативной документации, посвященной методам и критериям выявления критичных подсистем и узлов важных народнохозяйственных объектов, а также исследованиям их поведения во внештатных ситуациях. Исследованы подходы к оценке уязвимости различных объектов к дестабилизирующим антропогенным воздействиям и систематизированы критерии и факторы, значимые для оценки влияния дестабилизирующих воздействий и факторов постепенного действия.

Ключевые слова: *важный народнохозяйственный объект, уязвимость, дестабилизирующее воздействие, угроза теракта, объект защиты, критерии.*

Введение

Задача выявления узлов важных народнохозяйственных объектов (ВНО), наиболее подверженных влиянию дестабилизирующих воздействий (ДВ) имеет высокую практическую значимость в современном мире, ее приходится решать для самых разных видов ДВ, при отличающихся целях, видах ВНО и разновидностях постановки задачи. В качестве ВНО может выступать мегаполис со всеми своими инфраструктурными объектами, или отдельный аэропорт с его подсистемами, или речь может идти об определенной территории (регионе, стране), в составе которой рассматривается совокупность ВНО – потенциальных объектов приложения ДВ.

Целью анализа подверженности ДВ является определение наиболее слабых мест данного ВНО (или территории) для проведения оперативных мероприятий в условиях повышенной угрозы ДВ или уточнения стратегии защиты объектов и выбора приоритетных направлений инвестиций¹.

Задача оценки подверженности ДВ отдельных объектов может выступать либо как часть более общей задачи сравнительной оценки объектов, узлов, подсистем в составе более крупного ВНО или территории для последующей категоризации или выявления объектов, наиболее подверженных ДВ, или же – как самостоятельная задача (например, в случае сертификации, лицензирования деятельности).

¹ Ряд типовых задач такого рода рассмотрен в [1].

Для решения задач, связанных с оценкой влияния ДВ и защитой от них, существенную роль играет тип угроз вызываемых ими ДВ. При этом обычно различают стихийные и антропогенные угрозы [1, 2]: последние отличаются, прежде всего, тем, что они возникают в результате деятельности человека. В свою очередь, антропогенные угрозы разделяют на техногенные (технологические) угрозы и терроризм.

Если техногенные ДВ, связанные с такой деятельностью как изготовление, транспортировка, хранение и использование опасных материалов, могут (для простоты анализа [1]) рассматриваться как случайные, а их последствия – как непреднамеренные, то отличительной чертой терроризма является **намеренность** как дестабилизирующих воздействий – терактов, так и последствий, краткосрочных и долговременных. Намеренность можно рассматривать как общее свойство разных типов терроризма, независимо от истоков, основ, преследуемых политических или социальных целей, средств и т.д.

Именно наличие активных «субъектов»: организаций, неформальных сообществ, отдельных людей, чьи намерения реализуются посредством терактов (даже если они мимикрируют под ненамеренные типы ДВ), представляется решающим при выборе теоретических средств: моделей и методов – для решения обозначенных выше типов задач.

В данной статье рассматривается подверженность объектов именно намеренным ДВ – терактам.¹

1. Подходы к оценке подверженности ВНО дестабилизирующим воздействиям

Проведенный анализ отечественной и зарубежной научно-методической литературы и нормативной документации показывает, что более или менее общепринятых целостных подходов к выделенным типам задач, относящихся как к угрозе терактов и терроризма, так и к другим типам ДВ, на сегодня нет.

Так, краткий обзор недавней литературы, проведенный в [3] и учитывающий целый ряд характеристик методов, предлагаемых для оценки уязвимости и устойчивости критических инфраструктур и критериев, которые оцениваются в таких методах, позволяет прийти к следующему выводу. Хотя предлагаемые методологии рассматривают одну или две характеристики более углубленно, им пока не хватает целостности и реалистичности, поскольку они не позволяют включить дополнительные критерии (социальные, организационные, экологические и экономические).

Недостаточное раскрытие системного подхода к оценке критически важных объектов довольно отчетливо отражается на качестве отечественных нормативных документов. (Для примера анализировались Регламент «Обеспечение безопасности объектов» Министерства связи и массовых коммуникаций РФ (2010 г.) и приказ Минтранса РФ «О порядке проведения оценки уязвимости объектов транспортной инфраструктуры и транспортных средств» (2010 г.)).

Наряду с развитием качественных (неформальных) методов и методологий оценки узлов и подсистем ВНО, включая их функционально-структурный анализ (например, [4], значительная часть методов в [1, 5]), сегодня в научной литературе предлагается ряд **экспертно-формальных методов**. Такие методы, в большей или меньшей степени, включают формальные логико-математические методы, однако их применению должна (более или менее явно) предшествовать экспертная «обработка» сложной, слабоструктурированной ситуации: первичная структуризация и формализация знаний об объектах, их структуре и важности (критичности), видах угроз и т.д., и, возможно, экспертные оценки.

¹ В некоторых отечественных нормативных актах угрозы террористического и криминального характера различаются, однако свойство намеренности сохраняется и для последних.

В отечественной и зарубежной научной и методической литературе, посвященной различным вопросам, связанным террористическими актами в отношении важных народнохозяйственных объектов [3, 2, 6, 7 и др.], в качестве ключевых показателей чаще всего используют «уязвимость» (vulnerability), «критичность» (criticality), «риск» (risk), «угрозу» (threat), «последствия» (consequences). Реже используются «устойчивость» (resilience), «надежность» (reliability), «опасность» (hazard).

Для целей анализа **свойств защищаемого объекта** в контексте оценки его подверженности терактам, как правило, применяют такие понятия, как **уязвимость, критичность**.

Термин «угрозы» применяют для характеристики свойств внешней для ВНО среды. Риск, как правило, учитывает свойства как самого объекта, так свойства внешней среды.

Согласно [5] уязвимость объекта (vulnerability) может быть оценена на основе двух разных, но взаимодополняющих подходов.

Первый подход основан на утверждении, что у любого объекта существует **свойственный ему уровень уязвимости (inherent vulnerability)**, не зависящий от каких-либо защитных мер, применяемых в его отношении. Например, футбольный стадион имеет определенный уровень свойственной ему уязвимости, поскольку на стадионе собирается большое количество людей и вследствие этого он может являться достаточно привлекательной мишенью для террористов с точки зрения количества возможных жертв теракта. Иными словами, данный тип уязвимости характеризует привлекательность объекта для террористов с точки зрения достижения общественного (запугивания населения) и политического (привлечения внимания международной общественности) резонанса.

Второй подход исходит из того, что в отношении любого объекта может быть предпринят широкий спектр мер безопасности, снижающих его уязвимость, т.е. повышающих его защищенность от теракта. Например, если вентиляционная система защищаемого объекта спроектирована таким образом, что ее элементы труднодоступны и находятся в зоне видимости камер видеонаблюдения, она с меньшей вероятностью будет использована террористами при попытке применить отравляющий газ. Для обозначения уязвимости в смысле защищенности объекта применяется термин **«тактическая уязвимость» (tactical vulnerability)**.

Во избежание путаницы с понятиями, считаем целесообразным:

- 1) составной термин «уязвимость», принятый в [5], заменить термином **«подверженность терактам»**;
- 2) уязвимость, характеризующую привлекательность объекта для террористов с точки зрения достижения разного рода резонанса, определить как **«привлекательность ВНО»**;
- 3) тактическую уязвимость, характеризующую защищенность объекта от теракта, определить как **«уязвимость»**.

Таким образом, согласно [5] и принятой выше терминологии, подверженность ВНО терактам определяется его привлекательностью для террористов и его уязвимостью (рис. 1).

В зависимости от условий, задача оценки уязвимости защищаемого объекта может являться частной по отношению к более общим задачам, таким как разработка или уточнение стратегии управления риском теракта в отношении данного ВНО; или распределение ресурсов среди ВНО, находящихся на территории одной административной единицы. В этих случаях риск рассматривается как функция от уязвимости, угрозы и критичности узлов и подсистем объекта (для первой задачи [1]) или последствий теракта (для второй задачи [6]) (рис. 2).



* термин согласно [5]

Рис. 1. Подходы к оценке уязвимости

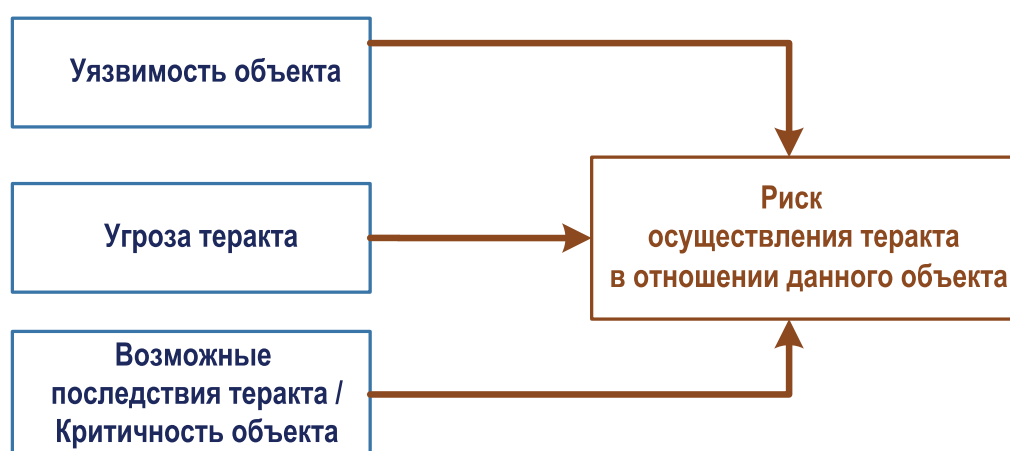


Рис. 2. Показатели, учитываемые при оценке риска осуществления теракта для решения определенных задач

Ниже рассмотрим критерии и факторы, определяющие подверженность ВНО терактам, и некоторые другие показатели, названные выше и значимые для решения задач исследуемого семейства.

2. Критерии и факторы, значимые для оценки подверженности ВНО ДВ и их систематизация

Согласно [5] и принятой выше терминологии, подверженность ВНО терактам определяется его привлекательностью для террористов и его уязвимостью. Привлекательность ВНО для террористов определяется следующими критериями или факторами:

- **открытостью объекта:** объект может быть секретным и о его существовании может знать лишь ограниченный круг лиц;
- **полезностью объекта** с точки зрения его пригодности или ценности для достижения целей террористов;
- **доступностью объекта** для населения;
- **мобильностью:** объект может быть стационарным или мобильным;
- **наличием на объекте опасных веществ и материалов;**
- **возможным сопутствующим ущербом:** ущербом для окружающих, связанных с ними объектов и окружающей среды, вызванным повреждением объекта;
- **населенностью объекта:** количеством человек, одновременно находящихся на объекте.

Уязвимость ВНО для террористов определяется следующими факторами [5] (рис. 3):

1) Периметром объекта:

- **учетом аспектов безопасности** при планировании местности и ландшафта вокруг объекта;
- **безопасностью автостоянки**: отделенностью проезжей части и автостоянки от объекта.

2) Ограждающей конструкцией здания:

- **способностью** ограждающей конструкции здания **воспрепятствовать ДВ или смягчить их последствия**.

3) Внутренним пространством объекта:

- **планировкой и архитектурой внутреннего пространства**: наблюдаемостью общественных и закрытых зон, разделенностью общественных и закрытых зон, разделенностью критичных систем и процессов;

- **защищенностью и/или наличием резервной** коммунальной системы и системы отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха;

- **электротехническими системами**: наличием аварийных систем связи и энергообеспечения; функционированием систем тревоги; достаточностью освещения;

- **противопожарной системой**: достаточностью и защищенностью систем пожаротушения и запасов воды; обученностью персонала; осведомленностью местных спасательных служб о характере объекта;

- **системой охраны объекта**: наличием и достаточностью средств наблюдения и охраны объекта и соответствующего персонала.

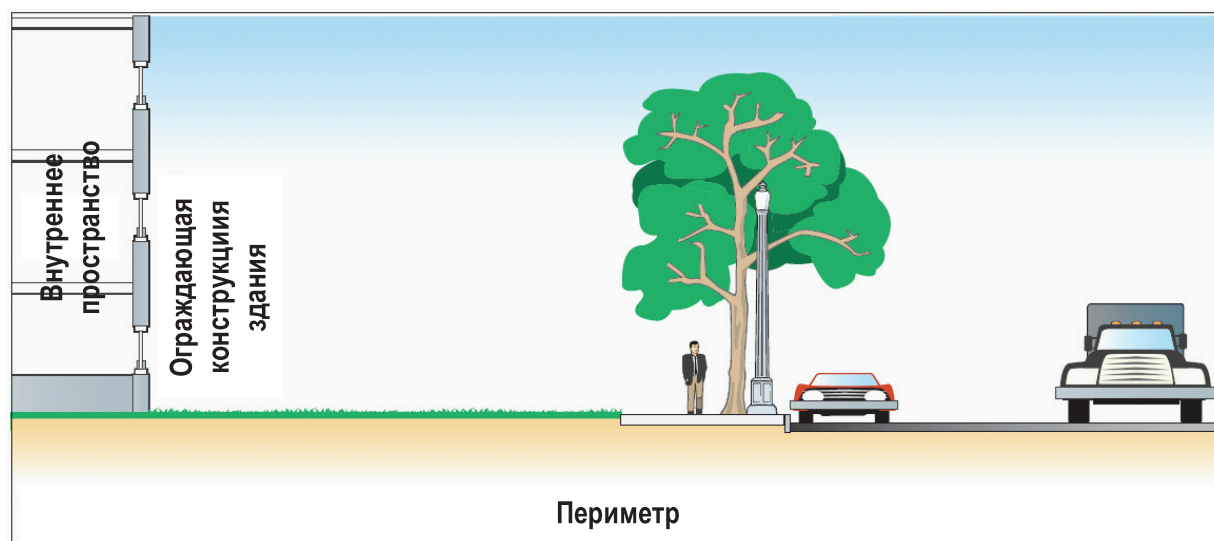


Рис. 3. Факторы, учитываемые при оценке уязвимости объекта

Подобная (в содержательном плане) описанная выше структура критериев и факторов используется и в других источниках [7].

Следует подчеркнуть, что уязвимость объекта всегда оценивается по отношению к заранее определенным ДВ, или более конкретно, к определенным методам терактов, т.е. используемым террористами средствам поражения и способам его применения [2, 8]. Подробное описание методов терактов приведено в [9].

Согласно [9] одним из ключевых факторов, который необходимо учитывать при оценке уязвимости объектов является **избыточность (redundancy) или наличие резервных систем и ресурсов, которые могут обеспечивать выполнение ВНО своих функций при отказе основных систем**

и в период после совершения теракта. Типичными уязвимостями ВНО, связанными с этим фактором, называются:

- отсутствие избыточности;
- использование основной и резервной системами одних и тех же узлов и подсистем;
- совместное расположение основной и резервной систем;
- отсутствие достаточного резерва ресурсов для автономного обеспечения функционирования ВНО в период после совершения теракта.

Независимо от того, насколько наукоемким и технически сложным является объект, ни одна система не может быть чисто технической, поскольку все технические процессы и факторы, определяющие функционирование объекта, теснейшим образом переплетены с организационными, психологическими, политическими и другими человеческими и социальными факторами (рис. 4).



Рис. 4. Версия классификации факторов

Значимость этих факторов подтверждается результатами анализа конкретной чрезвычайной ситуации – аварии, произошедшей с буровой платформой в Северном море, проведенного в [10]. Авторами сделан вывод о том, что 80% отказов оборудования произошло вследствие нетехнических факторов (человеческих, психологических, социальных, организационных).

Подтверждением крайне высокой важности таких факторов явился и террористический акт в московском аэропорту Домодедово в январе 2011 г. Так, по мнению авторитетных экспертов, одной из причин того, что террористам удалось пронести взрывное устройство в здание аэропорта, является отсутствие «сколько-нибудь слаженной работы нескольких ведомств по обеспечению безопасности на транспорте» [11].

К человеческим и социальным факторам можно отнести следующие:

- уровень подготовки персонала;
- надежность (мотивированность) персонала;
- координация работы различных служб, ответственных за обеспечение безопасности объекта;
- эффективность организации защиты объекта и др.

В зависимости от решаемой задачи, типа и уровня защищаемого объекта, будет меняться и структура и состав критериев, применяемых для оценки его подверженности ДВ. При оценке подверженности ДВ объектов разного уровня одни и те же факторы и критерии могут учитываться для оценки как свойств самого ВНО, т.е. подверженности ВНО терактам, так и внешней для него среды, т.е. актуальности террористической угрозы.

Так, если ставится задача оценки подверженности терактам разных регионов страны, то учитываются географические факторы и факторы, оказывающие влияние на террористическую угрозу, характерные для каждой выделенной территории, такие как:

- досягаемость региона для террористов, т.е. его удаленность от источников терроризма и баз террористов;
- доступность совершения теракта или наличие пособников – на территории с более сложной криминогенной обстановкой их больше [7].

В то же время данные факторы будут характеризовать свойства внешней среды, если оцениваемым объектом является ВНО, находящийся на данной территории. Задача выявления и структуризации критериев и факторов, значимых для оценки террористической угрозы, требует более глубокого исследования и не является целью настоящей работы, однако считаем целесообразным привести некоторые группы факторов, характеризующих террористическую угрозу и встречающихся в источниках, исследованных в рамках данной работы.

В [12] угрозы по времени действия разделяются на два типа: постоянного действия и временного действия.

Согласно [1] факторы, характеризующие уровень террористической угрозы, могут относиться к наличию угрозы (причин, поводов для террористической активности), возможности совершить теракт, активностью террористов (наличием случаев совершения терактов), выраженными намерениями совершить теракт, обозначенной целью теракта.

Структуру критериев и факторов, определяющих подверженность ВНО террористическим актам удобно изображать и анализировать в виде когнитивной карты. Пример такой когнитивной карты для гипотетического ВНО представлен на рис. 5.



Рис. 5. Пример когнитивной карты факторов и критериев, значимых для оценки подверженности ВНО терактам

Заключение

Таким образом, проведенный анализ отечественной и зарубежной научной и методической литературы, посвященной вопросам оценки подверженности ВНО терактам, позволяет сформулировать следующие выводы:

1. Оценку подверженности ВНО терактам целесообразно осуществлять комплексно, с учетом следующих показателей:

– привлекательности ВНО для террористов с точки зрения достижения общественного (запугивания населения) и политического (привлечения внимания международной общественности) резонанса, а также возможных экономических последствий;

– уязвимости ВНО, т.е. защищенности объекта от теракта.

2. Для повышения достоверности результатов оценивания уязвимости ВНО по отношению к терактам, наряду с традиционно учитываемыми – техническими факторами, необходимо учитывать организационные, социальные, психологические и другие человеческие факторы.

3. В зависимости от решаемой задачи, типа и уровня защищаемого объекта, будет меняться структура и состав критериев, применяемых для оценки его подверженности ДВ. При оценке подверженности деструктивным воздействиям объектов разного уровня одни и те же факторы и критерии могут учитываться для оценки как свойств самого ВНО, т.е. подверженности ВНО терактам, так и внешней для него среды, т.е. актуальности террористической угрозы.

Литература

1. Reference Manual to Mitigate Potential Terrorist Attacks Against Buildings (FEMA 426). – Hyattsville, MD: U.S. Federal Emergency Management Agency, 2003. – 420 p.
2. Национальная и глобальная безопасность. Терроризм в мегаполисе: оценка угроз и защищенности под общей редакцией / Под. ред. **В.З. Дворкина**. – М.: Издательство «Права человека», 2002. – 113 с.
3. **Solano E.** Methods for Assessing Vulnerability of Critical Infrastructure. Institute for Homeland Security Solutions (IHSS), 2010.
4. **Baker G. A.** vulnerability assessment methodology for critical infrastructure sites. Department of Homeland Security symposium: R&D partnerships in homeland security. – Boston, Massachusetts, 2005. http://works.bepress.com/george_h_baker/2.
5. State And Local Mitigation Planning How-to Guide: Integrating Manmade Hazards Into Mitigation Planning (FEMA 386-7). – Hyattsville, MD: U.S. Federal Emergency Management Agency, 2003. – 78 p.
6. **Willis H., Morral A., Kelly T., Medby J.** Estimating Terrorism Risk. – Santa Monica, CA: RAND Corporation, 2005. – 94 p.
7. **Радаев Н., Бочков А.** Оценка террористической угрозы для объекта / БДИ (Безопасность. Достоверность. Информация). – 2008. – № 2. – С. 16-19.
8. DHS Risk Lexicon. – Wash.: U.S. Department of Homeland Security, 2010. – 72 p.
9. A How-To Guide to Mitigate Potential Terrorist Attacks Against Buildings (FEMA 452). – Hyattsville, MD: U.S. Federal Emergency Management Agency, 2005. – 248 p.
10. **Bea R., Mitroff I., Farber D., et al.** A new approach to risk // Risk Management. – 2009. – Vol. 11, 1. – 30-43 pp.
11. **Кувалдин С., Силаев Н.** Террор на российские деньги // Эксперт. – 2011. – № 4 (738). – С. 17-21.
12. **Brooks N.** Vulnerability, Risk and Adaptation: A Conceptual Framework. – Norwich: Centre for Social and Economic Research on the Global Environment (CSERGE). School of Environmental Sciences. University of East Anglia, 2003. – 20 p.



Abramova N.A., Makarenko D.I.

SYSTEMATIZATION OF CRITERIA AND SIGNIFICANT FACTORS FOR EVALUATION OF EXPOSURE OF COMPLEX SYSTEMS TO DISTURBANCES

The paper presents the analysis of domestic and foreign scientific, methodology and normative documents on methods and criteria for identification of critical subsystems and nodes of important economic objects and research in their behavior in abnormal situations. The authors of the paper have studied approaches to evaluation of exposure of various facilities to anthropogenic disturbances and systemized criteria and factors significant for evaluation of impacts of disturbances and step-by-step action factors.

Keywords: *important economic object, vulnerability, disturbance, threat of terrorist attack, protection object, criteria.*

Introduction

To identify nodes of important economic objects (IEO) most susceptible to disturbing influences (DI) is very important in the modern world for various disturbing influences with different objectives, IEO types and task statement types. As IEO, we can have a big city with all its infrastructure facilities, or a single airport with its subsystems, or even a specific territory (region, country), where we consider an aggregate of IEOs as potential objects for DI.

The target of DI exposure analysis is to identify the weakest spots of a given IEO (or territory) to take some operative measures under the conditions of a DI increased threat or to correct the strategy of objects protection and to select priorities for investments¹.

The task of DI exposure of individual objects can be considered as part of a more general task of comparative evaluation of objects, nodes, subsystems within a larger IEO or territory for further categorization or identification of objects mostly exposed to DI, or as a separate task (for example, in case of certification, licensing).

For solving tasks related to evaluation of DI factors and protection against them, types of threats and related DI play a significant role. Usually, natural and anthropogenic threats are identified in this case [1, 2]: the latter are first of all characterized by the fact that they arise due to human activities. Anthropogenic threats are in their turn differentiated as technology-related threats and terrorism.

¹ Some typical tasks of such kind are considered in [1].

While technology-related DI associated with such activity as manufacture, transportation, keeping and exploitation of dangerous materials can be treated (for the convenience of analysis [1]) as accidental, and their consequences can be considered as unintentional, terrorism features purposefulness of disturbing impacts – terrorist attacks, as well as consequences, in the short run and in the long run. Purposefulness can be considered as a general property of different types of terrorism independent of sources, bases, political or social targets stricken, means etc.

It is the presence of active “subjects” – organizations, informal communities, individual people, whose intentions are implemented by means of terrorist attacks (even if they are disguised as unintentional DI types) that should be decisive for choosing theoretical means – models and methods – to solve above mentioned types of tasks.

It is exposure of objects to intentional DI (terrorist attacks) that is studied in this paper.¹

1. Approaches to evaluation of IEO exposure to disturbing influences

The analysis of domestic and foreign scientific and methodology literature and normative documents shows that there are no more or less generally accepted comprehensive approaches to types of tasks specified above and related to threats of terrorism and terrorist attacks as well as other types of DI.

Thus, a brief overview of literature in [3] that considers a number of characteristics of methods offered for evaluation of infrastructure susceptibility and resilience, and of criteria which are evaluated in such methods makes it possible to come to the following conclusion. Though proposed methodology considers one or two characteristic in more detail, they so far lack integrity and feasibility, as they don't allow including additional criteria (social, administrative, ecological and economical ones).

The insufficient sophistication of a systematic approach to evaluation of critical infrastructure is seen clearly enough in the quality of domestic normative documents. (As an example, Rules “Ensuring of objects safety” of Ministry of Communications of Russian Federation Регламент (2010) and Instruction of Ministry of Transport of Russian Federation “The procedure of evaluating exposure of transport infrastructure and transport fleet objects” (2010) have been analyzed).

Along with development of quality (informal) methods and methodology for evaluating IEO nodes and subsystems, their functional and structural analysis inclusive (for example, [4], the considerable part of methods in [1, 5]), today scientific literature offers a number of **expert and formal methods**. To a greater or lesser degree, such methods include formalized logical and mathematical methods, however their application should be (more or less explicitly) preceded by expert “elaboration” of a complex, poorly structured situation – preliminary structuring and formalizing of knowledge about objects, their structure and significance (criticality), types of threats etc. – and possibly expert estimates.

As key indices, domestic and foreign scientific and methodology literature discussing various issues related to terrorist attacks at important economic objects [3, 2, 6, 7 etc.] often uses “vulnerability”, “criticality”, “risk”, “threat”, “consequences”. Less often such terms as “resilience”, “reliability”, “hazard” are used.

For the purpose of analysis of a **protected object's properties**, in the context of evaluation of its exposure to terrorist attacks, such terms as **vulnerability**, **criticality** are generally used.

The term “threats” are applied to characterize the properties of environment external to IEO. The term “risk”, as a rule, takes into account the properties of an object itself as well as environment.

According to [5], the vulnerability of an object can be evaluated on the basis of two different but complementary approaches.

¹ In some domestic normative documents, threats of terrorist and criminal character differ, though the property of purposefulness holds for the latter as well.

The first approach is based on the assumption that any object has an **inherent vulnerability level** independent of any protection measures applied to it. For example, a football stadium has an inherent vulnerability level, as it hosts a great number of people and therefore it can be a sufficiently attracting target for terrorists in terms of the number of victims of terrorist attacks. In other words, this type of vulnerability characterizes the attractiveness of an object for terrorists in terms of getting public (intimidating people) and political (attracting the attention of international audience) resonance.

The second approach assumes that any object can be protected by means of a wide range of security measures reducing its vulnerability, i.e. increasing its protection against a terrorist attack. For example, if a ventilation system of a protected object is designed in such a way that its elements are hard to access and located in the zone of visibility of CCTV cameras, it will less likely be used by terrorists attempting to administer poisonous gas. To designate vulnerability in terms of protection of an object, the term **tactical vulnerability** is used.

To avoid misunderstanding of terms, we believe it reasonable:

- 1) To replace a complex term “vulnerability” adopted in [5] with “**exposure to terrorist attacks**”;
- 2) To define vulnerability characterizing the attractiveness of an object for terrorists in terms of getting various types of resonance as “**IEO attractiveness**”;
- 3) To define tactical vulnerability characterizing protection of an object against terrorist attacks as “**vulnerability**”.

Therefore, according to [5] and terminology adopted above, IEO exposure to terrorist attacks is defined by its attractiveness for terrorists and its vulnerability (fig. 1).

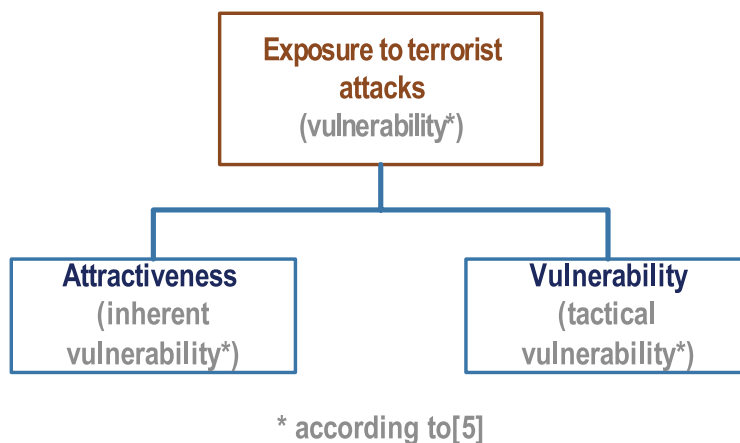


Fig. 1. Approaches to assessment of vulnerability

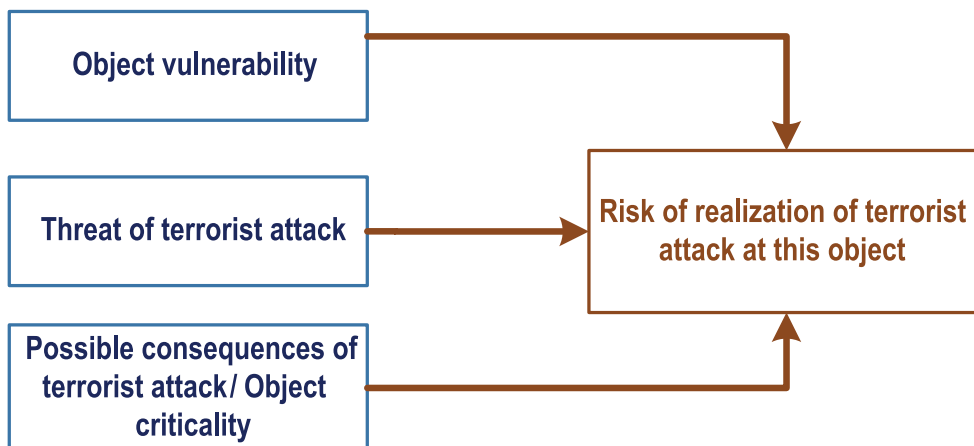


Fig. 2. Criteria taken into account for evaluation of risk of realization of terrorist attack to solve some tasks

Depending on the task to be solved, the task of evaluation of vulnerability of a protected object can be specific in relation to more general tasks, such as, for example, the task of development and correction of the strategy of risk management of a terrorist attack regarding this IEO, or the task of splitting of resources among IEOs located on the territory of a single administrative unit. In these cases the risk is considered as a function of vulnerability, threat and criticality of an object's nodes and subsystems (for the first task [1]) or consequences of terrorist attacks (for the second task [6]) (fig. 2).

Below we shall study criteria and factors defining IEO exposure to terrorist attacks and some other indices specified above, important for solving the tasks of an investigated family.

2. Criteria and factors significant for evaluation of IEO exposure to disturbing influences and their systematization

According to [5] and terminology adopted above, IEO exposure to terrorist attacks is defined by its attractiveness for terrorists and its vulnerability. IEO attractiveness for terrorists is defined by the following criteria or factors:

- **openness of an object:** an object can be secret and its existence can be known to a very limited circle of people;
- **usefulness of an object** in terms of its suitability or value for hitting their targets by terrorists;
- **availability of an object** for population;
- **mobility:** an object can be stationary or mobile;
- **availability of dangerous substances and materials** at an object;
- **possible concurrent damage:** damage for public or related objects and environment due to an attack at an object;
- **population of an object:** the number of people present at an object at one and the same time.

IEO vulnerability for terrorists is defined by the following factors [5] (fig. 3):

Perimeter of an object

- **security aspects taken into account** at the stage of planning area and landscape around an object;
- **parking lot security:** detachment of a road and parking lot from an object.

Building fencing

- **capability of building fencing to prevent DI or mitigate consequences.**

Inside space of an object

- **planning and architecture of inside space:** visibility of public and closed areas. Detachment of public and closed areas. Detachment of critical systems and processes;
- **protection and/or availability of backup** public water system and heating, ventilation and conditioning system;
- **electrotechnical systems:** availability of backup power and communications systems; functioning alarm system; sufficient illumination;
- **fire protection system:** sufficiency and protection of fire systems and water supplies; staff qualification; local rescue service awareness of an object's nature;
- **object's security system:** availability and sufficiency of CCTV equipment and security and staff.

A similar (in a substantial way) structure of criteria and factors described above is used in other sources as well [7].

It should be highlighted that an object's vulnerability is always evaluated in relation to predefined disturbing influences, or to be more precise, to predefined methods of terrorist attacks, i.e. means of destruction and ways of their application used by terrorists [2, 8]. A detailed description of terrorist methods is available in [9].

According to [9], one of the key factors that has to be taken into account when evaluating the vulnerability of objects is **redundancy, or availability of backup systems and resources that can ensure**

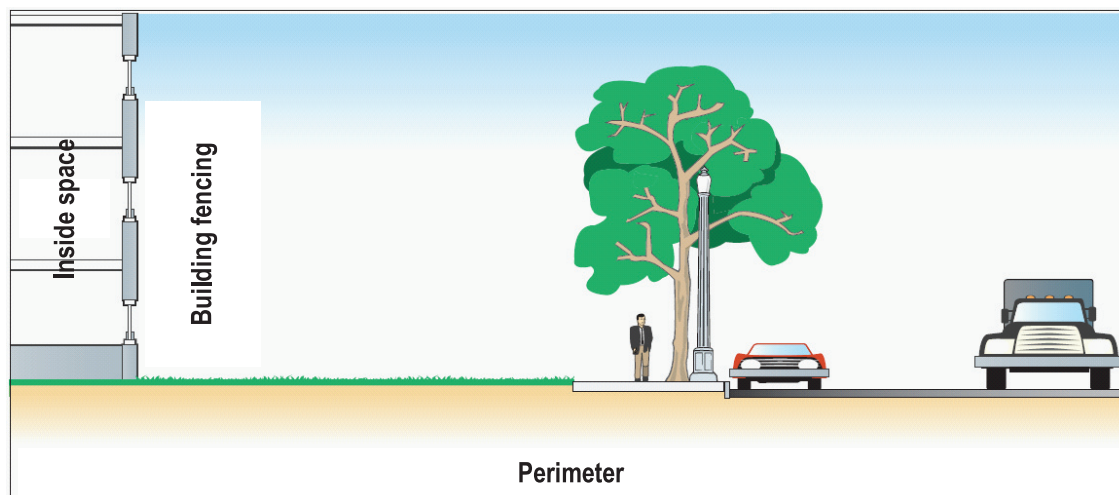


Fig. 3. Factors taken into account for evaluation of an object's vulnerability

IEO functioning in case of failure of primary systems and after a terrorist attack. IEO typical vulnerabilities related to this factor are:

- absence of redundancy;
- use of the same nodes and subsystems by primary and backup systems;
- collocation of primary and backup systems;
- absence of sufficient reserve of resources for IEO autonomous functioning immediately after a terrorist attack.

However scientifically and technically complex an object may be, no system can be purely technical as all technical processes and factors defining an object's functioning are closely intertwined with administrative, psychological, political and other human and social factors (fig. 4).

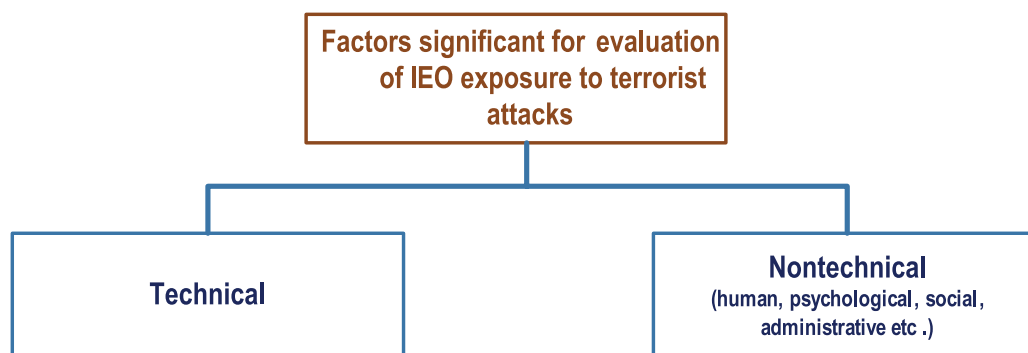


Fig. 4. Variant of classification of factors

The significance of these factors is confirmed by the results of analysis of a particular emergency – the accident happened at the drilling rig in the North Sea, made in [10]. The authors made a conclusion that 80% of equipment failures were due to nontechnical factors (human, psychological, social, administrative ones).

The high importance of these factors was also confirmed by a terrorist attack at the Domodedovo airport in January 2011. In opinions of recognized experts, one of the causes that terrorist managed to bring an explosive device into the airport building is the absence of “any teamwork on the part of several bodies in charge of transport security” [11].

Human and social factors can be identified as follows:

- level of staff qualification;
- staff reliability (motivation);

- coordination of activities of different bodies in charge of security;
- efficiency of protection measures etc.

Depending on the task in question and the type and level of a protected object, the structure and composition of criteria applied to evaluate its exposure to DI will change. When evaluating exposure to DI for objects of different levels, the same factors and criteria can be taken into account for evaluating the properties of IEO itself, i.e. IEO exposure to terrorist attacks, as well as its environment, i.e. topicality of a terrorist threat.

Thus, for example, if there is a task of evaluating exposure of different country regions to terrorist attacks, then one should consider geographical factors and those that influence a terrorist threat and typical for each specified territory, for example, such factors as:

- accessibility of a region for terrorists, i.e. its remoteness from sources of terrorism and terroristic bases;
- accessibility for making a terrorist attack or availability of allies – those are present in a greater number on a territory with a higher crime rate [7].

At the same time these factors will characterize the properties of the environment if an evaluated object is IEO located on this territory. The task of identification and structuring of criteria and factors significant for evaluation of a terrorist threat requires a more profound study and is not the objective of this paper, however we think it reasonable to mention some groups of factors characterizing a terrorist threat and found in sources considered in this paper.

In [12] threats as to the time of action are divided into two types – threats of permanent action and of temporary action.

According to [1], factors characterizing the level of a terrorist threat can belong to presence of a threat (causes, reasons for terroristic activities), possibility to commit a terrorist attack, activity of terrorists (availability of cases of committing terrorist attacks), expressed intentions to commit a terrorist attack, identified target of terrorist activities.

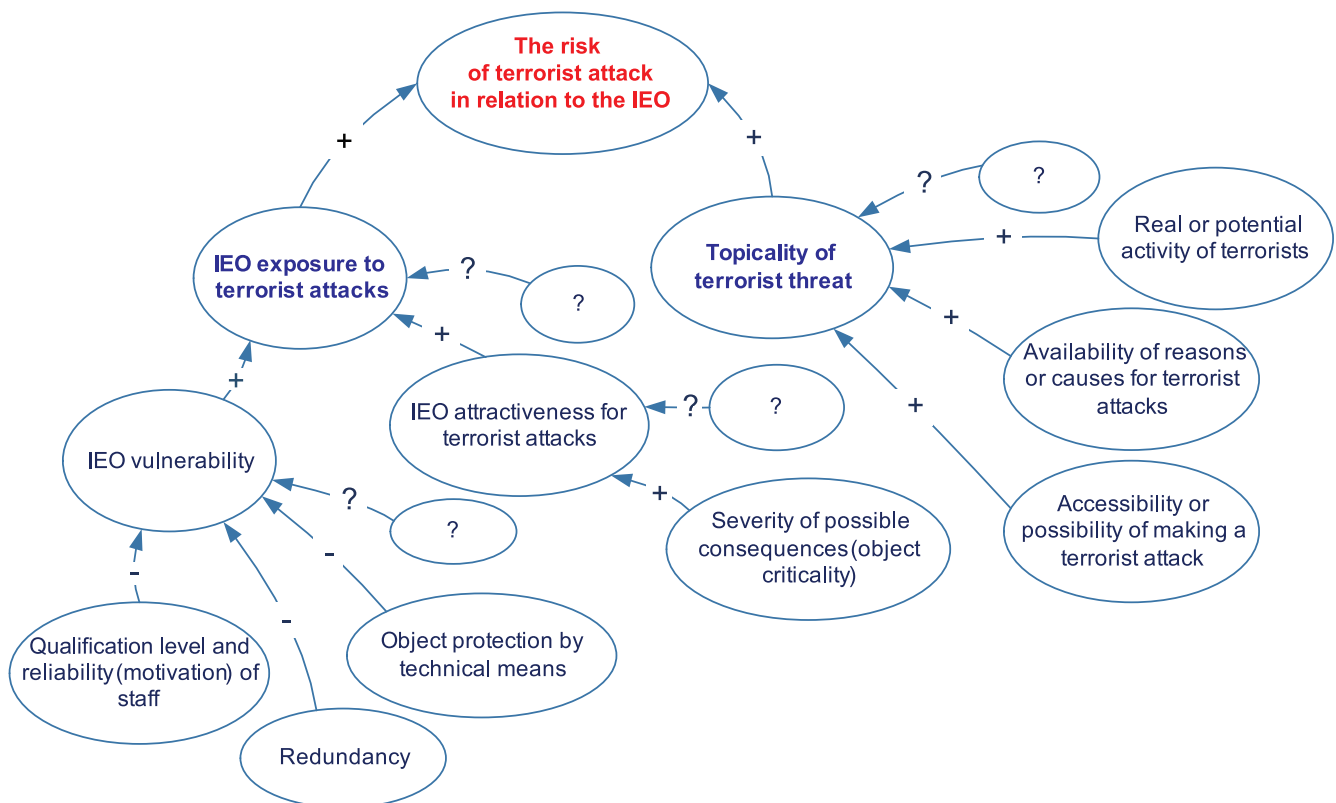


Fig. 5. Example of a cognitive map of factors and criteria significant for IEO exposure to terrorist attacks

The structure of criteria and factors determining IEO exposure to terrorist attacks is conveniently represented and analyzed in the form of a cognitive map. The example of such cognitive map for a hypothetical IEO is presented in fig. 5.

Conclusion

Therefore, the analysis of domestic and foreign scientific and methodology literature related to evaluation of IEO exposure to terrorist attacks allows us to state the following conclusions:

1. The evaluation of IEO exposure to terrorist attacks is reasonable to be made in a complex way, with the following indices taken into account:

- IEO attractiveness for terrorist in terms of getting public (intimidating population) and political (drawing the attention of international audience) resonance as well as possible economical consequences;
- IEO vulnerability, i.e. protection of an object against a terrorist attack.

2. To increase the reliability of results of evaluation of IEO exposure in relation to terrorist attacks, it is necessary to consider administrative, social, psychological and other human factors, along with traditionally considered – technical – ones.

3. Depending on the task in question and the type and level of a protected object, the structure and composition of criteria applied to evaluate its exposure to DI will change. When evaluating exposure to DI for objects of different levels, the same factors and criteria can be taken into account for evaluating the properties of IEO itself, i.e. IEO exposure to terrorist attacks, as well as its environment, i.e. topicality of a terrorist threat.

References

1. Reference Manual to Mitigate Potential Terrorist Attacks Against Buildings (FEMA 426). – Hyattsville, MD: U.S. Federal Emergency Management Agency, 2003. – 420 p.
2. National and global security. Terrorism in big city: evaluation of threats and protection/ Ed. **V.Z. Zvo-rykin**. – M.: Publishing house “Human rights”, 2002. – 113 p.
3. **Solano E.** Methods for Assessing Vulnerability of Critical Infrastructure. Institute for Homeland Security Solutions (IHSS), 2010.
4. **Baker G. A.** vulnerability assessment methodology for critical infrastructure sites. Department of Homeland Security symposium: R&D partnerships in homeland security. – Boston, Massachusetts, 2005. http://works.bepress.com/george_h_baker/2.
5. State and Local Mitigation Planning How-to Guide: Integrating Manmade Hazards into Mitigation Planning (FEMA 386-7). – Hyattsville, MD: U.S. Federal Emergency Management Agency, 2003. – 78 p.
6. **Willis H., Morral A., Kelly T., Medby J.** Estimating Terrorism Risk. – Santa Monica, CA: RAND Corporation, 2005. – 94 p.
7. **Radaev N., Bochkov A.** Evaluation of terrorist threat for an object/ BDI (Security. Reliability. Information). – 2008. – № 2. – P. 16-19.
8. DHS Risk Lexicon. – Wash.: U.S. Department of Homeland Security, 2010. – 72 p.
9. A How-To Guide to Mitigate Potential Terrorist Attacks Against Buildings (FEMA 452). – Hyattsville, MD: U.S. Federal Emergency Management Agency, 2005. – 248 p.
10. **Bea R., Mitroff I., Farber D., et al.** A new approach to risk // Risk Management. – 2009. – Vol. 11, 1. – 30-43 pp.
11. **Kuvaldin S., Silaev N.** Terror with Russian money // Expert. – 2011. – № 4 (738). – P. 17-21.
12. **Brooks N.** Vulnerability, Risk and Adaptation: A Conceptual Framework. – Norwich: Centre for Social and Economic Research on the Global Environment (CSERGE). School of Environmental Sciences. University of East Anglia, 2003. – 20 p.

**Ермаков А.О.**

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРЕДЕЛЬНОГО СОСТОЯНИЯ ОБЪЕКТОВ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЙ ТЕХНИКИ

Предложен подход к определению предельного состояния железнодорожной техники на основе критерия недопустимости эксплуатации объекта с учетом оценки риска. Критерии предельных состояний должны быть заданы в технической документации на железнодорожную технику.

Ключевые слова: предельное состояние, критерий предельного состояния, железнодорожная техника, техническое состояние, отказ, износ.

1. Общие положения

Критерии предельного состояния используют для того, чтобы понять, когда необходимо временно или окончательно прекратить эксплуатацию объекта. При достижении предельного состояния объект может быть:

- направлен в ремонт для восстановления ресурса;
- выведен из эксплуатации (списан или передан для применения не по назначению) и заменен на новый;
- подвергнут реконструкции или модернизации.

Схема принятия решений в отношении объекта на основе критериев предельного состояния и их использование в течение срока службы приведены на рис. 1, где приняты следующие сокращения: ПС – предельное состояние объекта; ТУ – технические условия; НТД- нормативно-техническая документация.

Критерии предельного состояния, так же как и критерии отказов, устанавливают на стадии разработки для каждого вида объекта (его отдельных узлов, деталей). Здесь под объектом понимается продукция (железнодорожный подвижной состав, силовые трансформаторы, аппаратура железнодорожной электросвязи и т.п.), конструкции (мост, тоннель), территориально распределенные системы (участок контактной сети, система сигнализации, централизации и блокировки на перегонах и станциях и т.п.).

В соответствии с [1] для невосстанавливаемых объектов имеет место предельное состояние двух видов:

- 1) предельное состояние совпадает с неработоспособным состоянием (т.е. критерий предельного состояния совпадает с критерием отказа);

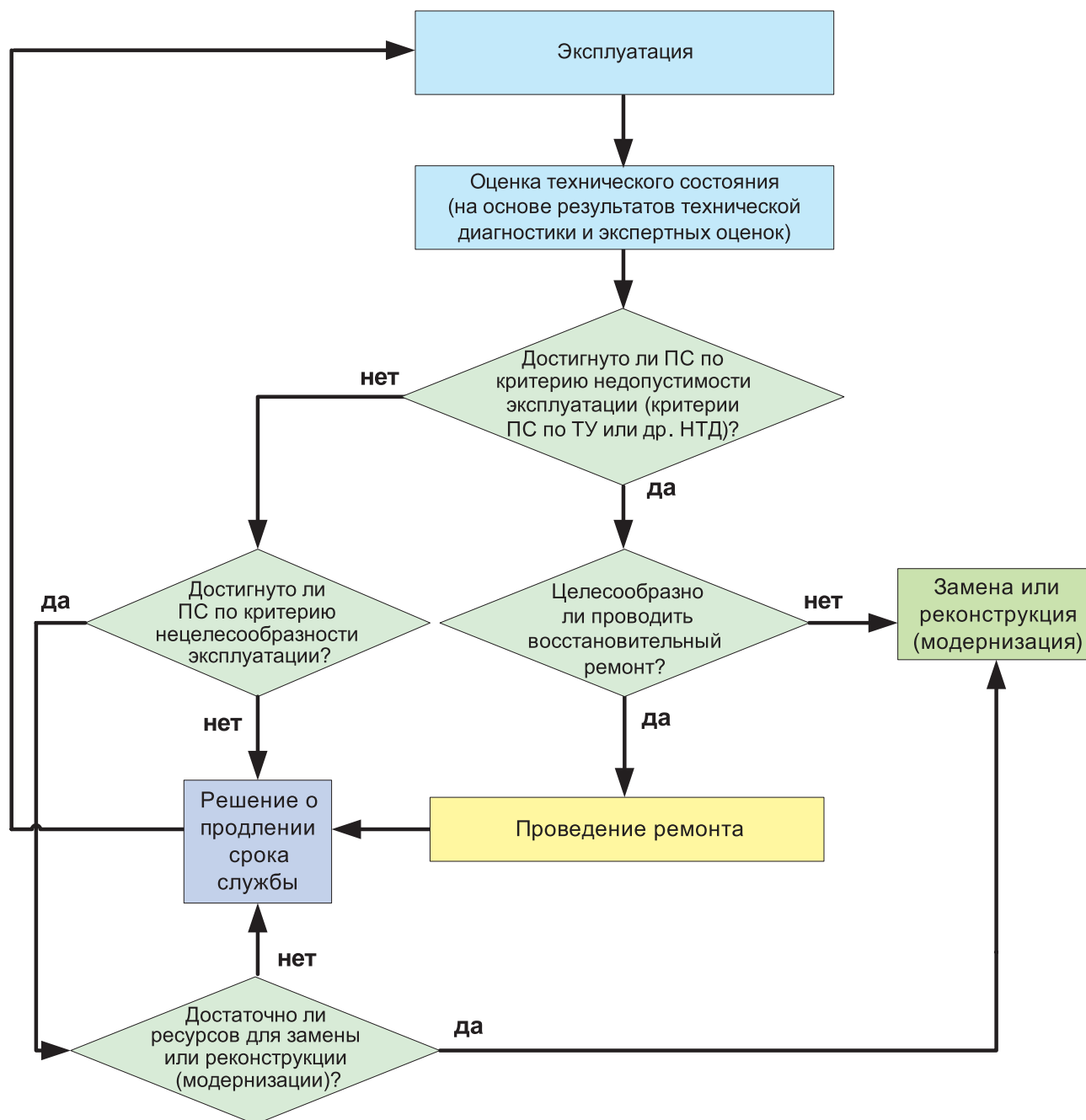


Рис. 1. Схема принятия решений в отношении объекта на основе критериев предельного состояния

2) второй вид предельного состояния обусловлен тем, что начиная с некоторого момента времени, дальнейшая эксплуатация еще работоспособного объекта оказывается недопустимой по безопасности или нецелесообразной по экономическим соображениям (например, в связи с моральным устареванием). Переход невосстанавливаемого объекта в предельное состояние второго вида происходит до потери объектом работоспособного состояния.

Для восстанавливаемых объектов выделяют два или более видов предельных состояний, например, дополнительно к указанным выше, предельное состояние, при котором требуется отправка объекта на капитальный ремонт.

Критерии предельного состояния должны характеризовать:

- недопустимость эксплуатации объекта на основе оценки риска;
- нецелесообразность эксплуатации объекта на основе оценки риска.

Эксплуатация недопустима в случае, когда не обеспечен требуемый уровень безопасности, т.е. риск эксплуатации объекта превышает допустимый уровень.

Нецелесообразность эксплуатации определяется снижением эффективности использования железнодорожной техники, что связано с увеличением стоимости жизненного цикла или моральным износом объекта.

2. Предельное состояние по критерию недопустимости дальнейшей эксплуатации

Как известно, риск – это сочетание вероятности (частоты) события и его последствий. В контексте определения предельного состояния под событием следует понимать отказ (опасный отказ) объекта или возникновение неисправностей (дефектов), при наличии которых эксплуатация не допускается. На протяжении срока службы риск эксплуатации имеет тенденцию постепенно увеличиваться в связи с ухудшением технического состояния объекта с течением времени. При этом проведение технического обслуживания и ремонта позволяет снизить частоту возникновения отказов (неисправностей) и соответственно снизить риск. Затем техническое состояние снова ухудшается и риск растет. Поэтому кривую значений риска в течение эксплуатации можно качественно представить в виде «пилообразной» кривой (рис. 2).

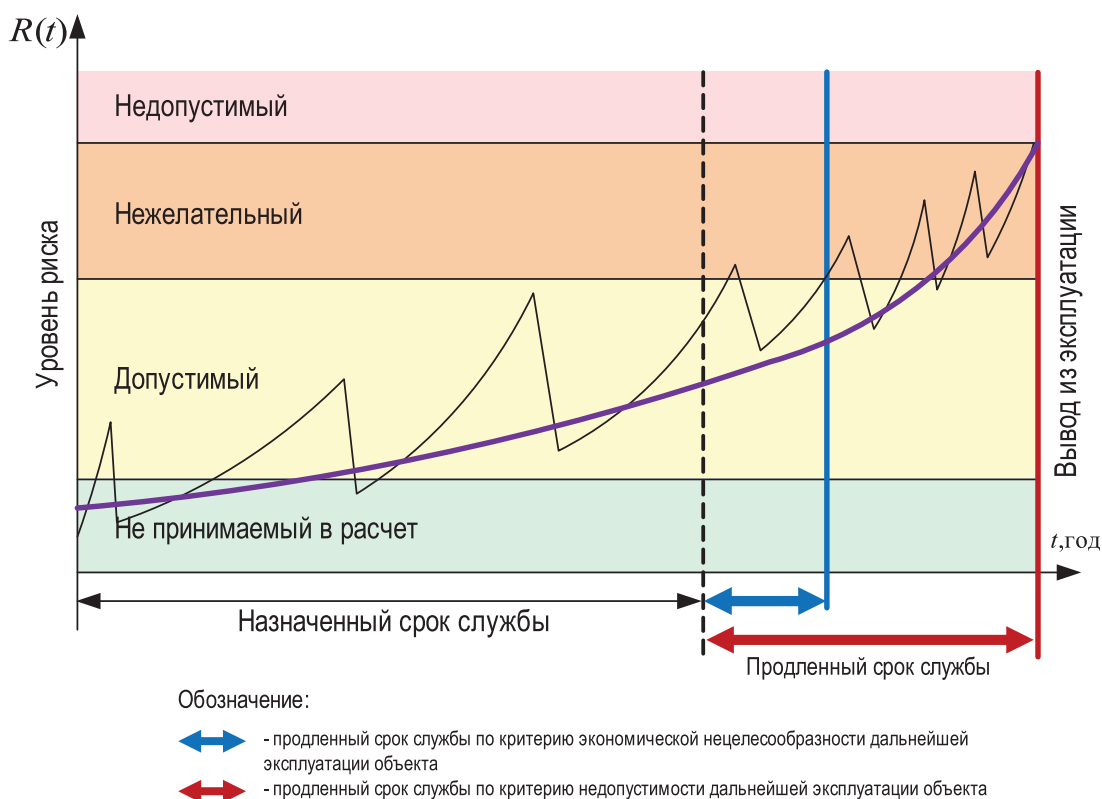


Рис. 2. Изменение уровня риска, связанного с функционированием объекта, в течение срока службы

На рис. 3 и 4 для примера приведены варианты изменения интенсивности отказов в течение срока службы для разных видов отказов и соответствующие им плотности распределения вероятности последствий. Шкала уровня рисков на рис. 2 и шкала интенсивностей отказов на рис. 3 выбраны в соответствии с [2].

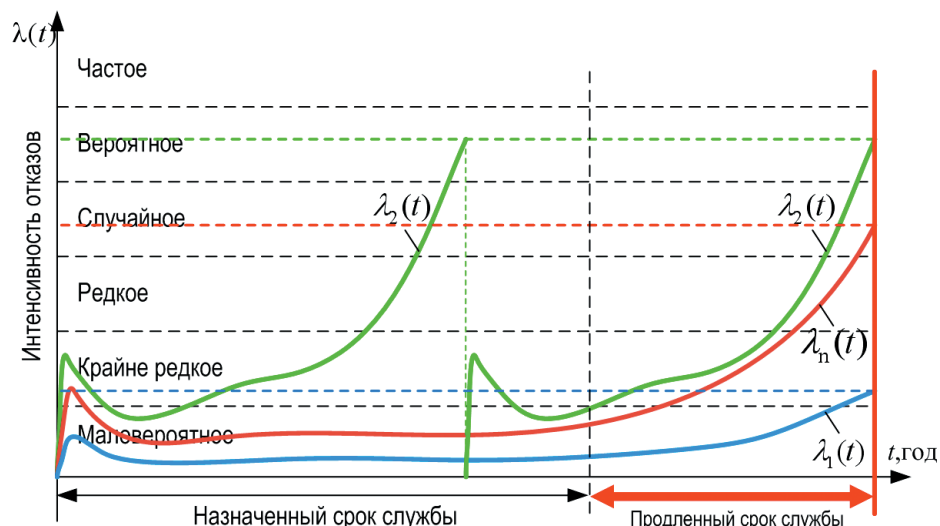


Рис. 3. Зависимости интенсивностей отказов от срока службы для различных видов отказов объекта

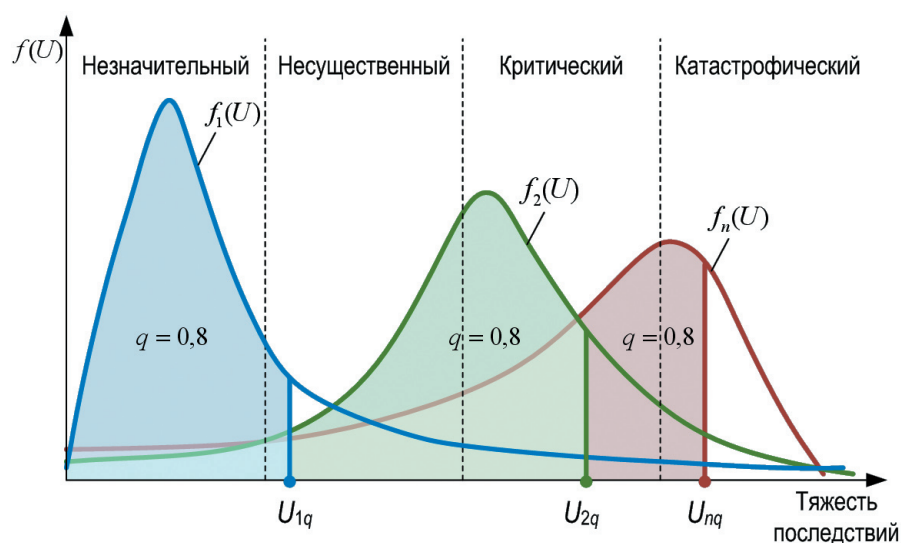


Рис. 4. Плотности распределения тяжести последствий для различных видов отказов объекта

Примечание – U_{1q} , U_{2q} , U_{3q} – квантили плотностей распределения тяжести последствий отказов различных видов объекта (они соответствуют значениям тяжести последствий для i -го вида отказов объекта, при котором соответствующая функция распределения вероятности тяжести последствий принимает заданное значение, например, 0,8).

Соответственно общий риск на протяжении срока службы определяется по выражению:

$$R(t) = U_{1q}\lambda_1(t) + U_{2q}\lambda_2(t) + \dots + U_{nq}\lambda_n(t) = \sum_{i=1}^n U_{iq}\lambda_i(t), \quad (1)$$

где U_{iq} – квантили плотностей распределения тяжести последствий отказов различных видов объекта;

$\lambda_i(t)$ – интенсивность отказов объекта i -го вида;

n – количество видов отказов.

Так как предельное состояние, по сути, отражает некий уровень технического состояния объекта, когда необходимо приостановить его эксплуатацию, то следует рассмотреть более подробно вероятностную составляющую риска, которая представляет собой интенсивность отказов (опасных отказов) или частоту возникновения неисправностей (дефектов), при наличии которых эксплуатация не допускается.

Таким образом, одним из критериев предельного состояния является заданная допустимая величина интенсивности отказов объекта.

Для того чтобы ее определить необходимо знать из-за чего и как возникают те или иные отказы, т.е. выявить причины и механизмы возникновения отказов.

Также критерии предельного состояния представляют собой набор параметров (характеристик) железнодорожной техники и их предельных значений, а в некоторых случаях качественных признаков, которые отражают техническое состояние железнодорожной техники.

Если предельное значение параметра технического состояния установлено в нормативной документации, дополнительной регламентации предельной величины не требуется.

Если предельное значение параметра технического состояния не установлено в нормативной документации, то его должен определить разработчик в зависимости от:

- условий эксплуатации, в том числе вида и режима эксплуатационного нагружения;
- закономерностей механизмов повреждений;
- практики эксплуатации и др.;

и привести это значение в технической (проектной) документации на объект.

3. Основные факторы, учитываемые при определении критериев предельного состояния

Критерии предельного состояния объекта зависят от совокупности факторов, воздействию которых подвергаются объект или его отдельные элементы в процессе их работы.

Совокупность факторов можно разделить на следующие группы:

- 1) силовое нагружение;
- 2) термомеханическое нагружение;
- 3) воздействие, обусловленное трением;
- 4) коррозионно-эрозионное воздействие;
- 5) электромагнитное воздействие.

Силовое нагружение представляет собой воздействие на элемент конструкции внешней сосредоточенной и распределенной силы, вызывающей внутри материала соответствующее противодействие в форме распределенных по сечению внутренних сил. Внешним проявлением силового нагружения является деформация.

Термодинамическое нагружение обусловлено тепловым удлинением элемента конструкции при ограничении его деформирования.

Воздействие, обусловленное трением, возникает при относительном движении элементов конструкции. Внешним проявлением является изменение размера и (или) формы сопрягаемых деталей в результате изнашивания.

Коррозионно-эрозионное воздействие представляет собой постепенное изменение размеров элемента конструкции или свойств материала в результате физико-химических взаимодействий элемента конструкции с внешней агрессивной средой.

Электромагнитное воздействие обусловлено протеканием электрического тока или наличием внешних электромагнитных излучений.

Чаще всего на объект действуют факторы из нескольких групп сразу.

Силовое и термомеханическое нагружения характеризуют критерий конструктивной прочности. Численное значение этого критерия описывается оптимальным распределением напряженно-деформированного состояния конструкции, т.е. такого уровня напряжений во всех сечениях и точках деталей, который бы исключил возможность образования и рост дефектов (например, трещин). Численные значения этого критерия определяются расчетами и могут контролироваться с помощью методов неразрушающего контроля.

Также критерий предельного состояния в данном случае может быть установлен в виде предельно допустимых значений деформаций, например, предельно допустимый размер трещины.

Основы расчетов на прочность, а также их специфику с учетом рассматриваемых конструкций железнодорожной техники приведены в следующих стандартах [3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10].

Критерий предельного состояния по воздействию, обусловленному трением, обычно задается в виде предельного значения износа детали по [11].

Предельным состоянием элементов конструкции, подвергающихся при эксплуатации коррозионно-эрозионному разрушению, является уменьшение размера элемента конструкции до предельной (расчетной) величины, ниже которой не обеспечивается необходимый запас его несущей способности,

Таблица 1. Влияние факторов нагружения на возникновение предельного состояния некоторых объектов и элементов инфраструктуры железнодорожного транспорта

Перечень объектов	Перечень элементов	Силовое нагружение	Термомеханическое нагружение	Трение (изнашивание)	Коррозионно-эрозионное воздействие	Электромагнитное воздействие
Хозяйство электрификации и электроснабжения						
Контактная сеть	1. Металлические опоры	+			+	+
	2. Изоляторы контактной сети					+
	3. Контактный провод			+	+	+
Тяговая подстанция	1. Силовой трансформатор	+				+
	2. Высоковольтные вводы					+
	3. Выключатель переменного тока					+
Хозяйство пути и сооружений						
Верхнее строение пути	1. Рельсы железнодорожные для звеньев и бесстыкового пути	+	+	+	+	
	2. Шпалы железобетонные для различных типов креплений	+			+	
	3. Щебеночный балласт	+				
Хозяйство автоматики и телемеханики						
1. Дроссель-трансформатор						+
2. Электропривода (стрелочные, автошлагбаумов, УЗП)						+
3. Релейные, батарейные шкафы и модули для размещения аппаратуры СЦБ		+		+	+	+

или предельные размеры повреждений. Следует учитывать то обстоятельство, что глубина отдельных локальных повреждений (исключая трещины) может значительно превышать среднюю глубину повреждений (вплоть до сквозного разрушения) и не нарушать несущей способности элемента. Допустимое количество (доля) повреждений на поверхности и их размеры должны регламентироваться в зависимости от характера нагрузки на элементы и свойств применяемых материалов.

В части влияния электромагнитных воздействий предельное состояние связано с изменением свойств материалов и характеризуется изменением электрических параметров работы устройств ниже (выше) предельно допустимых.

В таблице 1 на примере трех хозяйств инфраструктуры железнодорожного транспорта показано, какие ключевые факторы влияют на возникновение предельного состояния ключевых объектов и элементов этих хозяйств инфраструктуры.

Заключение

Предложенный подход к определению предельного состояния объектов железнодорожной техники по критерию недопустимости эксплуатации объекта с учетом оценки рисков позволит на основе данных о фактическом техническом состоянии объекта разработать, с учетом экономических факторов, правила принятия одного из следующих решений:

- направить в ремонт для восстановления ресурса;
- вывести из эксплуатации (списать или передать для применения не по назначению) и заменить на новый;
- подвергнуть реконструкции или модернизации.

Автор выражает благодарность д.т.н., профессору И.Б. Шубинскому за помощь, оказанную при подготовке данной статьи.

Литература

1. ГОСТ 27.002-89 Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения.
2. ГОСТ Р 54505-2011. Управление рисками на железнодорожном транспорте.
3. ГОСТ Р 55050-2012 Железнодорожный подвижной состав. Нормы допустимого воздействия на железнодорожный путь и методы испытаний.
4. ГОСТ Р 55495-2013 Моторвагонный подвижной состав. Требования к прочности и динамическим качествам.
5. ГОСТ Р 55513-2013 Локомотивы. Требования к прочности и динамическим качествам.
6. ГОСТ 25.001-78 Расчеты и испытания на прочность в машиностроении. Комплекс нормативно-технической и руководящей документации. Общие положения.
7. ГОСТ 25.101-83 Расчеты и испытания на прочность. Методы схематизации случайных процессов нагружения элементов машин и конструкций и статистического представления результатов.
8. ГОСТ 25.504-82 Расчеты и испытания на прочность. Методы расчета характеристик сопротивления усталости.
9. ГОСТ 27609-88 Расчеты и испытания на прочность в машиностроении. Основные положения и требования к проведению и нормативно-техническому обеспечению.
10. ГОСТ 27674-88 Трение, изнашивание и смазка. Термины и определения.
11. ГОСТ 30479-97 Обеспечение износостойкости изделий. Методы установления предельного износа, обеспечивающего требуемый уровень безопасности. Общие требования.



Ermakov A.O.

MODEL OF IDENTIFICATION OF RAILWAY EQUIPMENT'S LIMIT TOLERANCE STATE

The paper offers an approach to definition of a limit tolerance state of railway equipment based on the criterion that exploitation of an object on the basis of risk evaluation is unacceptable. Criteria of limit tolerance states shall be specified in specifications for railway equipment.

Keywords: *limit tolerance state, limit tolerance state criteria, railway equipment, technical state, failure, wear, tear.*

1. General information

The criteria of limit tolerance state are used to understand when the operation of an object shall be terminated temporarily or permanently. When reaching limit tolerance state, an object can:

- be transferred into repair for recovering resource;
- be removed from operation (decommissioned or transferred for application for other purposes than intended) and replaced with a new one;
- undergo reconstruction or modernization.

The scheme of decision making as regards an object based on limit tolerance criteria and their use during a life cycle are presented in fig. 1, where we define as LTS – limit tolerance state, TC – technical conditions, and specs – specifications.

The criteria of limit tolerance state as well as failure criteria are specified at the stage of designing for each kind of an object (its separate nodes, items). Here an object means products (railway fleet, power converters, railway telecommunication equipment etc.), constructions (bridges, tunnels), territorially distributed systems (catenary sections, signalling and interlocking equipment on open lines and at stations etc.).

According to GOST [1], for unrecoverable objects there are two kinds of limit tolerance state:

- 1) limit tolerance state corresponds to disabled state (i.e. the criterion of limit tolerance state corresponds to a failure criterion);
- 2) the second kind of limit tolerance state is conditioned by the fact that starting from some moment further operation of a still serviceable object starts to be unacceptable in terms of safety or unreasonable

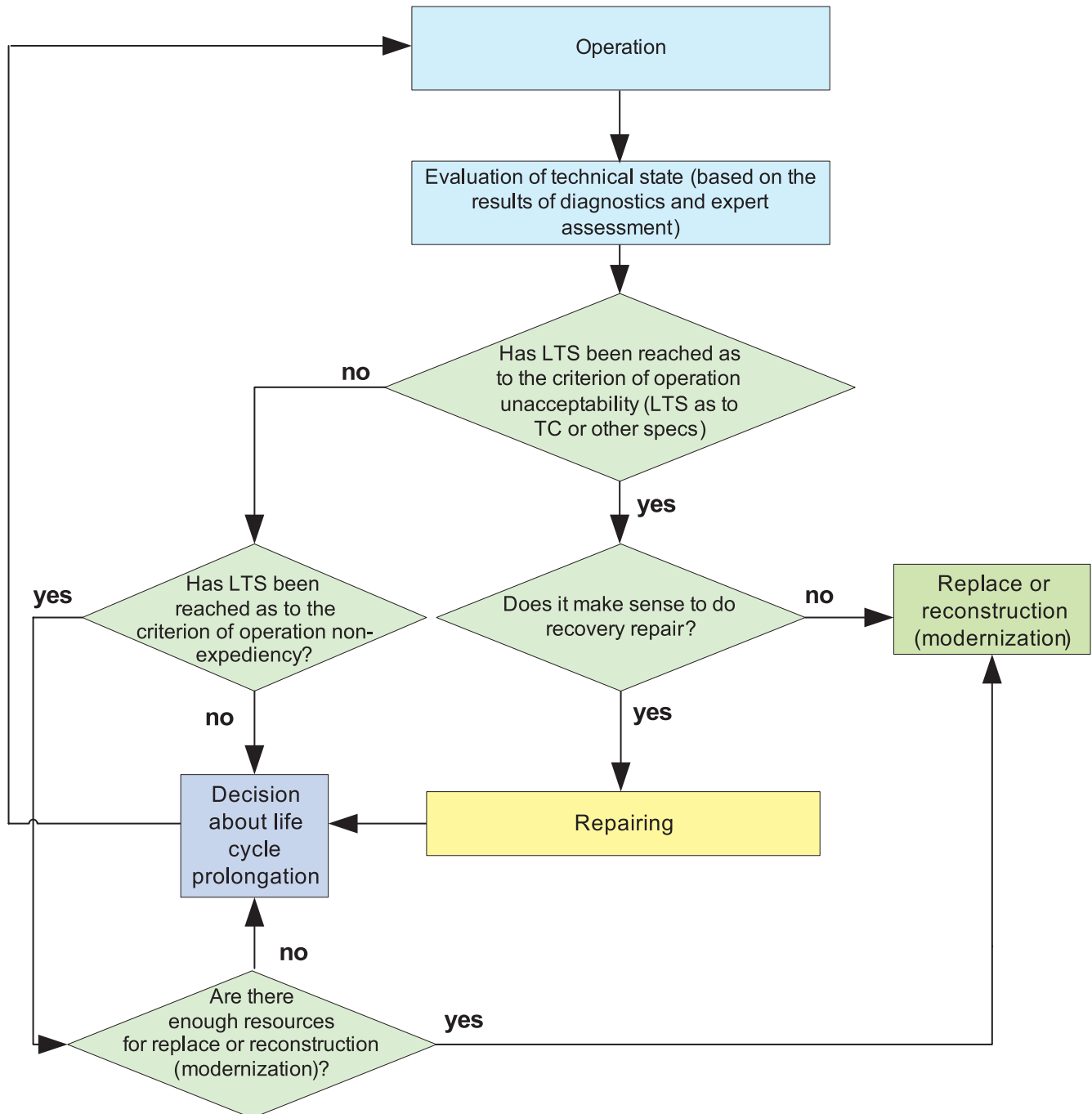


Fig. 1. Scheme of decision making as regards an object based on limit tolerance criteria

in terms of economical considerations (for example, due to obsolescence). The transfer of an unrecoverable object into limit tolerance state of the second kind takes place before the object losing its serviceable state.

For recoverable objects, there are two or more types of limit tolerance states, for example, in addition to those specified above, limit tolerance state requiring the transfer of an object into repair.

With the definition of the term “limit tolerance state” taken into account, the criteria of limit tolerance state should demonstrate that:

- the operation of an object based on risk evaluation is unacceptable;
- the operation of an object based on risk evaluation is unreasonable.

The operation is unacceptable in case that a required level of safety is not provided, i.e. the risk of an object's operation exceeds an accepted level.

Non-expediency of operation is defined by reduction of railway equipment operation efficiency, which is related to increase of life cycle cost or obsolescence of an object.

2. Limit tolerance state as to the criterion of further operation being unacceptable

As we know, the risk is a combination of an event's probability (frequency) and its consequences. In the context of definition of limit tolerance state, an event has to be meant a failure (hazardous failure) of an object or emergence of malfunctions (defects), with whose presence the operation is not acceptable. During life cycle, operation risk tends to gradually increase due to deterioration of technical state of an object as the time goes. Technical maintenance and repairing allow reducing the frequency of failures (malfunctions) and correspondingly reducing the risk. Then the technical state again deteriorates and the risk increases. Therefore, the curve of risk values during maintenance can be qualitatively represented as a saw-toothed curve (fig. 2).

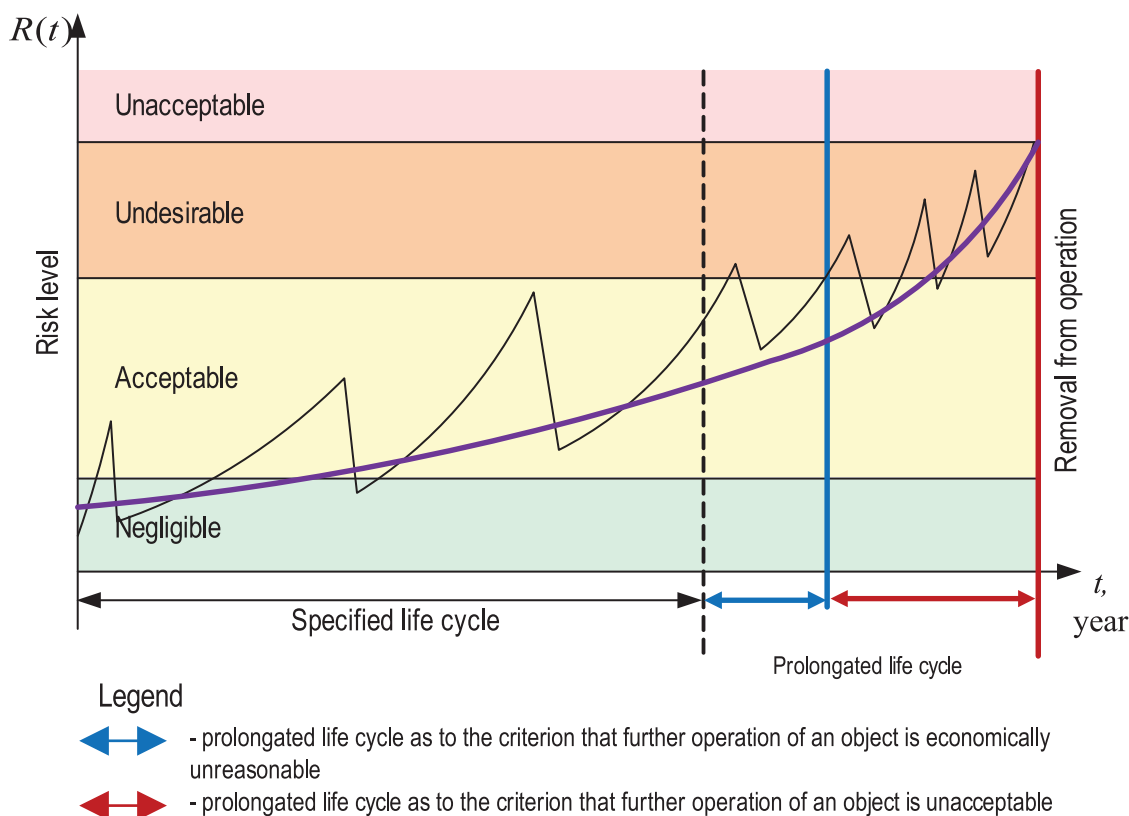


Fig. 2. Risk level changing related to the functioning of an object during its life cycle

Fig. 3 and 4 exemplify the variants of changing of failure rates during life cycle for various types of failures and corresponding densities of distribution of consequence probabilities. The scale of risk levels in fig. 2 and the scale of failure rates in fig. 3 are chosen in accordance with GOST R [2].

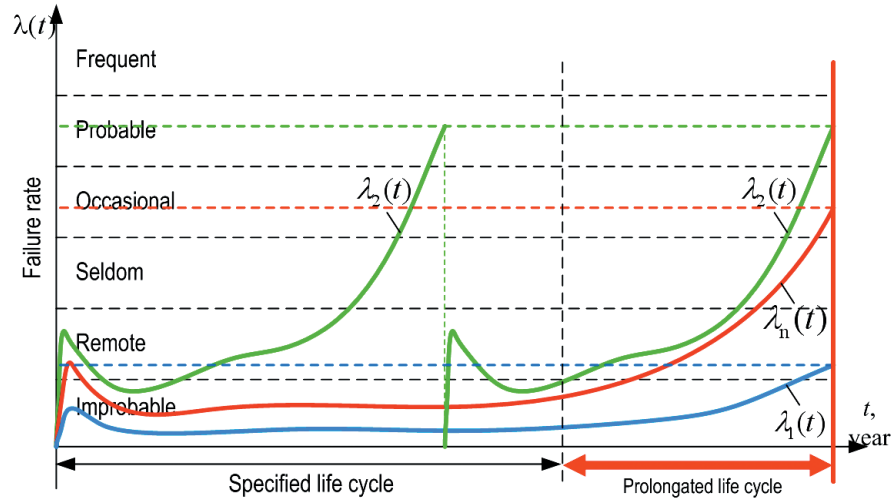


Fig. 3. Relation between failure rates and life cycles for different kinds of object failures

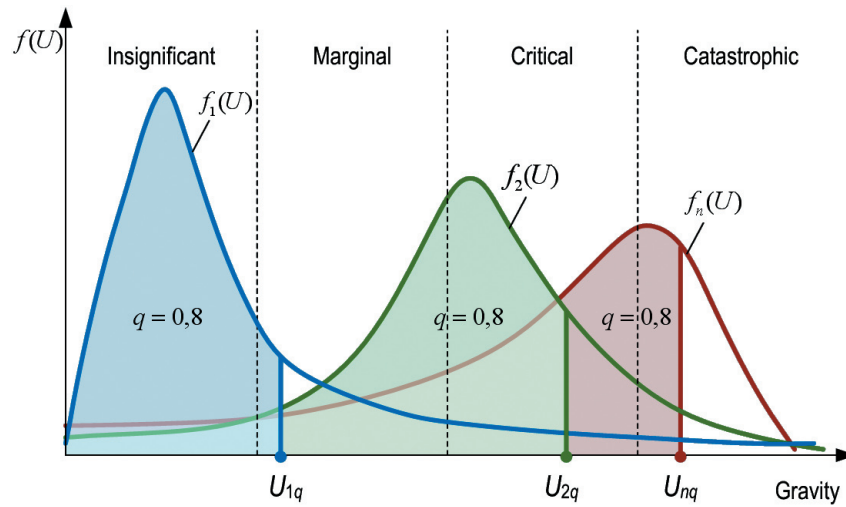


Fig. 4. Densities of distribution of consequence gravity for different kinds of object failures

Note: U_{1q} , U_{2q} , U_{3q} are fractiles of densities of distribution of failure consequences gravity for various types of objects (they correspond to consequences gravity values for the i -th type of object failures when a corresponding function of distribution of consequences gravity probability takes on a predefined value, for example, 0,8).

Correspondingly, the total risk during life cycle is defined by the expression

$$R(t) = U_{1q}\lambda_1(t) + U_{2q}\lambda_2(t) + \dots + U_{nq}\lambda_n(t) = \sum_{i=1}^n U_{iq}\lambda_i(t), \quad (1)$$

where U_{iq} is fractiles of distribution of failure consequences gravity for various kinds of objects;
 $\lambda_i(t)$ is an object failure rate of the i -th type;
 n is the number of failure types.

As limit tolerance state actually reflects some level of technical state of an object when it is necessary to cease its maintenance, we should consider in detail a probabilistic constituent of risk which presents

a failure rate (hazardous failures) or a frequency of emergence of malfunctions (defects), with whose presence the operation is not acceptable.

Therefore, one of the criteria of limit tolerance state is a predefined acceptable value of an object failure rate.

In order to define it, it is necessary to know why and how particular failures occur, i.e. to find out the causes and mechanisms of failure emerging.

Also the criteria of limit tolerance state presents a set of parameters (characteristics) of railway equipment and their limit tolerance values, as well as in some cases quality attributes that reflect technical state of railway equipment.

If a limit value of a technical state parameter is specified in normative documents, the limit value doesn't require extra regulation.

If a limit value of a technical state parameter is specified in normative documents, the limit value should be specified by a developer in relation to:

- operation conditions, including the type and mode of operational stressing;
 - patterns of damage mechanisms;
 - operational practice etc.,
- and give this value in technical (design) documents for a particular object.

3. Major factors taken into account for definition of limit tolerance state criteria

The criteria of an object's limit tolerance state depend on the set of factors influencing the object or its individual elements in process of their operation.

This set of factors can be divided into the following groups:

- 1) power stressing;
- 2) thermomechanical stressing;
- 3) influence conditioned by friction;
- 4) corrosive and erosive influence;
- 5) electromagnetic influence.

Power stressing presents influencing an element of construction by an outside concentrated and distributed force provoking inside the material a corresponding counteraction in the form of inner sectionally distributed forces. An outer representation of power stressing is deformation.

Thermodynamic stressing is conditioned by heat elongation of a construction element in case of limiting its deformation.

The influence conditioned by friction occurs in case of relative movement of construction elements. The outer representation is a change in size and (or) form of conjugated parts in the process of wearing and tearing.

Corrosive and erosive influence presents a gradual change in sizes of a construction element or properties of the material as a result of physical and chemical interactions of a construction element with the aggressive outside environment.

Electromagnetic influence is conditioned by passing of electric current or presence of outside electromagnetic emissions.

More often than not factors belonging to several groups influence an object.

Power and thermomechanical stressing characterize a criterion of constructive robustness. The numeric value of this criterion is described by an optimal distribution of stressed and deformed state of a construction, i.e. by such level of stress in all sections and part points that would exclude the possibility

of forming and growing of defects (for example, fractures). Numeric values of this criterion are defined by calculations and can be controlled by means of methods of non-destructive testing.

Also the criterion of a limit tolerance state in this case can be defined in the form of maximum acceptable values of deformations, for example, a maximum acceptable size of fracture.

The bases of robustness calculations as well as their specific features considering the constructions of railway equipment studied here are presented in the following standards [3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10].

The criterion of a limit tolerance state as to influence conditioned by friction is usually defined in the form of a limit value of wear and tear of a part according to GOST [11].

The limit tolerance state of construction elements suffered during operation from corrosive and erosive damages is a decrease in size of a construction element down to a limit (calculated) value, when its carrying capability is not provided in case of reaching lower values, or limit sizes of defects. One should take into account the fact that the depth of individual local defects (not including fractures) can considerably be higher than the average depth of defects (up to cut-through destruction) without compromising the carrying capability of an element. The accepted number (share) of defects on the surface and their sized should be regulated depending on the nature of load on elements and the properties of used materials.

As regards electromagnetic influence, limit tolerance state is related to a change of properties of materials and characterized by a change of electrical parameters of equipment operation lower (higher) than the maximum acceptable ones.

Table 1 exemplifies key factors that influence on emergence of limit tolerance state of major infrastructure objects and elements using three infrastructure enterprises as examples.

Table 1. Influence of stressing factors on emergence of limit tolerance state of some railway infrastructure objects and elements

List of objects	List of elements	Power stressing	Thermodynamic stressing	Friction (wear and tear)	Corrosive and erosive influence	Electromagnetic influence
Power supply and electrification						
Catenary	1. Metallic pillars	+			+	+
	2. Catenary					+
	3. Overhead wire			+	+	+
Power substation	1. Power transformer	+				+
	2. High-voltage lead wires					+
	3. Alternate current switches					+
Tracks and constructions						
Superstructure	1. Rails for jointed and jointless track для	+	+	+	+	
	2. Concrete sleepers for various types of fastening	+			+	
	3. Ballast stone	+				
Signalling and remote control						
	1. Impedance bond					+
	2. Electrical machines (point machines, crossing barriers, crossing signalling)					+
	3. Relay, battery cabinets and modules for signalling equipment	+		+	+	+

Conclusion

The above approach to definition of limit tolerance state of railway equipment as to criteria of inadmissibility or unreasonableness of object operation based on risk evaluation will allow, on the basis of data on actual technical state of an object, with economical factors taken into account, elaborating the rules for making one of the following decisions:

- to transfer an object into repair to recover resource;
- to remove an object from maintenance (decommission or transfer for application for other purposes than intended) and replace with a new one;
- to submit for reconstruction or modernization.

The author thanks Doctor of technical sciences, Professor I.B. Shubinsky for the assistance in preparing this paper.

References

1. GOST 27.002-89 Dependability in equipment. General concepts. Terms and definitions.
2. GOST R 54505-2011 Risk management on railway transport.
3. GOST R 55050-2012. Railway rolling stock. Rates of acceptable influence on railway track and testing methods.
4. GOST R 55495-2013 Electrical multiple units. Requirement for robustness and dynamic properties.
5. GOST R 55513-2013 Locomotives. Requirement for robustness and dynamic properties.
6. GOST 25.001-78 Calculations and robustness testing in machinery production. A set of normative and regulating documents. Guidelines.
7. GOST 25.101-83 Calculations and robustness testing. Methods of schematization of random processes of stressing of machine and construction elements and statistical representation of results.
8. GOST 25.504-82 Calculations and robustness testing. Methods of calculation of fatigue resistance parameters.
9. GOST 27609-88 Calculations and robustness testing in machinery production. Main provisions and requirements for testing and documents.
10. GOST 27674-88 Friction, wear and lubrication. Terms and definitions.
11. GOST 30479-97 Provision of products durability. Methods of definition of limit tolerance wear ensuring a required level of safety. General requirements.

**Дзиркал Э.В.**

МЕТОД ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОГО КОНТРОЛЯ Н.О.ДЕМИДОВИЧА

Покойный наш коллега Николай Олегович Демидович успел разработать и оставить нам прекрасный метод последовательного контроля надёжности (и других подобных свойств изделий), существенно превосходящий «классический» (т.е. вошедший во все учебники) метод американца Вальда. Мало кто узнает теперь метод Демидовича в ГОСТ Р 27.402-95 и в IEC 61124. Первые его статьи относятся к 1960-м годам. Метод, использующий ЭВМ и формулы, позволяет подобрать границы последовательного контроля так, чтобы обеспечить точные значения заданных рисков. Границы Н.О. Демидовича могут образовывать область неопределённости любой формы, в т.ч. замкнутую, не требующую усечения. Данная статья написана, чтобы восстановить приоритет Н.О. Демидовича (и тем самым – России) в вопросах последовательного контроля и заменить им Вальда (воздав, конечно, последнему заслуженные почести).

Ключевые слова: метод Демидовича, последовательный контроль, риски поставщика и заказчика.

1. Введение. Общая методика последовательного контроля надёжности

Последовательный контроль надёжности (и других подобных параметров) сводится к тому, что в каждый момент наблюдений некоторая величина примеряется к двум границам: приёмки и браковки. Между границами – область неопределённости (при попадании туда испытания продолжают). При испытаниях на надёжность результат суммирования наработок и отказов наносят на график плана испытаний в виде ступенчатой линии (линии реализации процесса отказов). Такой график для классического последовательного метода А.Вальда качественно показан на рис. 1. Испытания продолжают до тех пор, пока линия реализации процесса отказов не достигнет границы приемки (нижняя линия на рис.1) или границы браковки (верхняя линия).

Метод А.Вальда, вошедший во все учебники, не предполагает каких-либо ограничений по времени испытаний. Как только область неопределённости Вальда усекают – тут же заметно (и неизвестно, насколько) возрастают риски поставщика и потребителя. На каком уровне эту область усекать, никто не знает – тут полный произвол, и это главный недостаток метода Вальда.

Н.О.Демидович разработал метод, позволяющий подобрать границы так, что последовательный контроль с их использованием обеспечит точные значения заданных рисков. Границы Н.О.Демидовича могут образовывать область неопределённости любой формы, в т.ч. замкнутую,

не требующую усечения (сам он принял треугольную). Метод признан специалистами ИСО/МЭК, узаконен в РФ стандартом ГОСТ Р 27.402-95 и вошёл во вторую редакцию проекта международного стандарта IEC 61124, подготавливаемую к выпуску.

Отметим, что ещё раньше планов Демидовича в СССР появились планы Н.Е.Ярлыкова, с теми же преимуществами (они вошли в ГОСТ 27.410-87, но не были замечены МЭК/ИСО по ряду причин).

Очевидно, что планы Демидовича заведомо лучше «классических» планов Вальда, и последние следует заменить во всех стандартах и учебниках. Первая из статей Н. О. Демидовича из журнала «Надёжность и контроль качества» за 1990 г. перепечатана в журнале «Надёжность» (№ 3 – 2013). Ниже приводится текст другой его статьи (он был написан как приложение к ГОСТу), где метод изложен несколько более чётко. Некоторые пояснения внесены Э.В.Дзиркалом.

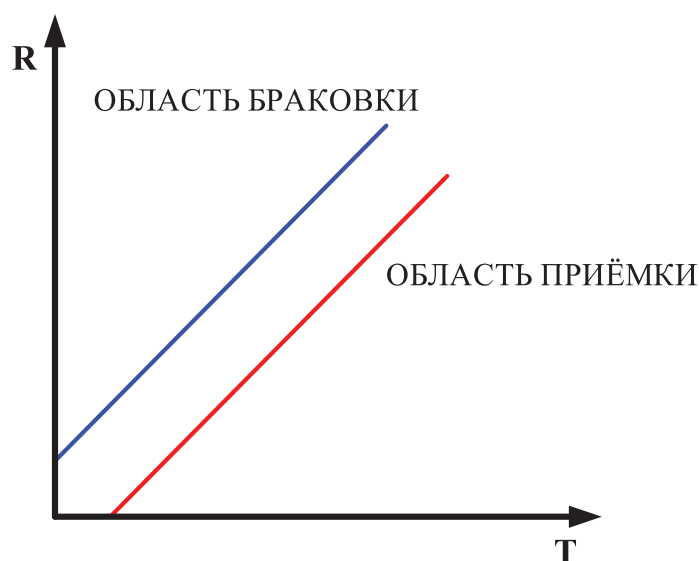


Рис. 1

2. Подход Н. О. Демидовича

Работа, проделанная Н. О. Демидовичем, проводилась в два этапа. Вначале он разработал способ, позволяющий с помощью ЭВМ вычислять все параметры (время испытаний, оба риска и др.) для плана любой формы. На втором этапе, пользуясь этим способом, он определяет (прямым подбором) оптимальные параметры плана выбранной формы, причём критерием оптимальности является продолжительность испытаний. Таким образом, он определил столько оптимальных планов для разных сочетаний исходных данных, сколько было нужно для включения в стандарт – вначале отечественный, а затем международный.

2.1. Исходные данные

План испытаний с границами произвольной формы изображен на рис. 2. Он ограничен максимальной суммарной наработкой $T_{\max}$ и предельным (браковочным) числом отказов R .

Примечания

а) На рисунке предельное число отказов $R=5$, но в общем случае это может быть любое целое положительное число.

б) Границы плана испытаний изображают непрерывной линией, но значения границ имеют смысл только при целых значениях дискретной оси ординат.

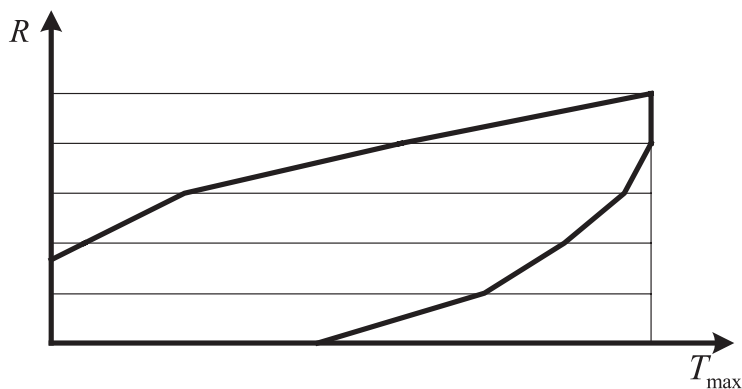
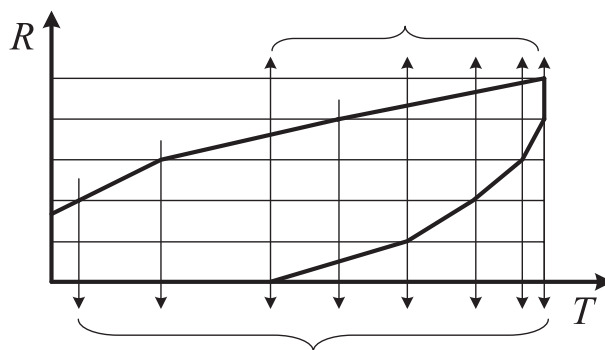


Рис. 2

2.2. Общий алгоритм вычисления характеристик планов испытаний

Шаг 1. Через точки пересечения границ с горизонтальными уровнями равными 0, 1, 2, проводят вертикальные сечения, как показано на рис. 3.

Примечание – Горизонтальный уровень $R = 0$ представляет собой ось абсцисс.



- 1 – сечения, проходящие через границу приемки;
- 2 – сечения, проходящие через границу приемки и браковки.

Рис. 3

Шаг 2. Выделяют точки пересечения горизонтальных уровней и вертикальных сечений внутри границ плана испытаний и, отдельно, точки границы приемки, как показано на рис. 4. Точки внутри границ плана испытаний на рис. 4 обозначены светлыми кружками, а точки границы приемки – полужирными кружками.

Все возможные линии реализации процесса отказов между двумя точками в соседних сечениях изображают одной стрелкой, что также показано на рис. 4.

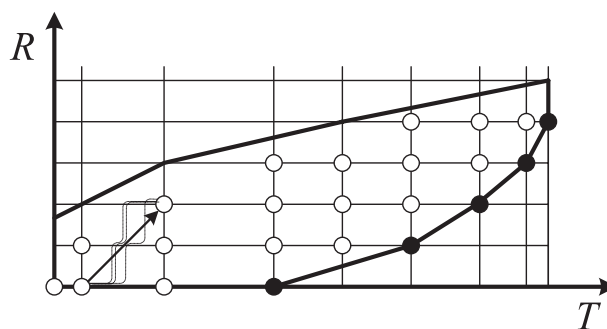


Рис. 4

Каждая линия реализации процесса отказов от начала координат и до пересечения границы браковки или до достижения границы приемки может быть представлена в виде последовательности точек и соединяющих их стрелок.

Для того, чтобы вычислить характеристики плана испытаний, достаточно рассматривать только выделенные точки.

Все возможные линии реализации процесса отказов до достижения границы приемки представляют собой совокупность стрелок, соединяющих точки в соседних сечениях, как показано на рис. 5.

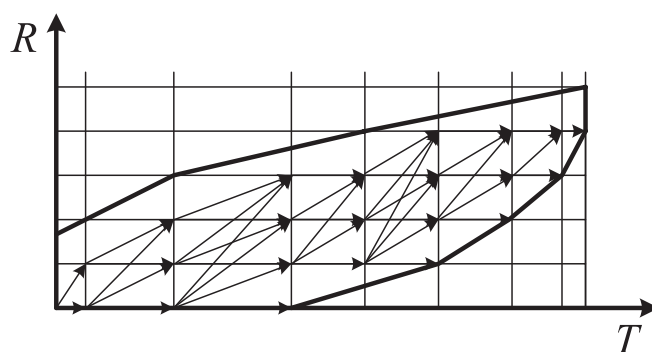


Рис. 5

Шаг 3. Последовательно (по вертикальным сечениям, начиная с первого, и снизу вверх по точкам каждого сечения) вычисляют значение вероятности того, что линия реализации процесса отказов пройдет через данную внутреннюю точку и значение вероятности того, что линия достигнет данной точки границы приемки. Затем вычисляют значения оперативной характеристики, рисков поставщика и заказчика, ожидаемой суммарной наработки до принятия решения о приемке.

Значение вероятности того, что линия реализации процесса отказов пройдет через внутреннюю точку, для каждой внутренней точки плана испытаний вычисляют по формуле

$$q_l^{(k)} = e^{-\lambda \Delta_k} \sum_{i=a_{k-1}}^{\min(l, b_{k-1})} q_i^{(k-1)} \frac{(\lambda \Delta_k)^{l-i}}{(l-i)!}, \quad (1)$$

где $q_l^{(k)}$ – вероятность того, что линия реализации процесса отказов пройдет через внутреннюю точку на l -м уровне в k -м сечении;

k – номер вертикального сечения, $k=1, 2, \dots, s$;

$\lambda = 1/T$ – интенсивность отказов испытуемых изделий;

T – истинное (неизвестное) значение средней наработки на отказ или до отказа;

i – индекс суммирования в k -м сечении;

l – фиксированный номер горизонтального уровня, $l = 0, 1, \dots, R-1$;

m – индекс суммирования в $(k+1)$ -м сечении;

Δ_k – интервал суммарной наработки между соседними k -м и $(k-1)$ -м сечениями;

a_k – номер нижней внутренней точки в k -м сечении; b_k – номер верхней внутренней точки в k -м сечении.

Значение вероятности того, что линия реализации процесса отказов достигнет точки границы приемки, для каждой точки границы приемки вычисляют по формуле:

$$p_j \equiv q_{l=a_{k-1}}^{(k)} = q_{a_{k-1}}^{(k-1)} e^{-\lambda \Delta_k}. \quad (2)$$

Примечание – Уравнение (2) является частным случаем уравнения (1).

Значение оперативной характеристики вычисляют по формуле:

$$L = \sum_{j=0}^{R-1} p_j. \quad (3)$$

Истинные значения рисков поставщика и заказчика вычисляют по формулам:

$$\alpha_1 = 1 - L(T_\alpha) = 1 - \sum_{j=0}^{R-1} p_j(T_\alpha) \quad (4)$$

$$\beta_1 = L(T_\beta) = \sum_{j=0}^{R-1} p_j(T_\beta). \quad (5)$$

Напомним, что риск поставщика (изготовителя) α – это вероятность принятия решения о браковке изделий при условии, что истинное значение средней наработки на отказ или до отказа равно приемочному уровню T_α . В свою очередь, риск заказчика (потребителя) β – это вероятность принятия решения о приемке изделий при условии, что истинное значение средней наработки на отказ или до отказа равно браковочному уровню T_β .

Значение ожидаемой суммарной наработки испытываемых изделий до принятия решения о приемке вычисляют по формуле:

$$T_O^{(+)} = \frac{\sum_{j=0}^{R-1} \tau_j p_j}{\sum_{j=1}^{R-1} p_j}, \quad (6)$$

где τ_j – суммарная наработка до j -го сечения границы приёмки, $\tau_j = \tau_1, \dots, \tau_{R-1}$.

Шаг 4. Последовательно (исходя из начала координат и снизу вверх по точкам каждого сечения) вычисляют вероятности того, что линия реализации процесса отказов из данной внутренней точки пересечет границу браковки в интервале между соседними сечениями.

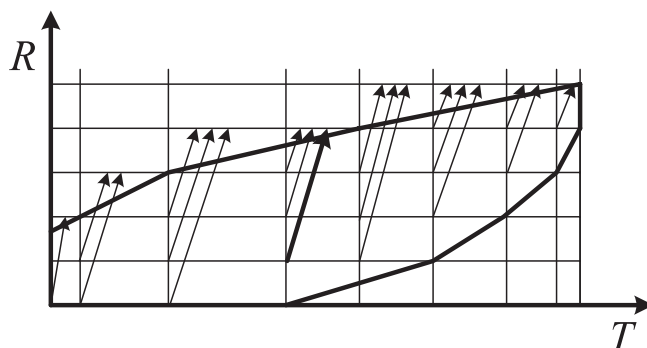


Рис. 6

Вероятность того, что линия реализации процесса отказов из данной внутренней точки пересечет границу браковки в интервале между соседними сечениями, для каждой внутренней точки плана вычисляют по формуле:

$$Q_i^{(k)} = 1 - e^{-\lambda \Delta_{k+1}} \sum_{m=0}^{b_{k+1}-i} \frac{(\lambda \Delta_{k+1})^m}{m!}. \quad (7)$$

Соответствующее значение ожидаемой суммарной наработки в данном интервале вычисляют по формуле:

$$\tilde{\Delta}_{k+1} = \frac{b_{k+1} - i + 1}{\lambda Q_i^{(k)}} \left(1 - e^{-\lambda \Delta_{k+1}} \sum_{m=0}^{b_{k+1}-i+1} \frac{(\lambda \Delta_{k+1})^m}{m!} \right). \quad (8)$$

Значение ожидаемой суммарной наработки вычисляют по формуле:

$$T_o = \sum_{j=0}^{R-1} p_j \tau_j + \sum_{k=1}^{s-1} \sum_{i=\alpha_k}^{b_k} q_i^{(k)} Q_i^{(k)} (t_k + \tilde{\Delta}_{k+1}). \quad (9)$$

Примечания

Величины q_i ; p_j ; L ; $T_o^{(+)}$; $Q_i^{(k)}$; $\tilde{\Delta}_{k+1}$; T_o являются функциями, зависящими от контролируемого показателя T .

Начальные значения величин, входящих в формулы: $t_o = 0$; $q_o^{(0)} = 1$; $q_i^{(0)} = 0$.

2.3. Вычисление оптимальных планов

Оптимальные планы испытаний определяют в такой последовательности:

Шаг 1. Задают (выбирают, устанавливают) значения исходных данных D , α , β (D – это отношение приемочного и браковочного уровней, $D = T_\alpha/T_\beta$).

Шаг 2. Выбирают вид плана испытаний (например, последовательный план, границы которого изображены на рис. 7. Н.О. Демидович считал такую форму плана наиболее целесообразной).

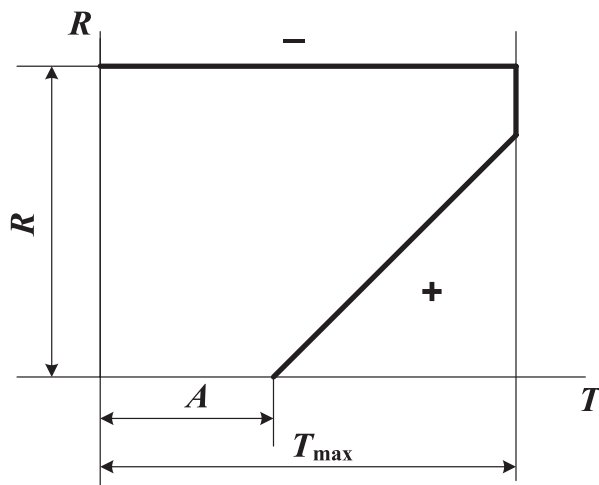


Рис. 7

Шаг 3. Выбирают начальные (стартовые) значения управляющих параметров плана A , R , $T_{\max}$ (см. рис. 7).

Шаг 4. Вычисляют характеристики плана испытаний выбранного вида с начальными значениями управляющих параметров. В результате вычислений на этом шаге получают первый, неточный и неоптимальный, план испытаний.

Шаг 5. Изменяют значения управляющих параметров, повторяют вычисления по формулам шага 4 и получают второй план испытаний. Затем снова изменяют значения управляющих параметров, повторяют вычисления и получают третий план испытаний и т. д. Эту процедуру повторяют итеративным образом, добиваясь постепенного приближения истинных значений рисков к заданным значениям. Когда истинные значения рисков совпадут с заданными с нужной точностью, процедуру завершают.

В результате вычислений на этом шаге получают первый точный (но еще не оптимальный) план испытаний.

Шаг 6. Изменяют значение управляющего параметра $T_{\max}$ в пределах установленных ограничений, повторяют вычисления по шагам 4, 5 и получают второй точный план испытаний. Снова изменяют значения управляющего параметра, повторяют вычисления и получают третий точный план испытаний и т. д. Эту процедуру повторяют итеративным образом, добиваясь постепенного уменьшения ожидаемой суммарной наработки $T_{\max}$ или ожидаемой суммарной наработки до принятия решения о приемке $T_0^{(+)}$. Когда эти значения достигнут минимума с нужной точностью, процедуру завершают.

В результате вычислений на этом шаге получают первый точный оптимальный план испытаний.

Шаг 7. Если значение управляющего параметра $T_{\max}$ первого точного оптимального плана испытаний не превосходит установленного ограничения, значение управляющего параметра R увеличивают на единицу, повторяют вычисления по шагам 4, 5, 6 и получают второй точный оптимальный план испытаний. Если значение управляющего параметра $T_{\max}$ второго точного оптимального плана испытаний также не превосходит установленного ограничения, снова значение управляющего параметра R увеличивают на единицу, повторяют вычисления, получают третий план испытаний и т. д.

Примечание – Каждый последующий план испытаний является более оптимальным по сравнению с предыдущим.

Если значение управляющего параметра $T_{\max}$ первого точного оптимального плана испытаний превосходит установленное ограничение, то вопрос о выборе плана испытаний поставщик и заказчик решают совместно путем возможных изменений набора исходных данных и ограничения максимальной суммарной наработки.

Формулы (1), (2), (7) и (8) являются рекуррентными (одинаковыми для всех точек плана испытаний) и образуют рекуррентный элемент, приведенный на рис. 8.

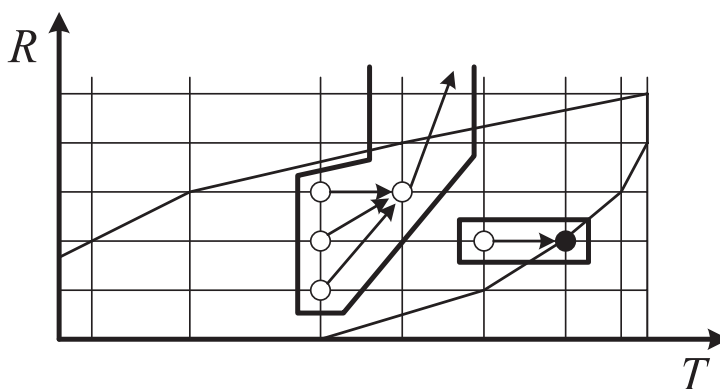


Рис. 8

Вычисление значений рисков и характеристик планов испытаний проводят с использованием компьютерной программы. Ручные вычисления являются громоздкими и не позволяют получать точные оптимальные планы испытаний.

**Dzirkal E. V.**

N.O. DEMIDOVICH'S SEQUENTIAL CONTROL METHOD

Our late colleague Nikolai Olegovich Demidovich developed and gave us a great method of sequential control of dependability (and other similar properties of products) that is significantly superior to the "classic" Wald's method (featured in all textbooks). Not many people can now recognize Demidovich's method in GOST R 27.402-95 and IEC 61124. His first articles date back to the 1960s. The method that uses computers and formulas allows choosing the sequential control boundaries that ensure the accuracy of specified risks values. N.O. Demidovich's boundaries can create indecision regions of any shape (including closed ones) and do not require truncation. The purpose of this article is to reestablish N.O. Demidovich's (and Russia's) priority in sequential control and replace Wald's method (paying the latter the well-deserved tribute of course).

Keywords: Demidovich's method, sequential control, vendor and buyer risks.

1. Introduction. General methodology of sequential control

The sequential dependability control (as well as of other similar parameters) consists in the following: at each particular moment a certain value is compared to two boundaries, acceptance and rejection. Between those boundaries is the indecision region (if the result falls within it, the tests continue). During dependability tests, the summarized operating times and failures are plotted on the test plan graph in a stepped line (failure process implementation line). Such graph for Wald's classic sequential method is shown in fig. 1. The tests are carried out until the failure process implementation line first reaches the acceptance boundary (lower line in fig. 1) or the rejection boundary (upper line).

Wald's method that is described in all textbooks, does not involve any limitations of testing time. As soon as the Wald indecision region is truncated, the supplier and the customer risks immediately and significantly increase (by an unknown magnitude). No one knows at what level the region should be truncated. Usually, it is done arbitrarily, which represents the primary disadvantage of Wald's method.

N.O. Demidovich has developed a method that allows defining the boundaries that enable the sequential control to precisely identify the risks. N.O. Demidovich's boundaries can create indecision regions of any shape, including closed, that does not require truncation (he adopted a triangular shape). The method is recognized by ISO/IEC experts, authorized in Russia by the GOST R 27.402-95 standard and is included in the second edition of the draft international standard IEC 61124 that is being prepared to issue.

It should be noted that even before Demidovich's plans there were other plans developed in the USSR by N.E. Yarlykov that provided the same advantages (they were featured in GOST 27.410-87 but left unnoticed by IEC/ISO for a number of reasons).

Demidovich's plans are obviously superior to "classic" Wald's plans and the latter should be replaced in all standards and textbooks. N.O. Demidovich's first article from the *Nadizhnost i kontrol kachestva* (Dependability and Quality Control) journal as of 1990 was reprinted in the Dependability journal (No. 3, 2013). Below is the text of another of his articles (written as an annex to a GOST) where the method is described in greater detail. There are some explanations added by E.V. Dzirkal.

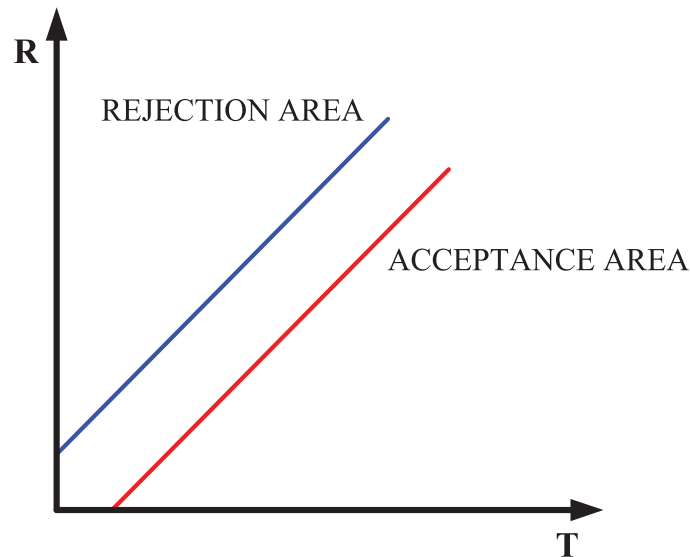


Fig. 1

2. N.O. Demidovich's approach

The work by N.O. Demidovich was performed in two stages. First, he developed the method that uses the computer to calculate all parameters (testing time, both risks, etc.) for plans of any shape. At the second stage, he used that method to identify (by selection) the optimal parameters for the plan of the chosen shape, the criterion being the duration of testing. He identified as many optimal plans for different combinations of input data as was required for inclusion in the Russian, then international standards.

2.1. Input data

A test plan with randomly defined boundaries is shown in fig. 2. It is limited by the maximum total operating time $T_{\max}$ and limit (rejection) number of failures R .

Notes

- a) In the figure, the limit number of failures $R=5$, but in general cases it may be any whole positive number.
- b) The boundaries of the test plan are shown with a continuous line, but the boundary values only have a meaning under integer values of the discrete Y-axis.

2.2. General algorithm of test plan characteristics calculation

Step 1. Through the points of intersection of boundaries and horizontal levels; $= 0, 1, 2$, vertical sections are drawn as shown in fig. 3.

Note: horizontal level $R = 0$ is the X-axis.

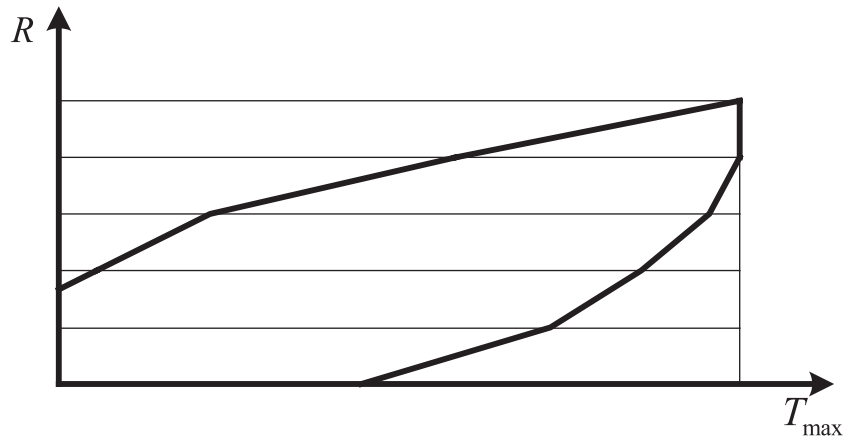
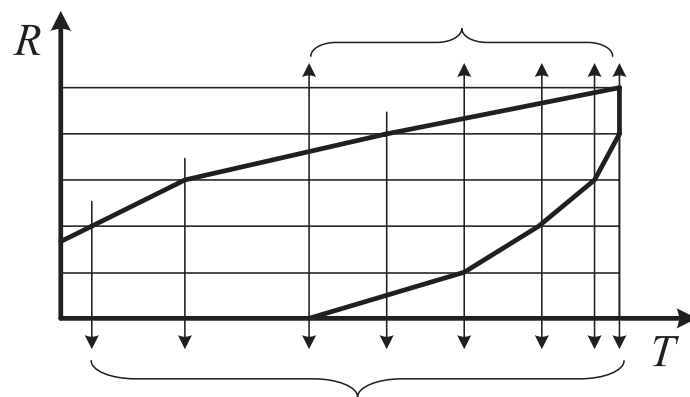


Fig. 2



- 1 - sections crossing the acceptance boundary
2 - sections crossing the acceptance and rejection boundaries

Fig. 3

Step 2. Points of intersection of horizontal levels and vertical sections within the test plan boundaries are marked along with the acceptance boundary points, as shown in fig. 4. Points within the test plan boundaries in fig. 4 are marked with light-colored circles, while the acceptance boundary points are marked with semi-bold circles.

All possible failure process implementation lines between two points in adjacent sections are shown with one arrow as also shown in fig. 4.

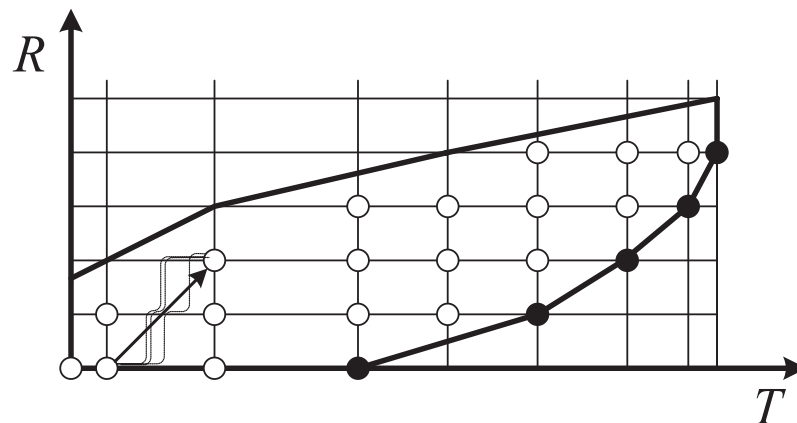


Fig. 4

Each failure process implementation line from the origin of coordinates to the intersection with the rejection boundary or attainment of the acceptance boundary can be represented as a series of points and connecting arrows.

In order to calculate the test plan characteristics it suffices to consider the marked points only.

All possible failure process implementation lines before the acceptance boundary represent a total of arrows connecting the points in adjacent sections as shown in fig. 5.

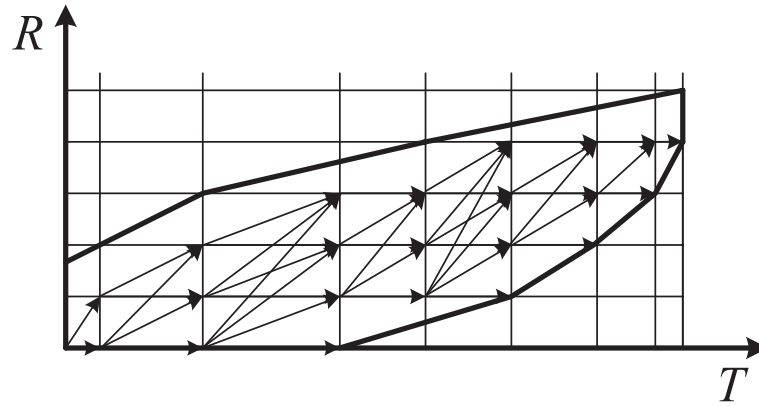


Fig. 5

Step 3. Successively (along vertical sections beginning with the first one and from bottom to top along the points of each sections) the probability value is calculated of the failure process implementation line passing through this inner point and probability value of the line reaching this point of the acceptance boundary. Then, the operating characteristic, vendor risk, buyer risk and expected total operating time before acceptance decision are calculated.

The probability value of the failure process implementation line passing through the inner point for each inner point of the test plan is calculated according to the formula

$$q_l^{(k)} = e^{-\lambda \Delta_k} \sum_{i=a_{k-1}}^{\min(l, b_{k-1})} q_i^{(k-1)} \frac{(\lambda \Delta_k)^{l-i}}{(l-i)!}, \quad (1)$$

where $q_l^{(k)}$ is the probability of failure process implementation line crossing the inner point at the l^{th} level in the k^{th} section;

k is the number of vertical section, $k=1, 2, \dots, s$;

$\lambda = 1/T$ is the failure rate of tested products;

T is the true (unknown) value of mean time to failure;

i is the summation index in the k^{th} section;

l is the fixed number of horizontal level, $l=0, 1, \dots, R-1$;

m is the summation index in the $(k+1)^{\text{th}}$ section;

Δ_k is the interval of total operating time between adjacent k^{th} and $(k-1)^{\text{th}}$ sections;

a_k is the number of the lower inner point in the k^{th} section; b_k is the number of the higher inner point in the k^{th} section.

The probability value of the failure process implementation line reaching the point of acceptance boundary for each point of the acceptance boundary is calculated according to the formula

$$p_j \equiv q_{l=a_{k-1}}^{(k)} = q_{a_{k-1}}^{(k-1)} e^{-\lambda \Delta_k}. \quad (2)$$

Note: equation (2) is a special case of equation (1).

The operating characteristic value is calculated according to the formula:

$$L = \sum_{j=0}^{R-1} p_j. \quad (3)$$

True values of vendor and buyer risks are calculated according to the formulas:

$$\alpha_1 = 1 - L(T_\alpha) = 1 - \sum_{j=0}^{R-1} p_j(T_\alpha) \quad (4)$$

$$\beta_1 = L(T_\beta) = \sum_{j=0}^{R-1} p_j(T_\beta). \quad (5)$$

It is to be reminded that the vendor (manufacturer) risk α is the probability of product rejection decision under the condition that the true value of the mean time to failure equals the acceptance level T_α . Buyer (consumer) risk β is the probability of product acceptance decision under the condition that the true value of the mean time to failure equals the rejection level T_β .

The value of the expected total operating time of tested products before acceptance decision is calculated according to the formula:

$$T_O^{(+)} = \frac{\sum_{j=0}^{R-1} \tau_j p_j}{\sum_{j=1}^{R-1} p_j}, \quad (6)$$

where τ_j is the total operating time to the j^{th} section of the acceptance boundary, $\tau_j = \tau_1, \dots, \tau_{R-1}$.

Step 4. Successively (from the origin of coordinates and from bottom to top along the points of each sections) the probability value is calculated of the failure process implementation line from the specified inner point crossing the rejection boundary between adjacent sections.

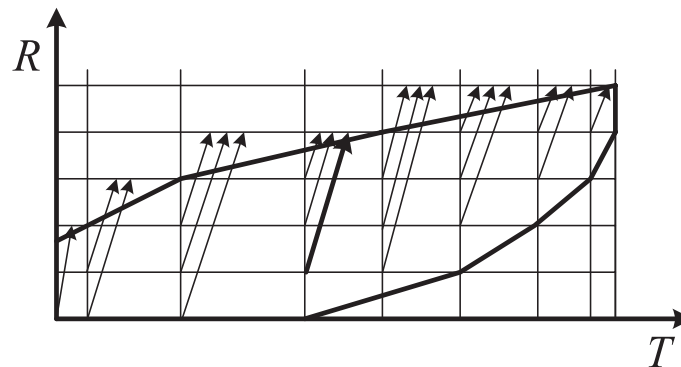


Fig. 6

The probability value of the failure process implementation line from the specified inner point crossing the rejection boundary between adjacent sections for each inner point of the plan is calculated according to the formula:

$$Q_i^{(k)} = 1 - e^{-\lambda \Delta_{k+1}} \sum_{m=0}^{b_{k+1}-i} \frac{(\lambda \Delta_{k+1})^m}{m!}. \quad (7)$$

The corresponding value of the expected total operating time within the interval is calculated according to the formula:

$$\tilde{\Delta}_{k+1} = \frac{b_{k+1} - i + 1}{\lambda Q_i^{(k)}} \left(1 - e^{-\lambda \Delta_{k+1}} \sum_{m=0}^{b_{k+1}-i+1} \frac{(\lambda \Delta_{k+1})^m}{m!} \right). \quad (8)$$

The value of the expected total operating time is calculated according to the formula:

$$T_o = \sum_{j=0}^{R-1} p_j \tau_j + \sum_{k=1}^{s-1} \sum_{i=\alpha_k}^{b_k} q_i^{(k)} Q_i^{(k)} (t_k + \tilde{\Delta}_{k+1}). \quad (9)$$

Notes

Values q_i ; p_j ; L ; $T_o^{(+)}$; $Q_i^{(k)}$; $\tilde{\Delta}_{k+1}$; T_o are functions depending on the controllable value T .

Initial values of the variables featured in the formulas: $t_o = 0$; $q_o^{(0)} = 1$; $q_i^{(0)} = 0$.

2.3. Optimal plans calculation

Optimal test plans are identified in the following order:

Step 1. Input data D , α , β (D is the relation between the acceptance and rejection boundaries, $D = T_\alpha / T_\beta$) are specified (chosen, set).

Step 2. Test plan type is chosen (e.g. consecutive plan with the boundaries shown in fig. 7. N.O. Demidovich deemed this plan shape to be optimal).

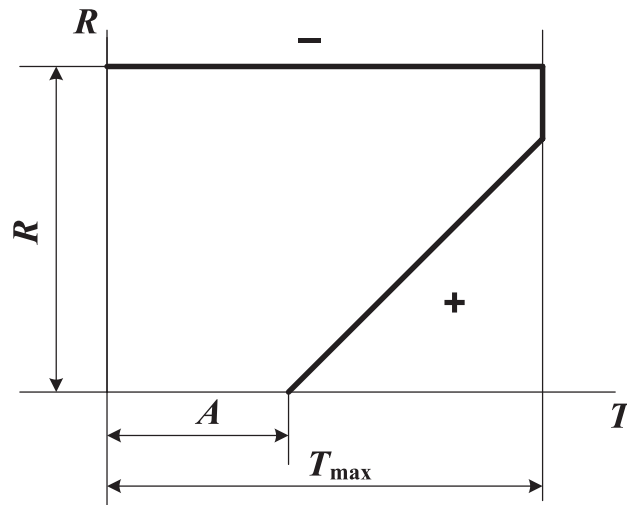


Fig. 7

Step 3. Initial values of the plan's control parameters A , R , $T_{\max}$ are chosen (see fig. 7).

Step 4. The characteristics of the chosen test plan type with initial values of control parameters are calculated. As the result of the calculations, at this step the first inaccurate and non-optimal test plan is generated.

Step 5. The values of the control parameters are modified, calculations according to step 4 formulas are repeated and the second test plan is obtained. Then, values of the control parameters are modified again, calculations are repeated and the third test plan is obtained, etc. This procedure is repeated iteratively to eventually obtain true values of risks approximating the preset values. When the true values of risks match the preset values with predefined precision the procedure is finished.

As the result of the calculations, at this step the first accurate (but not yet optimal) test plan is generated.

Step 6. The value of the control parameter $T_{\max}$ is modified within set limits, calculations as per steps 4 and 5 are repeated and the second accurate test plan is obtained. The value of the control parameter is modified again, calculations are repeated and the third accurate test plan is obtained, etc. This procedure is repeated iteratively thus reducing the expected total operating time $T_{\max}$ or expected total operating time before acceptance decision $T_0^{(+)}$. When those values reach the minimum with required precision the procedure is finished.

As the result of the calculations, at this step the first accurate optimal test plan is generated.

Step 7. If the value of the control parameter $T_{\max}$ of the first accurate optimal test plan does not exceed the specified limit, the value of the control parameter R is increased by one, calculations as per steps 4, 5, 6 are repeated and the second accurate optimal plan is obtained. If the value of the control parameter $T_{\max}$ of the second accurate optimal test plan does not exceed the set limit either, the value of the control parameter R is again increased by one, calculations are repeated, the third test plan is obtained, etc.

Note: each subsequent test plan is more optimal compared to the previous one.

If the value of the control parameter $T_{\max}$ of the first accurate optimal test plan exceeds the set limit, the vendor and buyer jointly decide upon the choice of the test plan by means of possible changes in the set of input data and limitation of the maximum total operating time.

Formulas (1), (2), (7) and (8) are recurrent (identical for all points of the test plan) and form the recurrent element given in fig. 8.

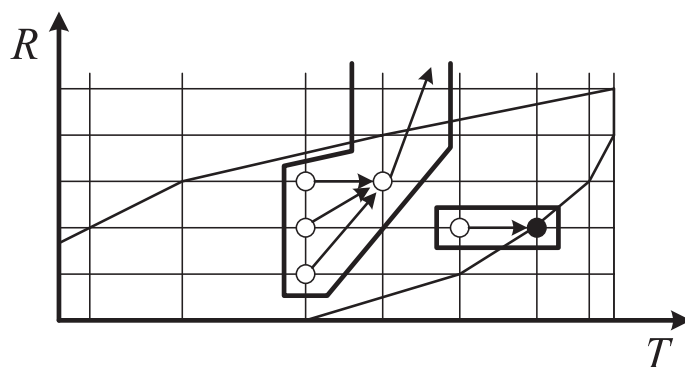


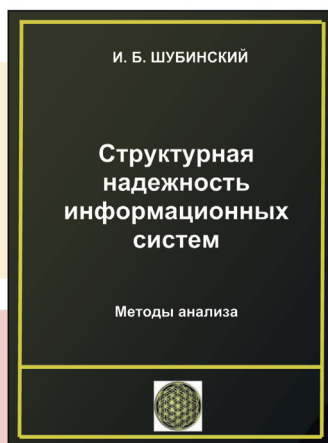
Fig. 8

Risk values and test plans characteristics are calculated using a computer program. Manual calculations are cumbersome and do not allow obtaining accurate optimal test plans.

НАДЁЖНОСТЬ

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

ПРЕДСТАВЛЯЕТ



Приобрести издание
можно через редакцию
ООО «Журнал «Надёжность»

8 (495) 967-77-05, доб.186
8-916-105-81-31
(Патрикеева Евгения)

E.Patrikeeva@gismps.ru,
www.dependability.pro

И. Б. ШУБИНСКИЙ

Структурная надежность информационных систем

Методы анализа



Шубинский Игорь Борисович

СТРУКТУРНАЯ НАДЕЖНОСТЬ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ
Методы анализа

Редактор: Патрикеева Евгения Владимировна
Компьютерная верстка: Куртиш Борис Сергеевич
Корректор: Комарова Екатерина Евгеньевна

Подписано в печать 12.07.2012. Формат издания 70х100/16.
Печать офсетная. Бумага офсетная. Усл. печ. л. 17,55.
Тираж 700 экз. Заказ № 1452.

ООО «Журнал «Надёжность»,
109029, г. Москва,
ул. Нижегородская, д.27, стр.1, офис 209
Тел./факс: +7 499 262 53 20
E-mail: E.Patrikeeva@gismps.ru

И.Б.Шубинский «Структурная надежность информационных систем» 2012г.

В книге приведены основные понятия и показатели структурной надежности информационных систем, показана общность и специфические отличия показателей надежности, применяемых в отечественных и международных стандартах. Отражены недавние изменения в подходах к моделированию надежности. Подробно описаны Марковские модели надежности и графовые полумарковские методы расчета надежности, которые проиллюстрированы многочисленными примерами. Значительное внимание уделено инженерным методам расчета и приближенного прогнозирования структурной надежности информационных систем, оценкам погрешностей расчетов, а также статистической оценке показателей надежности. В конце каждой главы содержатся контрольные вопросы по наиболее сложному и значимому материалу главы.

Книга рассчитана, в первую очередь, на специалистов, занимающихся практической работой по разработке, производству, эксплуатации и модификации информационных систем. Она предназначена научным работникам в области структурной надежности различных дискретных систем, преподавательскому составу, аспирантам и студентам, специализирующимся в области информационных систем, а также в области автоматизированных систем управления.

Приобрести издание можно через редакцию журнала «Надёжность»
по тел. 8 (495) 967-77-05, доб.186; 8-916-105-81-31 (Патрикеева Евгения),
e-mail: E.Patrikeeva@gismps.ru, www.dependability.pro

Igor B. Shubinsky STRUCTURAL DEPENDABILITY OF INFORMATION SYSTEMS 2012

The book presents the basic concepts and parameters of the structural dependability of information systems. It discusses general and specific differences in dependability indices used in domestic and international standards, along with recent developments in approaches to dependability modeling. Markov reliability models together with graph semi-Markov methods for calculating reliability are described in detail and illustrated by numerous examples. Considerable attention is paid to the engineering methods of calculation and the approximate prediction of structural dependability and error estimation of information systems as well as to the statistical assessment of dependability parameters. At the end of each chapter there are checklists of the most complex and significant subjects of the chapter.

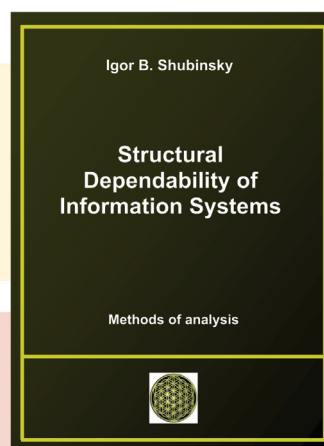
The book is intended primarily for professionals involved in practical work on the development, production, operation and modification of information systems. It is designed for scientists in the field of structural dependability of various discrete systems, academic staff and graduates (students) specializing in information systems as well as in the field of automated control systems.

Publication can be purchased through the editorial board of Journal Dependability Ltd.
by phone 8 (495) 967-77-05, ext.186; 8-916-105-81-31 (Patrikeeva Evgenia)
e-mail: E.Patrikeeva@gismps.ru, www.dependability.pro

НАДЁЖНОСТЬ

DEPENDABILITY SCIENTIFIC AND TECHNICAL JOURNAL

REPRESENTS



Publication can be purchased
through the editorial board
of Journal Dependability Ltd.

8 (495) 967-77-05, ext.186;
8-916-105-81-31
(Patrikeeva Evgenia)

E.Patrikeeva@gismps.ru,
www.dependability.pro

Igor B. Shubinsky

Structural Dependability of Information Systems

Methods of analysis



Igor B. Shubinsky

STRUCTURAL DEPENDABILITY OF INFORMATION SYSTEMS
Methods of analysis

Editor: Patrikeeva Evgenia
Make-up: Kurtish Boris S.
Proofreading: Komarova Catherine E.

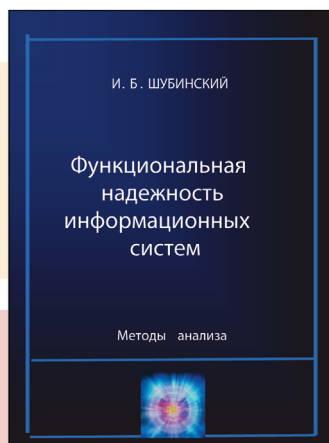
Copy deadline 12.07.2012. Format of the edition 70х100/16.
Offset printing. Offset paper. Conv. Sheet I. 24,05.
Circulation of 700 copies. Order number 1452.

Journal Dependability Ltd.
109029, Moscow,
Nizhegorodskaya str., 27, bldg. 1, office 209
Tel. / Fax: +7 499 262 53 20
E-mail: E.Patrikeeva@gismps.ru

НАДЁЖНОСТЬ

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

ПРЕДСТАВЛЯЕТ



Приобрести издание
можно через редакцию
ООО «Журнал «Надёжность»»

8 (495) 967-77-05, доб.186
8-916-105-81-31
(Патрикеева Евгения)

E.Patrikeeva@gismps.ru,
www.dependability.pro

ООО «Журнал «Надёжность»»,
109029, г. Москва,
ул. Нижегородская, д.27, стр.1, офис 209
Тел./факс: +7 499 262 53 20
E-mail: E.Patrikeeva@gismps.ru

Шубинский Игорь Борисович
ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ НАДЕЖНОСТЬ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ
Методы анализа

Редактор: Патрикеева Евгения Владимировна
Компьютерная верстка: Куртиш Борис Сергеевич
Корректор: Комарова Екатерина Евгеньевна

Подписано в печать 12.07.2012. Формат издания 70х100/16.
Печать офсетная. Бумага офсетная. Усл. печ. л. 24,05.
Тираж 700 экз. Заказ № 1453.

И.Б.Шубинский «Функциональная надёжность информационных систем» 2012г.

В книге впервые представлена теория функциональной надёжности информационных систем как составная часть общей теории надёжности. Она включает понятия и определения; основные угрозы нарушения функциональной надёжности информационных систем; систему показателей; методы оценки функциональной надёжности цифровых устройств; методы и модели оценки функциональной надёжности программного обеспечения. В отдельной главе рассмотрена функциональная надёжность критически важных информационных систем, в том числе понятие критически важной системы, особенности оценки сбойных ошибок, оценки функциональной надёжности операторов, оценки опасных отказов и рисков, требования к функциональной надёжности и к архитектуре программного обеспечения критически важных информационных систем.

В конце каждой главы содержатся контрольные вопросы по наиболее сложному и значимому материалу главы.

Книга рассчитана, в первую очередь, на специалистов, занимающихся практической работой по разработке, производству, эксплуатации и модификации информационных технологий и информационных систем. Она предназначена научным работникам в области надёжности программно – аппаратных средств информационных систем, преподавательскому составу, аспирантам и студентам, специализирующимся в области информационных технологий, а также в области автоматизированных систем управления.

Приобрести издание можно через редакцию журнала «Надёжность»
по тел. 8 (495) 967-77-05, доб.186; 8-916-105-81-31 (Патрикеева Евгения),
e-mail: E.Patrikeeva@gismps.ru, www.dependability.pro

Igor B. Shubinsky FUNCTIONAL DEPENDABILITY OF INFORMATION SYSTEMS 2012

For the first time, this book presents the theory of functional dependability of information systems as a component of the general dependability theory. The book comprises basic concepts and definitions, major threats for the functional dependability of information systems, system parameters, methods for estimating the functional dependability of digital devices, and methods and models of estimating software functional dependability. A separated chapter considers the functional reliability of critical information systems, including the concept of a critical system, features of faults, estimation of functional reliability of operators, estimation of hazardous failures and risks, the requirements of functional dependability and the software architecture of critical information systems. A checklist of the most complex and significant subjects is provided at the end of each chapter.

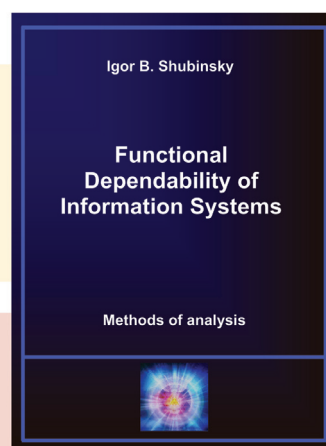
The book is primarily intended for experts who are engaged in practical development, manufacture, operation and updating of information technologies and information systems. It is intended for researchers in the field of software-hardware of information systems, academic staff, post-graduate students and students specializing in the field of information technologies as well as those working in the field of automated control systems.

Publication can be purchased through the editorial board of Journal Dependability Ltd.
by phone 8 (495) 967-77-05, ext.186; 8-916-105-81-31 (Patrikeeva Evgenia)
e-mail: E.Patrikeeva@gismps.ru, www.dependability.pro

НАДЁЖНОСТЬ

DEPENDABILITY SCIENTIFIC AND TECHNICAL JOURNAL

REPRESENTS



Publication can be purchased
through the editorial board
of Journal Dependability Ltd.

8 (495) 967-77-05, ext.186;
8-916-105-81-31
(Patrikeeva Evgenia)

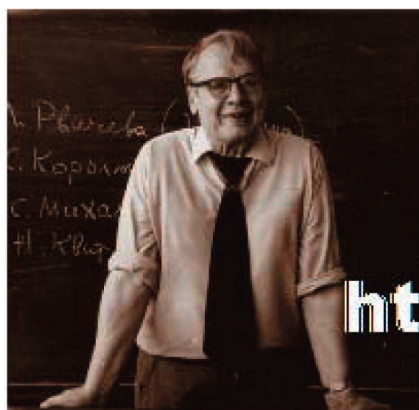
E.Patrikeeva@gismps.ru,
www.dependability.pro

Igor B. Shubinsky
STRUCTURAL DEPENDABILITY OF INFORMATION SYSTEMS
Methods of analysis

Editor: Patrikeeva Evgenia
Make-up: Kurtish Boris S.
Proofreading: Komarova Catherine E.

Copy deadline 12.07.2012. Format of the edition 70х100/16.
Offset printing. Offset paper. Conv. Sheet I. 24,05.
Circulation of 700 copies. Order number 1452.

Journal Dependability Ltd.
109029, Moscow,
Nizhegorodskaya str., 27, bldg. 1, office 209
Tel. / Fax: +7 499 262 53 20
E-mail: E.Patrikeeva@gismps.ru



Дорогие коллеги!

В 2005 году была основана неформальная Ассоциация специалистов по надежности, прикладной вероятности и статистике (I.G.O.R.), которая имеет свой сайт в Интернете GNEDENKO FORUM. Сайт назван в честь выдающегося математика Бориса Владимировича Гнеденко (1912-1995). Целью Форума является улучшение профессиональных и персональных контактов специалистов по математической статистике, теории вероятностей и их важных ветвей, как Теория надежности и контроля качества, Теория массового обслуживания, Теории управления запасами и т.п.

Начиная с января 2006 года Форум издает ежеквартальный Международный электронный журнал

«Надежность: Теория и приложения» (“Reliability: Theory & Applications”).

Журнал зарегистрирован в Библиотеке Конгресса США (ISSN 1932-2321). Все права сохраняются за авторами, так что статьи затем могут быть свободно опубликованы в любых других изданиях или представлены на конференции.



**Вступайте в Форум
Гнеденко!**

Добро

пожаловать!

В наших рядах уже более

500 специалистов

из **44** стран мира.

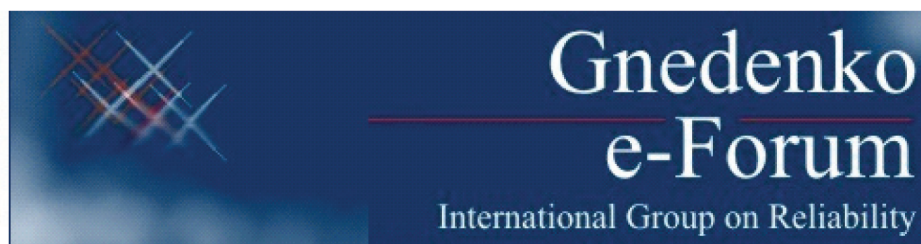
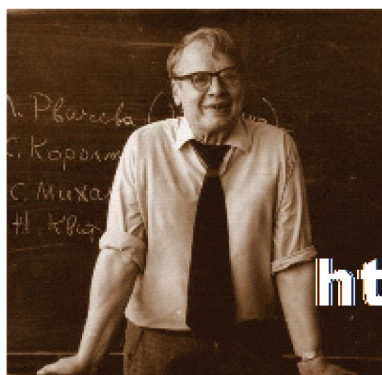
Для вступления в
Форум присылайте
фото и краткое резюме
по адресу:

Проф. Игорь Ушаков,
igusha22@gmail.com

или

к.т.н. Александр Бочков,
a.bochkov@gmail.com

Membership is free.



<http://Gnedenko-Forum.org/>

Dear colleagues!

In 2005 the informal Association of Experts in Reliability, Applied Probability and Statistics (I.G.O.R.) was established with its own Internet website GNEDENKO FORUM. The site has been named after the outstanding mathematician Boris Vladimirovich Gnedenko (1912-1995). The Forum's purpose is an improvement of personal and professional contacts between experts in the mathematical statistics, probability theory and their important branches, such as reliability theory and quality control, the theory of mass service, storekeeping theory, etc.

Since January 2006, the Forum has published a quarterly international electronic magazine

"Reliability: Theory and Applications".

The magazine is registered with the Library of Congress in the USA (ISSN 1932-2321). All rights reserved for authors so that articles can be freely published in any other publications or presented at conferences.



Join Gnedenko Forum!

Welcome!

**More than 500 experts
from 44 countries
worldwide have already
joined us!**

To join the Forum, send a
photo and a short CV to the
following address:

Prof. Igor Ushakov,
igusha22@gmail.com

or

Alexander Bochkov, PhD
a.bochkov@gmail.com

Membership is free.

АВТОРЫ НОМЕРА / AUTHORS OF THIS ISSUE**Абдулхамед Мохамед**

аспирант, Тверской государственный технический университет
e-mail: mohamed86@mail.ru

Абрамова Нина Александровна

доктор технических наук, заведующий лабораторией №51, Институт проблем управления им. В.А.Трапезникова РАН (ИПУ РАН)
тел.: +7 (495) 334-78-00
e-mail: Lab51.ipu@gmail.com

Дзиркал Эрнест Вальтерович

кандидат технических наук, старший научный сотрудник, заместитель директора Ассоциации по безопасности машин и оборудования «ТЕСТ-СДМ»
e-mail: dzirkal@mail.ru

Душко Олег Викторович

кандидат технических наук, доцент, директор, Волгоградский государственный архитектурно – строительный университет
тел.: +7 (8442) 97-49-52
e-mail: ido.dov@mail.ru

Ермаков Александр Олегович

руководитель Центра управления рисками ОАО «НИИАС»
тел.: +7 (495) 967-77-02
e-mail: alex267@rambler.ru

Крянев Александр Витальевич

доктор физико-математических наук, профессор кафедры «Прикладная математика» Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
тел.: +7 (927) 133-09-81
e-mail: avkryanev@mephi.ru

Макаренко Дмитрий Игоревич

старший научный сотрудник лаборатории №51, Институт проблем управления им. В.А.Трапезникова РАН (ИПУ РАН)
тел.: +7 (495) 334-78-00
e-mail: Lab51.ipu@gmail.com

Маклаков Владимир Васильевич

доктор технических наук, заведующий лабораторией, Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН
e-mail: lab-54@bk.ru

Мышлинская Ирина Хаджимурадовна

секретарь директора, Волгоградский государственный архитектурно – строительный университет

тел.: +7 (8442) 97-49-52

e-mail: ido.reception@mail.ru

Полтавский Александр Васильевич

доктор технических наук, старший научный сотрудник, Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН
e-mail: lab-54@bk.ru

Русин Александр Юрьевич

кандидат технических наук, доцент, Тверской государственный технический университет
тел.: +7 (903) 694-80-49
e-mail: alrus@tvcom.ru

Семенов Сергей Сергеевич

кандидат технических наук, руководитель группы анализа и перспективного проектирования, ОАО «Государственное научно-производственное предприятие «Регион»
e-mail: gnppregion@sovintel.ru

Титов Юрий Павлович

аспирант кафедры №302, Московский авиационный институт
тел.: +7 (916) 570-39-92
e-mail: Kalengul@mail.ru

Хахулин Геннадий Федорович

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой №302, Московский авиационный институт
тел.: +7 (916) 027-30-78
e-mail: Kaf302@mai.ru

Шебе Хендрик

доктор физико-математических наук, заведующий отделом анализа рисков и опасностей, TÜV Rheinland InterTraffic, Cologne, Germany
Tel. +49 221 806 2466, fax +49 221 806 3940
e-mail: schaebe@de.tuv.com

Шубинский Игорь Борисович

доктор технических наук, профессор, директор ЗАО «ИБ Транс»
Tel. +7 (495) 786-68-57
e-mail: igor-shubinsky@yandex.ru

Якубович Борис Иосифович

кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, Петербургский институт ядерной физики, Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт»
тел.: +7 (81371) 4-64-92
e-mail: yakubovich@pnpi.spb.ru

АВТОРЫ НОМЕРА / AUTHORS OF THIS ISSUE

Abdulhameed Mohamed

Postgraduate student, Tver State Technical University. E-mail: mohamed86@mail.ru

Abramova Nina Alexandrovna

Doctor of Technical Sciences, Head of Laboratory #51, V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences, Russian Academy of Sciences
Tel.: +7 (495) 334-78-00
E-mail: Lab51.ipu@gmail.com

Dzirkal Ernest Valterovich

PhD engineering, senior researcher, Deputy Director of Association of Machine and Equipment Safety TEST-CDM
E-mail: dzirkal@mail.ru

Dushko Oleg Victorovich

PhD engineering, associate professor, Director of Volgograd State Architecture and Construction University
Tel.: +7 (8442) 97-49-52
E-mail: ido.dov@mail.ru

Ermakov Alexander Olegovich

Head of Risk Management Center JSC NIIS
Tel.: +7 (495) 967-77-02
E-mail: alex267@rambler.ru

Khakhulin Gennady Fedorovich

Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of Chair No. 302, MAI
Tel.: +7 (916) 027-30-78
E-mail: Kaf302@mai.ru

Krianev Alexander Vitalievich

Professor of the Applied Mathematics department, Doctor of Physics and Mathematics National Research Nuclear University MIFI
Tel.: +7 (927) 133-09-81
E-mail: avkryanev@mephi.ru

Makarenko Dmitry Igorevich

Senior researcher of Laboratory #51, V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences, Russian Academy of Sciences
Tel.: +7 (495) 334-78-00
E-mail: Lab51.ipu@gmail.com

Maklakov Vladimir Vasilievich

Head of laboratory, Doctor of Engineering V.A. Trapeznikov Institute of Control Problems of the Russian Academy of Sciences
E-mail: lab-54@bk.ru

Mishlinskaya Irina Hagimuradovna

Director Secretary, Volgograd State Architecture and Construction University Tel.: +7 (8442) 97-49-52
E-mail: ido.reception@mail.ru

Poltavsky Alexander Vasilievich

Senior researcher, Doctor of Engineering, V.A. Trapeznikov Institute of Control Problems of the Russian Academy of Sciences
E-mail: lab-54@bk.ru

Rusin Alexander Yurievich

PhD engineering, associate professor of Tver State Technical University
Tel: 8-903-694-80-49
E-mail: alrus@tvcom.ru

Semenov Sergey Sergeevich

Head of the Group for Analysis and Advanced Engineering, PhD Engineering, JSC Region State-Owned Research and Manufacturing Enterprise
E-mail: gnppregion@sovintel.ru

Shäbe Hendrik

Doctor of Physics and Mathematics, Head of Risk and Hazard Analysis Division TÜV Rheinland InterTraffic, Cologne, Germany
Tel. +49 221 806 2466,
fax +49 221 806 3940
E-mail: schaebe@de.tuv.com

Shubinsky Igor Borisovich

Professor, Doctor of Technical Sciences, Director of Closed Company IB Trans
Tel. +7 (495) 786-68-57
E-mail: igor-shubinsky@yandex.ru

Titov Yuri Pavlovich

Postgraduate student, Chair No. 302, MAI
Tel.: +7 (916) 570-39-92
E-mail: Kalengul@mail.ru

Yakubovich Boris Iosifovich

Candidate of mathematics and physics, senior researcher of Saint Petersburg Institute of Nuclear Physics, National research Center "Kurchatov Institute"
Tel.: +7 (81371) 4-64-92
E-mail: yakubovich@pnpi.spb.ru

ТРЕБОВАНИЯ РЕДАКЦИИ ПО ОФОРМЛЕНИЮ СТАТЕЙ В ЖУРНАЛАХ ИЗДАТЕЛЬСКОЙ ГРУППЫ IDT PUBLISHERS

Письмо от организации, где работает автор(ы), либо лично от автора(ов) с предложением о публикации статьи направляется в редакцию журнала по фактическому адресу: 107078, г.Москва, Орликов переулок, д.5, офис 755 ООО «ЖУРНАЛ «НАДЕЖНОСТЬ» или по адресу e-mail: E.Patrikeeva@gismps.ru (в отсканированном виде). Для журналов издательской группы IDT PUBLISHERS по адресу: 105005, г.Москва, набережная академика Туполева, д.15, корп. 29 ООО «Издательский дом «Технологии» или по адресу e-mail: knstas@yahoo.com (в отсканированном виде).

К письму прилагается в электронном виде (на CD или по приведенному выше E-mail) текст статьи с аннотацией и ключевыми словами, информацией об авторах, с приставным библиографическим списком, предоставляется с одним комплектом рисунков

Внимание! Названия статьи, ФИО авторов, аннотация и ключевые слова обязательно представляются в соответствии с требованиями ВАК на русском и английском языках.

Информация о каждом авторе должна содержать следующие стандартные сведения:

- Фамилия, имя, отчество;
- Ученая степень, ученое звание, почетное звание;
- Членство в общественных союзах и т.д.;
- Место работы, должность;
- Перечень и номера журналов IDT Publishers, в которых ранее публиковались статьи автора;
- Сведения для контактов;
- Фотографии всех авторов статьи.

Текст необходимо набирать в редакторе Word 97-2003 шрифтом № 12; текст не форматируется. Абзацы организуются путем нажатия клавиши Enter. Текст статьи набирается через полтора интервала на странице формата А4; слева должно быть поле 2 см; страницы нумеруются, «красная строка» обязательна. Все буквенные обозначения, приведенные на рисунках, необходимо пояснять в основном или

подрисуночном тексте. Недопустимы отличия в обозначениях на рисунках и в тексте. Нумеровать следует только те формулы и уравнения, на которые есть ссылка в тексте.

Непосредственно в тексте набираются простые формулы (например, m^2 ; n^2t , $C = 1 + DDF - A_2$), греческие буквы и символы, например, β , $\odot$ — шрифтом Symbol. То, что невозможно набрать непосредственно в текстовом редакторе, — с использованием редактора формул Microsoft Equation (входящего в комплект поставки Microsoft Office) или редактора формул Mathtype.

Не допускается представление текста, в котором формулы представлены в виде изображения.

Фотографии и рисунки к статьям предоставляются отдельными файлами с расширением TIF, или EPS или JPEG с разрешением не менее 300 dpi.

Список использованной литературы составляется в порядке цитирования и дается в конце статьи.

Ссылки на литературу в тексте отмечаются порядковыми цифрами в квадратных скобках.

Вниманию авторов, публикующихся в журналах IDT Publishers.

Представленная информация о каждом авторе помимо журнала будет размещаться на сайте techizdat.ru в разделе «Авторы» на отдельной интернет-странице.

Авторам также предоставляется возможность при публикации своих статей направить в редакцию свою электронную фотографию и дополнительные материалы для размещения их на этой индивидуальной Интернет-визитке. По своему усмотрению автор может рассказать более подробно о себе, об интересных примерах и историях решения технических проблем, о современных задачах — в соответствии с тематикой соответствующего журнала — и т.п. Желательный объем этого материала — не более 1000 знаков с пробелами.

ПОДПИСКА НА ЖУРНАЛ «НАДЕЖНОСТЬ»

Подписаться на журнал в 2015 году можно:

- Через агентство «Роспечать» — индекс 81733;
- По каталогу «Пресса России» агентства «Книга-Сервис» — индекс 11804;
- Через редакцию на любой срок
тел.: 8-916-105-81-31
e-mail: E.Patrikeeva@gismps.ru

REQUIREMENTS OF EDITION ON EXECUTION OF PAPERS IN JOURNALS OF PUBLISHING GROUP OF IDT PUBLISHERS

A letter from the organisation where the author (s) works or from the author (s) personally with the paper offered for publication should be sent to the de facto editorial office address: 107078, Moscow, 5 Orlikov lane, Office 755, LLC "JOURNAL DEPENDABILITY" or e-mail: E.Patrikeeva@gismps.ru (in scanned form). For journals of the publishing group of "IDT PUBLISHERS" the paper offered for publication should be sent to the address: 105005, Moscow, 15 Quay of Academician Tupolev, building 29, LLC "the publishing house Technology" or e-mail to: knstas@yahoo.com <mailto:knstas@yahoo.com> (in scanned form).

The letter should be attached to a paper text containing the summary and keywords, information on authors, bibliographic list, and one complete set of figures. All listed items are to be presented in an electronic form (on CD or via the e-mail address provided above).

Attention! Titles of papers, names of authors, summary and keywords must be presented, in Russian and English languages, according to the requirements of the Higher Attestation Commission. The information on each author should contain the following standard data:

- Surname, name, patronymic;
- Scientific degree, academic status, honorary title;
- Membership of relevant public unions, etc.;
- Place of employment, position;
- The list and numbers of Journals of IDT Publishers in which papers of the author have been previously published;
- Contact information.

Texts should be presented in Word 97-2003 format in a 12-point typeface; the text should not be formatted. Paragraphs should be arranged by pressing the "return" key. The text of the paper should be double-spaced on pages of A4; on the left there should be a margin of 2 cm; pages should be numbered, the «first line indent» is obligatory.

All alphabetical designations represented in figures should be explained in the body text or in a legend. Inconsistencies between designations in figures and in the text are inadmissible. Numbering should only be applied to those formulas and equations that are referred to in the text.

Simple formulas appearing directly in the text (for example, m^2 , n^2t , $c = 1 + DDF - A_2$), and the Greek letters and symbols, for example, β , $\odot$ may be typed using the Symbol font. When it is not possible to type directly in the text editor, use the "Microsoft Equation" formula editor (available with the complete installation of Microsoft Office) or the "Mathtype" formula-editing program. Representation of formulae in the text in the form of images is not admissible. Photos and figures for papers should be provided in individual files with extension TIF, EPS or JPG with a resolution of not less than 300 dpi. The list of literature referred to in the paper (bibliography) is presented according to order of citation and provided at the end of paper. References to the literature in the text are marked by serial numerals in square brackets.

To authors that are published in journals of "IDT Publishers".

In addition to the journal, information on each author will be presented at the techizdat.ru site in the «Authors» section on the individual web page.

Authors of papers for publication have the opportunity to send an electronic photo and additional material to appear on this individualised Internet-business card. At their own discretion, authors can present more details about themselves, interesting examples and stories of solutions to technical problems, about contemporary problems according to subjects of corresponding journal, etc. This material should not exceed 1000 characters including spaces.

SUBSCRIPTION TO THE JOURNAL «RELIABILITY»

It is possible to subscribe to the journal for 2015:

- Through the agency «Rospechat»
– for the first half of the year: an index 81733;
- Under the catalogue "Press of Russia" of the agency «Books-services»:
– for half a year: an index 11804;
- Through the editorial office:
– for any time-frame
tel.: 8-916-105-81-31; e-mail: E.Patrikeeva@gismps.ru

ЗАЯВКА НА ПОДПИСКУ НА ЖУРНАЛ «НАДЕЖНОСТЬ»

с № _____ 20__ г. по № _____ 20__ г., количество экз. _____

Полное наименование организации	
Юридический адрес предприятия (индекс, страна, адрес)	
Почтовый адрес предприятия (индекс, страна, адрес)	
ИНН/КПП	
Расчетный счет	
Банк	
Корреспондентский счет	
БИК	
Контактное лицо: Ф.И.О., должность	
Телефон/факс, e-mail	

Реквизиты: ООО «Журнал «Надежность»

Адрес редакции: 109029, г. Москва, ул. Нижегородская, д.27, стр.1, оф. 209

Тел./факс: (495) 967-77-02 , e-mail: E.Patrikeeva@gismps.ru

ИНН 7709868505 КПП 770901001

р/с 40702810100430000017

к/с 30101810100000000787

Адрес доставки:

Кому: _____

Куда: _____

Для оформления подписки на журнал «Надежность» заполните заявку и отправьте ее по факсу или электронной почте.

По всем вопросам, связанным с подпиской, обращайтесь в редакцию журнала.

Стоимость годовой подписки 4180-00 руб, в т.ч. НДС 10%.

Периодичность – 4 номера в год.

ЖУРНАЛ ИЗДАЕТСЯ ПРИ УЧАСТИИ И ПОДДЕРЖКЕ

ОТКРЫТОГО АКЦИОНЕРНОГО ОБЩЕСТВА «НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ И ПРОЕКТНО-
КОНСТРУКТОРСКИЙ ИНСТИТУТ ИНФОРМАТИЗАЦИИ, АВТОМАТИЗАЦИИ И СВЯЗИ НА
ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОМ ТРАНСПОРТЕ»
(ОАО «НИИАС»)



ОАО «НИИАС» – ведущее предприятие ОАО «РЖД» в области создания комплексов и систем обеспечения безопасности движения, управления движением, геоинформационного обеспечения, мониторинга состояния подвижного состава и инфраструктуры железных дорог



Цели:

- ☐ эффективность,
- ☐ безопасность
- ☐ надежность перевозок



Основные направления деятельности

- Интеллектуальные системы управления
- Технологии управления перевозками и транспортного обслуживания
- Системы автоматики и телемеханики
- Центры автоматизированного управления
- Информационные системы
- Геоинформационные системы и спутниковые технологии
- Системы транспортной безопасности
- Системы управления инфраструктурой
- Системы управления топливно-энергетическими ресурсами
- Испытания, сертификация и экспертиза
- Информационная безопасность
- Нормативно-правовое обеспечение



www.vniias.ru

ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ПУБЛИКАЦИЙ В ЖУРНАЛЕ «НАДЕЖНОСТЬ»

■ СТРУКТУРНАЯ НАДЕЖНОСТЬ ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА

- Методы расчета, технологии и методы моделирования, пакеты прикладных программ, практические расчеты надежности сложных систем.
- Математическая теория технического обслуживания, практические результаты эксплуатации сложных систем, жизненный цикл систем, оптимизация надежности и стоимости на всех этапах жизненного цикла.
- Методы испытаний, критерии принятия решений по результатам испытаний, ускоренные испытания, методы оценки надежности систем по результатам испытаний, практический опыт испытаний на надежность.

■ ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ НАДЕЖНОСТЬ ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА

- Объект, предмет и цели исследования, показатели функциональной надежности, терминология, принципы и методы расчета.
- Методы оценки и прогнозирования надежности программного обеспечения, методы расчета надежности выполнения информационных процессов в программно – аппаратных комплексах с учетом сбойных, программных ошибок, ошибок операторов, ошибок во входной информации.
- Технологии и методы обеспечения функциональной надежности – технологии построения функционально надежного программного обеспечения, методы построения нечувствительных к сбойным ошибкам и ошибкам операторов алгоритмов обработки информации и управления, методы и способы защиты от ошибок во входной информации, практические результаты.

■ ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ СИСТЕМ ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА

- Объект, предмет и цели исследования, показатели функциональной безопасности; функции безопасности, полнота безопасности, терминология в области функциональной безопасности.
- Риски, постулаты и принципы безопасности, остаточные риски, методы оценки рисков, доказательство безопасности. Практические результаты ранжирования опасностей и оценки рисков.
- Математические методы и модели задания требований к полноте безопасности и допустимому времени обнаружения опасного отказа, модели функциональной безопасности многоканальных и многоуровневых систем.
- Технологии обеспечения функциональной безопасности систем на всех этапах жизненного цикла.

■ ОТКАЗОУСТОЙЧИВОСТЬ СИСТЕМ ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА

- Методы пассивной защиты от отказов, математические модели структурного резервирования, постепенной деградации избыточных систем, маскирования неисправностей, практические результаты применения пассивной защиты от отказов.
- Методы активной защиты от структурных отказов и ошибок в выполнении информационных процессов, принципы и способы активной защиты, теоретические основы активной защиты, технические решения, оценки эффективности активной защиты.

■ СЕРТИФИКАЦИЯ ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА

- Аккредитация органов по сертификации и испытательных лабораторий – состояние проблемы в России и за рубежом. Как добиться взаимопризнания результатов испытаний в России и за рубежом? Пути сертификации программно – аппаратных комплексов по требованиям международных стандартов по функциональной безопасности.
- Обязательная и добровольная сертификации – опыт, мнения, предложения.
- Сертификация в области качества и надежности систем – требования стандартов, методики испытаний, практические результаты.
- Сертификация функциональной безопасности систем на основе V-технологии – философия, способы сертификации, практические результаты выборочных глубоких проверок доказательственной базы разработчика.

■ СТАНДАРТИЗАЦИЯ В ОБЛАСТИ НАДЕЖНОСТИ И ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

- Влияние закона «О техническом регулировании» на развитие теории и практики надежности и функциональной безопасности.
- Стандарты RAMS (IEC 62278, EN 50126 и др.) и их отражение в стандартах ГОСТ Р, развитие стандарта ГОСТ 27.002-89 с учетом терминов и определений стандартов RAMS.
- Состояние и перспективы стандартизации в области надежности.
- Основные принципы и базовые положения стандартов по функциональной безопасности ГОСТ Р /МЭК 61508, IEC 61511, EN 50126, IEC 62278, IEC 62280, EN 50128, IEC 62279, EN 50129, EN 50159 (1.2) и др.
- Состояние и перспективы стандартизации в области функциональной безопасности.

GUIDELINES FOR PUBLICATION IN THE JOURNAL

«DEPENDABILITY»

STRUCTURAL RELIABILITY THE THEORY AND PRACTICE

- Methods of calculation, technologies and methods of modeling, packages of applied programs, practical calculations of reliability of complex systems.
- The mathematical theory of maintenance service, practical results of complex system operations, life cycle of systems, optimization of reliability and costs at all stages of life cycle.
- Test methods, criteria of decision-making by test results, accelerated tests, methods of reliability assessment of systems by test results, practical experience of reliability tests.

FUNCTIONAL RELIABILITY THE THEORY AND PRACTICE

- Object, subject and purposes of research, parameters of functional reliability, terminology, principles and calculation methods.
- Methods of assessment and forecasting of software reliability, methods of calculation of information processes reliability performance in software-hardware complexes taking into account faulty program errors, errors of operators, errors of input information.
- Technologies and methods of ensuring functional reliability – technologies of functionally reliable software development, methods of construction of algorithms of information processing and management tolerant to faulty errors and to errors of operators and methods and ways of error protection in input information, practical results.

FUNCTIONAL SAFETY OF SYSTEM THE THEORY AND PRACTICE

- Object, subject and the purposes of research, parameters of functional safety; functions of safety, completeness of safety, terminology in the field of functional safety.
- Risks, postulates and principles of safety, residual risks, methods of an estimation of risks, the proof of safety. Practical results of ranging of dangers and estimations of risks.
- Mathematical methods and models of the task of requirements to completeness of safety and admissible time of detection of dangerous refusal, model of functional safety of multichannel and multilevel systems.
- Technologies for ensuring functional safety of systems at all stages of life cycle.

FAULT TOLERANCE OF SYSTEMS THE THEORY AND PRACTICE

- Methods of passive protection against failures, mathematical models of structural redundancy, gradual degradation of redundant systems, fault masking, practical results of application of passive protection against failures.
- Methods of active protection against structural failures and errors in performance of information processes, principles and methods of active protection, theoretical bases of active protection, technical decisions, estimations of active protection efficiency.

CERTIFICATION THE THEORY AND PRACTICE

- Accreditation of certification bodies and test laboratories – a problem state in Russia and abroad. How to achieve mutual recognition of test results in Russia and abroad? Methods of certification of software – hardware complexes under requirements of international standards on functional safety.
- Obligatory and voluntary certifications – experience, opinions, offers.
- Certification in the field of quality and reliability of systems – requirements of standards, techniques of tests, practical results.
- Certification of functional safety of systems on the basis of V-technology – philosophy, certification methods, practical results of selective deep checks of a developer evidentiary base.

STANDARDIZATION IN THE FIELD OF RELIABILITY AND FUNCTIONAL SAFETY

- Influence of the law «Of technical regulation» on development of the theory and practice of reliability and functional safety.
- RAMS standards (IEC 62278, EN 50126, etc.) and their reflection in standards of GOST R, development of the standard GOST 27.002-89 in view of terms and definitions of RAMS standards.
- States and prospects of standardization in the field of reliability.
- Main principles and basic regulations of standards on functional safety GOST R/MЭК 61508, IEC 61511, EN 50126, IEC 62278, IEC 62280, EN 50128, IEC 62279, EN 50129, EN 50159 (1.2), etc.
- Condition and prospects of standardization in the field of functional safety.