

## НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ / SCIENTIFIC- TECHNICAL JOURNAL

### В НОМЕРЕ / IN THIS RELEASE:

- О МЕЖДУНАРОДНОЙ КОНФЕРЕНЦИИ ICSSAR 2013, ПРОХОДИВШЕЙ В Г. НЬЮ-ЙОРК С 16.06.2013 Г. ПО 20.06.2013 Г.
- *REPORT ON THE INTERNATIONAL CONFERENCE ICSSAR 2013*
- МЕТОДОЛОГИЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ НАДЕЖНОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ МАШИН ПО РАЗЛИЧНЫМ КРИТЕРИЯМ
- *METHODOLOGY OF MACHINE ELEMENTS' RELIABILITY PREDICTION BY MEANS OF VARIOUS CRITERIA*
- РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ FRACAS ДЛЯ БОРТОВОГО ОБОРУДОВАНИЯ С АВТОМАТИЗИРОВАННЫМ ОПРЕДЕЛЕНИЕМ ИСТОЧНИКОВ СИСТЕМАТИЧЕСКИХ ОТКАЗОВ
- *DEVELOPMENT OF FRACAS SYSTEMS FOR AIRBORNE EQUIPMENT WITH AUTOMATED IDENTIFICATION OF SOURCES OF SYSTEMATIC FAILURES*
- ИССЛЕДОВАНИЕ И КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НАДЕЖНОСТИ ТЕХНИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ
- *STUDY AND COMPUTER MODELING OF DEPENDABILITY OF TECHNICAL OBJECTS*
- ЭМПИРИЧЕСКАЯ МЕТОДИКА ПРЕДСКАЗАНИЯ КОЛЛАПСА НАГРУЖАЕМОЙ МНОГОЭЛЕМЕНТНОЙ СИСТЕМЫ
- *EMPIRICAL TECHNIQUE OF FORECASTING OF LOADED MULTI-ELEMENT SYSTEM COLLAPSE*
- МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОЖИДАЕМОЙ СТОИМОСТИ ГАРАНТИЙНЫХ ОБЯЗАТЕЛЬСТВ ПРЕДПРИЯТИЯ-ИЗГОТОВИТЕЛЯ
- *METHODS FOR DEFINING OF A MANUFACTURER'S WARRANTY EXPECTED COSTS*
- ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРИЕМЛЕМЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ БЕЗОПАСНОСТИ ДЛЯ МНОГОКАНАЛЬНЫХ СИСТЕМ ПРОТИВОАВАРИЙНОЙ ЗАЩИТЫ
- *DEFINITION OF ACCEPTABLE SAFETY PERFORMANCE FOR MULTI-CHANNEL EMERGENCY PROTECTION SYSTEMS*
- СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ РИСКАМИ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ПО ОБЕСПЕЧЕНИЮ БЕЗОПАСНОСТИ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССОВ НА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОМ ТРАНСПОРТЕ
- *IMPROVING THE SYSTEM OF RISK MANAGEMENT TO ENSURE THE SAFETY OF PRODUCTION PROCESSES*
- КРИТЕРИИ КАЧЕСТВА ПЛАНОВ КОНТРОЛЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ БЕЗОТКАЗНОСТИ
- *QUALITY CRITERIA FOR PLANS OF FAILURE-FREE PERFORMANCE CONTROL*

**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](http://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., к.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.  
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](http://www.dependability.pro)

Верстка  
Куртиш Б.С.

Отпечатано в ОАО «Областная типография «Печатный двор».  
432049, г. Ульяновск, ул. Пушкирева, 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, Ph. D.

**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](http://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

|                                                                                                                                                                                                                 |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| О МЕЖДУНАРОДНОЙ КОНФЕРЕНЦИИ ICOSSAR 2013, ПРОХОДИВШЕЙ В Г. НЬЮ-ЙОРК С 16.06.2013 Г. ПО 20.06.2013 Г.<br><i>Шубинский И.Б.</i> .....                                                                             | 3   |
| REPORT ON THE INTERNATIONAL CONFERENCE ICOSSAR 2013<br><i>Shubinsky I.B.</i> .....                                                                                                                              | 4   |
| <i>Структурная надежность. Теория и практика / Structural reliability. The theory and practice</i>                                                                                                              |     |
| МЕТОДОЛОГИЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ НАДЕЖНОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ МАШИН ПО РАЗЛИЧНЫМ КРИТЕРИЯМ<br><i>Анцупов А.В., Анцупов А.В., (мл), Анцупов В.П.</i> .....                                                                    | 5   |
| METHODOLOGY OF MACHINE ELEMENTS' RELIABILITY PREDICTION BY MEANS OF VARIOUS CRITERIA<br><i>Antsupov A.V., Antsupov A.V. (jr), Antsupov V.P.</i> .....                                                           | 15  |
| РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ FRACAS ДЛЯ БОРТОВОГО ОБОРУДОВАНИЯ С АВТОМАТИЗИРОВАННЫМ ОПРЕДЕЛЕНИЕМ<br>ИСТОЧНИКОВ СИСТЕМАТИЧЕСКИХ ОТКАЗОВ<br><i>Шишкин В.В., Романов Ю. В., Стенюшкин Д.И.</i> .....                         | 24  |
| DEVELOPMENT OF FRACAS SYSTEMS FOR AIRBORNE EQUIPMENT WITH AUTOMATED IDENTIFICATION OF SOURCES<br>OF SYSTEMATIC FAILURES<br><i>Shishkin V.V., Romanov Yu.V., Stenyushkin D. I.</i> .....                         | 31  |
| ИССЛЕДОВАНИЕ И КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НАДЕЖНОСТИ ТЕХНИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ<br><i>Байнева И.Д., Байнев В.В.</i> .....                                                                                             | 38  |
| STUDY AND COMPUTER MODELING OF DEPENDABILITY OF TECHNICAL OBJECTS<br><i>Bayneva I.I., Baynev V.V.</i> .....                                                                                                     | 47  |
| ЭМПИРИЧЕСКАЯ МЕТОДИКА ПРЕДСКАЗАНИЯ КОЛЛАПСА НАГРУЖАЕМОЙ МНОГОЭЛЕМЕНТНОЙ СИСТЕМЫ<br><i>Онищенко Д.Д.</i> .....                                                                                                   | 55  |
| EMPIRICAL TECHNIQUE OF FORECASTING OF LOADED MULTI-ELEMENT SYSTEM COLLAPSE<br><i>Onischenko D.D.</i> .....                                                                                                      | 66  |
| МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОЖИДАЕМОЙ СТОИМОСТИ ГАРАНТИЙНЫХ ОБЯЗАТЕЛЬСТВ ПРЕДПРИЯТИЯ-<br>ИЗГОТОВИТЕЛЯ<br><i>Ахрамович И.Л., Козут С.А., Терещенко Ф.В.</i> .....                                                       | 76  |
| METHODS FOR DEFINING OF A MANUFACTURER'S WARRANTY EXPECTED COSTS<br><i>Akhramovich I.L., Kogut S.A., Tereschenko F.V.</i> .....                                                                                 | 82  |
| <i>Функциональная безопасность. Теория и практика / Functional safety. The theory and practice</i>                                                                                                              |     |
| ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРИЕМЛЕМЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ БЕЗОПАСНОСТИ ДЛЯ МНОГОКАНАЛЬНЫХ СИСТЕМ<br>ПРОТИВОАВАРИЙНОЙ ЗАЩИТЫ<br><i>Карманов А.В., Телюк А.С.</i> .....                                                                  | 88  |
| DEFINITION OF ACCEPTABLE SAFETY PERFORMANCE FOR MULTI-CHANNEL EMERGENCY PROTECTION SYSTEMS<br><i>Karmanov A.V., Telyuk A.S.</i> .....                                                                           | 96  |
| СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ РИСКАМИ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ПО ОБЕСПЕЧЕНИЮ<br>БЕЗОПАСНОСТИ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССОВ НА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОМ ТРАНСПОРТЕ<br><i>Аксенов В.А., Раенок Д.Л., Завьялов А.М.</i> ..... | 103 |
| IMPROVING THE SYSTEM OF RISK MANAGEMENT TO ENSURE THE SAFETY OF PRODUCTION PROCESSES<br><i>Aksenov V.A., Raenok D.L., Zavyalov A.M.</i> .....                                                                   | 112 |
| <i>Хорошо забытое / Well-forgotten old</i>                                                                                                                                                                      |     |
| КРИТЕРИИ КАЧЕСТВА ПЛАНОВ КОНТРОЛЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ БЕЗОТКАЗНОСТИ<br><i>Демидович Н.О.</i> .....                                                                                                                      | 121 |
| QUALITY CRITERIA FOR PLANS OF FAILURE-FREE PERFORMANCE CONTROL<br><i>Demidovich N.O.</i> .....                                                                                                                  | 129 |
| <i>Информация / Information</i>                                                                                                                                                                                 |     |
| РЕЦЕНЗИЯ ЧЕПУРКО В.А. НА УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ АНТОНОВА А.В., НИКУЛИНА М.С. «СТАТИСТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ<br>В ТЕОРИИ НАДЕЖНОСТИ»<br><i>Чепурко В.А.</i> .....                                                               | 136 |
| REVIEW OF THE TEXTBOOK BY ANTONOV A.V., NIKULIN M.S. STATISTICAL MODELS IN THE RELIABILITY THEORY<br><i>Chepurko V.A.</i> .....                                                                                 | 140 |
| КНИГА ШУБИНСКОГО И.Б., «СТРУКТУРНАЯ НАДЕЖНОСТЬ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ».....                                                                                                                                      | 144 |
| BOOK BY SHUBINSKY I.B. STRUCTURAL RELIABILITY OF INFORMATION SYSTEMS.....                                                                                                                                       | 144 |
| КНИГА ШУБИНСКОГО И.Б., «ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ НАДЕЖНОСТЬ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ».....                                                                                                                                   | 145 |
| BOOK BY SHUBINSKY I.B. FUNCTIONAL RELIABILITY OF INFORMATION SYSTEMS.....                                                                                                                                       | 145 |
| ГНЕДЕНКО –ФОРУМ.....                                                                                                                                                                                            | 147 |
| GNEDENKO FORUM.....                                                                                                                                                                                             | 148 |

## О МЕЖДУНАРОДНОЙ КОНФЕРЕНЦИИ ICOSSAR 2013, ПРОХОДИВШЕЙ В Г. НЬЮ-ЙОРК С 16.06.2013 Г. ПО 20.06.2013 Г.

Международная конференция ICOSSAR была создана для обсуждения научных проблем в области оценки рисков, структурной безопасности и надежности. Конференция объединяет ведущих инженеров, ученых, представителей академической высшей школы, исследователей и практиков из различных отраслей и сфер инженерно-технической деятельности для обмена опытом и выработки новых идей и подходов. Данная конференция проводится один раз в четыре года, начиная с 1969г. Конференция проводится на базе ведущих университетов стран – участников IASSAR (Международная ассоциация структурной безопасности и надежности):

США (Вашингтон – 1969, Сан-Франциско – 1989, Нью-Порт Бич – 2001, Нью-Йорк – 2013);

Германия (Мюнхен – 1977);

Норвегия (Тронхейм – 1981);

Япония (Кобо – 1985, Киото – 1997, Осака -2009);

Австрия (Инсбрук – 1993);

Италия (Рим – 2005).



В Нью-Йорке ICOSSAR 2013 проходила на базе Колумбийского университета, одного из самых крупных и авторитетных университетов мира. На конференции были рассмотрены вопросы структурной надежности и безопасности в области сейсмологии, морского транспорта, авиационной и космической отраслях, трубопроводного транспорта, методы и приложения в области оценки и анализа рисков, проблемы прикладной теории вероятности, Байесовские методы оценивания, проблемы построения надежных и безопасных искусственных сооружений, в том числе мостов, вопросы стоимости жизненного цикла, влияние климатических изменений на инфраструктуру, экологические аспекты инженерно-технической деятельности и т.д.

На конференции была организована работа 14 секций. Заслушано шесть пленарных и 645 секционных докладов. Работа проходила ежедневно с 8.00 до 18.00. В работе конференции принимали участие ведущие ученые США, Канады, Китая, Японии, Южной Кореи, Индии, Мексики, Норвегии, Дании, Нидерландов, Швейцарии, Германии, Австрии, Италии, Португалии, Чехии, Греции, Египта, Чили, Сингапура, Австралии, Пакистана. От Российской Федерации присутствовали 3 человека. Следует отметить, что представительство ученых из Юго-Восточной Азии было подавляющим. Обращает на себя внимание то обстоятельство, что ряд китайских, индийских и японских профессоров представляли свои научные школы на конференции посредством достаточно большого количества докладов своих учеников не менее уровня магистров и аспирантов.

Большой интерес представляли доклады по оценкам рисков и Байесовским методам оценивания.

Два ведущих европейских издательства в сфере технической литературы: CRC Press и Springer развернули на конференции выставку наиболее значимых последних монографий на английском языке в области анализа и оценки рисков, управления надежностью и влияния человеческого фактора на сложные технические системы.

Состоялись рабочие контакты с организаторами конференции профессорами Джорджем Деодатисом, Брюсом Эллингвудом, Дэном Франгаполом, а также с профессорами Санг-Хао-Ким, Салеха Наджми Хаббибулах и рядом других.

На конференции нами были презентованы последние номера журнала «Надежность», которые вызвали практический интерес и желание публиковаться у организаторов конференции и научного сообщества.

*Главный редактор журнала «Надежность», д.т.н., профессор И.Б. Шубинский*



## REPORT

# ON THE INTERNATIONAL CONFERENCE ICOSSAR 2013 THAT TOOK PLACE IN NEW YORK FROM JUNE 16TH TO 20TH, 2013



The International Conference ICOSSAR was established to discuss scientific issues related to risk assessment, structural safety and reliability. The Conference joins prominent engineers, scientists, academicians, researchers and experts from various industries and engineering fields to share experience and to elaborate new ideas and approaches. The Conference occurs every four years since 1969. The Conference is held at leading universities of the member countries of IASSAR (International Association for Structural Safety and Reliability):

USA (Washington – 1969, San Francisco – 1989, Newport Beach – 2001, New York – 2013);

Germany (Munich – 1977);

Norway (Trondheim – 1981);

Japan (Kobe – 1985, Kyoto – 1997, Osaka – 2009);

Austria (Innsbruck – 1993);

Italy (Rome – 2005).

ICOSSAR 2013 in New York was held on the campus of Columbia University, one of the biggest and renowned universities in the world. The Conference discussed the issues of structural safety and reliability in relation to seismology, water-borne transportation, aircraft and space industries, pipeline transportation, methods and applications in risks assessment and analysis, applied probability

theory issues, Bayesian estimation methods, issues related to construction of safe and reliable artificial structures, including bridges, life cycle cost issues, climatic influences on infrastructure, environmental aspects of engineering and construction activities etc.

The Conference had 14 sections. Six plenary and 645 section reports were presented. The Conference sessions were held daily from 8:00 to 18:00. The Conference gathered together leading scientists from USA, Canada, China, Japan, South Korea, India, Mexico, Norway, Denmark, Netherlands, Switzerland, Germany, Austria, Italy, Portugal, Czech Republic, Greece, Egypt, Chile, Singapore, Australia, Pakistan. There were 3 representatives of the Russian Federation. It is worth to note that the number of representatives from Southeast Asia was overwhelming. It is of interest that a number of Chinese, Indian and Japanese professors presented their scientific schools at the Conference through a sufficiently high amount of reports delivered by their master and postgraduate students.

A huge interest was evoked by reports on risk assessment and Bayesian estimation methods.

Two leading European publishers of scientific literature, CRC Press and Springer, organized an exhibition at the Conference to present the most important works published recently in English and related to risk analysis and assessment, reliability management and human factor influences on complex engineering systems.

Working contacts were made with the organizers of the Conference professors George Deodatis, Bruce Ellingwood, Den Frangopol, as well as with professors Sang Hao Kim, Saleha Nadgmi Habibullah and others.

At the Conference we presented the recent issues of the Dependability journal which roused some practical interest and intentions to cooperate in the organizers of the Conference and the scientific community.

*Dependability's editor-in-chief, doctor of technical sciences, professor I.B. Shubinsky*

**Анцупов А.В. , Анцупов А.В. (мл), Анцупов В.П.**

## **МЕТОДОЛОГИЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ НАДЕЖНОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ МАШИН ПО РАЗЛИЧНЫМ КРИТЕРИЯМ**

*Предложен общий методологический подход к оценке надежности нагруженных элементов механических систем на стадии проектирования в виде последовательности этапов процедуры построения физико-вероятностной модели процесса формирования их параметрических отказов по различным критериям. Представлена методология прогнозирования долговечности деталей по критерию кинетической прочности и показан пример ее реализации.*

**Ключевые слова:** методология, прогнозирование, надежность, безотказность, долговечность, отказ, повреждаемость, гамма-процентный ресурс.

Одной из наиболее важных проблем теории надежности является прогнозирование поведения (смены состояний) деталей и узлов механических систем в предполагаемых условиях внешнего нагружения, когда еще на стадии проектирования становится возможным с необходимой степенью достоверности оценить показатели их безотказности и долговечности. Основным методом прогнозирования является математическое моделирование. В этом случае оценка поведения элементов системы и изменение их параметров во времени при будущей эксплуатации осуществляется на динамических, физико-вероятностных моделях [1, 2].

В данной работе на основе анализа известных моделей оценки надежности технических объектов [1, 2], а также базовых понятий технической диагностики (ГОСТ 20911-89), теории надежности (ГОСТ 27.002-89) и теории вероятностей, сформулирован универсальный методологический подход к прогнозированию надежности элементов механических систем.

Понимая методологию как учение, совокупность методических приемов, правил или принципов, в соответствии с которыми осуществляется процесс познания объективных явлений природы [3, 4] (здесь – объективного процесса формирования отказов технических изделий при их повреждаемости (деградации) в поле внешних воздействий), предлагаемый подход представляется как последовательность взаимосвязанных и вытекающих одна из другой операций.

В общем виде его можно сформулировать как последовательность этапов логической процедуры для оценки показателей безотказности и долговечности – процесса построения физико-математической модели параметрической надежности как действующих, так и вновь проектируемых технических объектов по различным критериям.

Здесь он излагается в вероятностной форме и представляет собой совокупность из семи последовательных этапов [5].

## 1. Выбор базового параметра состояния объекта

Для проектируемого вида изделий согласно стандартному, по ГОСТ 20911-89, определению понятия «состояние объекта», выбирается параметр  $X_t$  (как случайная величина), изменение которой моделирует его поведение (смену состояний) в течение всего периода работы в известных условиях внешнего воздействия.

## 2. Формулирование уравнения состояний объекта

Вывод или выбор случайной функции-зависимости, описывающей возрастающее (+) или убывающее (-) во времени изменение параметра  $X_t$ , и моделирующей смену состояний изделия при его старении (деградации) в процессе эксплуатации:

$$X_t = X_0 \pm \int_0^t \dot{X}_t \cdot dt, \quad (\text{I})$$

где  $X_0$  – распределение параметра  $X_t$  в момент времени  $T = t_0$ , характеризующее исходное состояние объекта;

$\dot{X}_t = dX_t / dt$  – текущее распределение случайной величины скорости повреждаемости объекта в момент времени  $T = t$ .

Если случайная величина скорости повреждаемости объекта не изменяется во времени –  $\dot{X}_t = \dot{X} = \text{const}$ , то условия (1) можно записать в виде:

$$X_t = X_0 \pm \dot{X} \cdot t. \quad (\text{I.a})$$

Уравнения (I) моделируют процесс деградации объекта во времени.

## 3. Формулирование условия работоспособности объекта

В соответствии со стандартным, по ГОСТ 27.002-89, определением «работоспособность объекта», математически формулируется условие его работоспособности в виде одного из возможных неравенств:

$$X_t = X_0 + \int_0^t \dot{X}_t \cdot dt < x_{np} \text{ или } X_t = X_0 - \int_0^t \dot{X}_t \cdot dt > x_{np}, \quad (\text{II})$$

где  $x_{np}$  – предельное значение параметра  $X_t$ , устанавливаемое в нормативно-технической документации (НТД) или назначаемое из опыта эксплуатации подобных объектов.

Если случайные величины в условии (I) распределены по нормальному закону, а  $\dot{X}_t = \dot{X} = const$ , то условия работоспособности (II) можно записать в виде:

$$X_t = X_0 + \dot{X} \cdot t < x_{np} \text{ и } X_t = X_0 - \dot{X} \cdot t > x_{np}. \quad (\text{II.a})$$

Центрируя и нормируя величины  $X_t$  и  $x_{np}$ , неравенства (II.a) можно записать с использованием соответствующих квантилей в виде:

$$U_t < u_{np(t)} \text{ или } U_t > u_{np(t)}. \quad (\text{II.б})$$

Раскрывая текущее значение квантили нормального нормированного распределения (ННР) параметра, условия (II.б) можно представить в виде:

$$\frac{X_t - (\bar{x}_0 + \bar{\dot{x}} \cdot t)}{\sqrt{\sigma_{x0}^2 + \sigma_{\dot{x}}^2 \cdot t^2}} > u_{np(t)} \text{ или } \frac{X_t - (\bar{x}_0 - \bar{\dot{x}} \cdot t)}{\sqrt{\sigma_{x0}^2 + \sigma_{\dot{x}}^2 \cdot t^2}} < u_{np(t)}, \quad (\text{II.в})$$

где  $u_{np(t)} = \frac{x_{np} - (\bar{x}_0 \pm \bar{\dot{x}} \cdot t)}{\sqrt{\sigma_{x0}^2 + \sigma_{\dot{x}}^2 \cdot t^2}}$  – текущее предельное значение квантили ННР случайной величины

$X_t = x_{np}$ ;  $\bar{x}_0 = (x_{0\max} + x_{0\min}) / 2$ ;  $\sigma_{x0} = (x_{0\max} - x_{0\min}) / 6$  – числовые характеристики (среднее и стандарт) случайного параметра  $X_t = X_0$  состояния трибосопряжения на начальный момент времени  $T = t_0$ ;  $x_{0\max}$ ,  $x_{0\min}$  – максимальное и минимальное значения параметра  $X_0$  объекта, задаваемые как начальные условия;  $\bar{\dot{x}}$  и  $\sigma_{\dot{x}}$  – числовые характеристики случайного параметра  $\dot{X}$ .

Уравнения (II) отражают область всех возможных работоспособных состояний объекта.

#### 4. Вывод уравнений для оценки показателей безотказности объекта

С использованием основного понятия теории вероятностей – «функция распределения», формулируются зависимости для оценки вероятности безотказной работы объекта – вероятности выполнения условий работоспособности (II) для любого фиксированного момента времени будущей эксплуатации:

$$P(t) = P(X_t < x_{np}) = P\left(X_0 + \int_0^t \dot{X}_t \cdot dt < x_{np}\right) = F(x_{np}) \text{ или}$$

$$P(t) = P(X_t > x_{np}) = 1 - P\left(X_0 - \int_0^t \dot{X}_t \cdot dt < x_{np}\right) = 1 - F(x_{np}). \quad (\text{III})$$

Если нормальное распределение параметра  $\dot{X}_t$  неизменно во времени ( $\dot{X}_t = \dot{X} = const$ ), то основной показатель безотказности выражается с помощью функции ННР  $F(u_{np(t)}) = F_t(x_{np})$  или функции Лапласа  $\Phi(u_{np(t)})$ :



$$P(t) = P(X_t < x_{np}) = F(u_{np(t)}) = \Phi(u_{np(t)}) = \Phi\left(\frac{x_{np} - (\bar{x}_0 + \bar{\dot{x}} \cdot t)}{\sqrt{\sigma_{x0}^2 + \sigma_{\dot{x}}^2 \cdot t^2}}\right) \text{ или}$$

$$P(t) = P(X_t > x_{np}) = 1 - F(u_{np(t)}) = 1 - \Phi(u_{np(t)}) = 1 - \Phi\left(\frac{x_{np} - (\bar{x}_0 - \bar{\dot{x}} \cdot t)}{\sqrt{\sigma_{x0}^2 + \sigma_{\dot{x}}^2 \cdot t^2}}\right). \quad (\text{III.a})$$

Уравнения (III.a) определяют закон надежности объекта в интегральной (или дифференциальной  $f(t) = -dP(t)/dt$ ) форме – закон формирования постепенных отказов объекта при решении прямой задачи теории надежности. Согласно [2] он асимметричен и не подчиняется нормальному распределению.

## 5. Формулирование уравнения перехода объекта в предельное состояние (состояние параметрического отказа)

В соответствии со стандартными, по ГОСТ 27.002-89, определениями «предельное состояние» и «параметрический отказ», формулируются условия перехода сопряжения в состояние параметрического отказа в виде достижения параметром  $X_t$  предельного значения:

$$X_t = X_0 \pm \int_0^t \dot{X}_t \cdot dt = x_{np}. \quad (\text{IV})$$

Если нормальное распределение параметра  $\dot{X}_t$  неизменно во времени  $\dot{X}_t = \dot{X} = const$ , то выражения (IV) принимают вид:

$$\frac{X_t - (\bar{x}_0 + \bar{\dot{x}} \cdot t)}{\sqrt{\sigma_{x0}^2 + \sigma_{\dot{x}}^2 \cdot t^2}} = u_{np(t)} \text{ или } \frac{X_t - (\bar{x}_0 - \bar{\dot{x}} \cdot t)}{\sqrt{\sigma_{x0}^2 + \sigma_{\dot{x}}^2 \cdot t^2}} = u_{np(t)}. \quad (\text{IV.a})$$

Уравнения (IV) отражают область всех возможных предельных состояний объекта.

## 6. Вывод уравнений для оценки показателей долговечности (ресурсных характеристик) объекта

В соответствии с определением гамма-процентного ресурса  $t_\gamma$  по ГОСТ 27.002-89, выводятся зависимости для его оценки решением уравнения (IV) относительно  $t = t_\gamma$  для заданного допустимого значения вероятности безотказной работы  $[P(t)] = \gamma$  и соответствующего ему значения квантили  $[u_{np(\gamma)}]$  распределения по известному закону случайной величины  $X_t$ . В общем виде эту зависимость можно представить некоторой функцией:

$$t_\gamma = f(\bar{x}_0, \sigma_{x0}, \bar{\dot{x}}, \sigma_{\dot{x}}, [u_{np(\gamma)}]). \quad (\text{V})$$

Если нормальное распределение параметра  $\dot{X}_t$  неизменно во времени –  $\dot{X}_t = \dot{X} = const$ , то

гамма-процентный ресурс определяется решением уравнений (IV.a) относительно  $t = t_\gamma$  при подстановке в него  $X_t = x_{np}$  и  $u_{np(t)} = [u_{np(\gamma)}]$  в виде:

$$t_\gamma = \frac{(\pm \bar{x}) \cdot \Delta \bar{x}_{np} - \sqrt{(\Delta \bar{x}_{np} \cdot \bar{x})^2 - ([u_{np(\gamma)}]^2 \cdot \sigma_{\bar{x}}^2 - \bar{x}^2) \cdot ([u_{np(\gamma)}]^2 \cdot \sigma_{x0}^2 - \Delta \bar{x}_{np}^2)}}{\bar{x}^2 - [u_{np(\gamma)}]^2 \cdot \sigma_{\bar{x}}^2}, \quad (\text{V.a})$$

где значение  $[u_{np(\gamma)}]$  определено заданным допустимым значением вероятности безотказной работы  $[P(t)] = \gamma$ , а величина  $\Delta \bar{x}_{np} = x_{np} - \bar{x}_0$  есть оценка математического ожидания предельного изменения  $\Delta X_t$  параметра  $X_t$ .

## 7. Вывод кинетического уравнения повреждаемости объекта

На основе какой-либо теории, концепции или экспериментальных исследований, выводится кинетическое уравнение для оценки скорости  $\dot{X}_t$  повреждаемости объекта в зависимости от его геометрических и микрогеометрических  $d_i, \Delta_i$  характеристик, свойств  $\sigma_i$  материала, силовых и кинематических параметров  $F, V$  внешнего воздействия, времени  $t$  и других факторов.

В общем виде его можно представить в виде некоторой случайной функции:

$$\dot{X}_t = f(d_i, \Delta_i, F, V, \sigma_i, t, \dots). \quad (\text{VI})$$

Условие (VI) является кинетическим уравнением повреждаемости объекта.

Изложенный выше методологический подход (I) – (VI) может быть сформулирован в виде отдельной методологии оценки (прогнозирования) надежности определенных групп технических объектов по одному из возможных критериев – условий (II) работоспособности [1, 2]:

- статической или кинетической прочности;
- износостойкости;
- жесткости;
- несущей способности;
- теплостойкости и др.

При выбранном параметре  $X_t$  состояния конкретного изделия (детали, узла) и известных следующих данных:

- о законе его распределения;
- о граничных условиях, описывающих схему нагружения объекта, его свойства и начальное состояние в предполагаемых условиях эксплуатации;
- об уравнении (VI) его повреждаемости для оценки  $\dot{X}_t$ ,

указанная последовательность этапов вырождается в последовательность операций (вероятностную методику) количественной оценки показателей безотказности  $P(t) = P(X_t < x_{np})$  или  $P(t) = P(X_t > x_{np})$  и долговечности  $t_\gamma$  исследуемого объекта либо при его проектировании, либо при эксплуатации.

В частности, в работе [5] данный подход реализован в виде методологии прогнозирования параметрической надежности большой группы объектов – «стационарных» трибосопряжений по критерию износостойкости их элементов.

Ниже на основе предложенного подхода сформулирована методология прогнозирования надежности другой группы объектов – нагруженных элементов машин и конструкций по критерию кинетической прочности.

В настоящее время проблема прочности твердых тел под нагрузкой рассматривается с позиции кинетического подхода [6-8]. С этой точки зрения процесс разрушения представляется как развивающийся во времени процесс накопления повреждений структуры материала. При достижении в каком-либо локальном объеме текущей плотностью дефектов структуры материала – его повреждаемостью, предельной величины, происходит возникновение микротрещины, которая со скоростью звука распространяется по наиболее нагруженным объемам всего материала и приводит к разделению его на части (разрушению). Степень поврежденности структуры локальных объемов материала детали в любой фиксированный момент времени  $t$  количественно оценивают величиной плотности потенциальной энергии дефектов  $u_e(t) = u_{et}$ , которая определяется условиями внешнего нагружения и свойствами материала [8].

Учитывая вышесказанное, этапы методологии прогнозирования показателей безотказности и долговечности нагруженных деталей, могут быть сформулированы, согласно (I) – (VI), в виде последовательности следующих операций.

*На первом этапе* в качестве параметра  $X_t$  состояния детали, в которой под действием внешних нагрузок при температуре  $T$ , возникают внутренние напряжения  $\sigma$ , принимаем плотность потенциальной энергии дефектов  $u_{et}$ , которая характеризует текущую степень поврежденности структуры локальных объемов материала детали [8]. При этом распределение случайной величины  $X_t = u_{et}$  в любой момент времени  $t$ , как параметра, зависящего от множества независимых случайных факторов, будем полагать нормальным, согласно центральной предельной теореме теории вероятностей [2]. Кроме того, для упрощения математических выражений, будем оперировать с ее средним значением  $\bar{u}_{et}$ .

*На втором этапе* сформулируем уравнение состояний нагруженного элемента:

$$\bar{u}_{et} = \bar{u}_{e0} + \int_0^t \bar{\dot{u}}_{et} \cdot dt, \quad (1)$$

где  $\bar{u}_{e0}$  – средняя плотность потенциальной (скрытой) энергии материала детали в исходном состоянии (при  $t = 0$ ), которую, согласно [8], можно определить в функции среднего значения твердости  $HV$  по Виккерсу:

$$\bar{u}_{e0} = \frac{((0,071 \cdot HV)^{1,2})^2}{6 \cdot G(T) \cdot (6,47 \cdot 10^{-6} \cdot HV + 0,12 \cdot 10^{-2})^2}; \quad (1.a)$$

$\bar{\dot{u}}_{et} = d\bar{u}_{et} / dt$  – средняя скорость повреждаемости (накопления повреждений) структуры материала элемента в момент времени  $t$ .

*На третьем этапе* сформулируем условие работоспособности нагруженной детали:

$$\bar{u}_{et} = \bar{u}_{e0} + \int_0^t \bar{\dot{u}}_{et} \cdot dt < u_{e*}, \quad (2)$$

где  $u_{e*} = u_* - u_T$  – критическая плотность энергии дефектов структуры локальных объемов материала нагруженной детали [8];  $u_*$  – критическая плотность внутренней энергии (критическая

энергоемкость) материала, равная энтальпии его плавления в твердом  $\Delta H_{TB}$  или жидком  $\Delta H_S$  состоянии;  $u_T = \int_0^T \rho \cdot c dT$  – тепловая составляющая плотности внутренней энергии материала нагруженной детали при заданной температуре  $T$ ;  $\rho$ ,  $c$  – плотность и теплоемкость материала детали.

На четвертом этапе запишем выражение для оценки безотказности нагруженного элемента в момент времени  $t$ , используя в качестве показателя коэффициент запаса надежности (коэффициент безопасности), рассчитанный по среднему значению  $\bar{u}_{et}$  параметра состояния [1, 2]:

$$n_t = u_{e*} / \bar{u}_{et} = u_{e*} / (\bar{u}_{e0} + \int_0^t \bar{\dot{u}}_{et} \cdot dt). \quad (3)$$

На пятом этапе сформулируем уравнение перехода нагруженной детали в предельное состояние (состояние параметрического отказа):

$$\bar{u}_{et} = \bar{u}_{e0} + \int_0^t \bar{\dot{u}}_{et} \cdot dt = u_{e*}, \quad (4)$$

На шестом этапе, используя выражение (5), формулируем уравнение, решение которого относительно  $t = \bar{t}_{np}$ , позволит определить средний предельный ресурс до отказа (разрушения) элемента:

$$\int_0^{\bar{t}_{np}} \bar{\dot{u}}_{et} \cdot dt = u_{e*} - \bar{u}_{e0}. \quad (5)$$

На седьмом этапе в качестве кинетического уравнения повреждаемости для оценки средней скорости  $\bar{\dot{u}}_{et}$  повреждаемости элемента, находящегося в нагруженном состоянии, которая входит в уравнения (1) – (5) общей схемы процесса формирования его отказа, можно использовать зависимость В.В Федорова, построенную им в работе [8] с использованием термодинамического критерия длительной прочности. В общем виде это уравнение представляет собой некоторую функцию вида:

$$\bar{\dot{u}}_{et} = f(\sigma, T, u_{et}, t, \dots). \quad (6)$$

При выполнении инженерных расчетов используем один из упрощенных вариантов этой зависимости для определения постоянной во времени величины  $\bar{\dot{u}}_{et} = \bar{\dot{u}}_e$  [8]:

$$\bar{\dot{u}}_e = M_R^2 \cdot k_\sigma^2 \cdot \sigma^2 \cdot A_0 / (6 \cdot G \cdot v), \quad (6.a)$$

где  $M_R^2 = ((1+r)^2 + (1-r)^2) / 4$  – коэффициент эквивалентности нестационарного напряженного состояния (перевода нестационарного напряженного состояния с коэффициентом асимметрии  $r = \sigma_{\min} / \sigma_{\max}$  в эквивалентное стационарное состояние с напряжением  $\sigma = \sigma_a$ );

$\sigma_{\min}$ ,  $\sigma_{\max}$ ,  $\sigma_a$  – минимальное, максимальное и амплитудное напряжение цикла;

$k_{\sigma} = 1 / (6,47 \cdot 10^{-6} \cdot HV + 0,12 \cdot 10^{-6})$  – коэффициент перенапряжения межатомных связей;

$G$  и  $v$  – модуль сдвига и коэффициент неравномерности распределения внутренней энергии по объему нагруженной детали, значение которого выбирается по рекомендациям работы [8].

Коэффициент  $A_0$  влияния шаровой части тензора напряжений на энергию активации разрушения межатомных связей согласно [8]:

$$A_0 = \frac{v \cdot U(\sigma, T)}{h \cdot N_0} \exp \left[ -\frac{U(\sigma, T)}{R \cdot T} \right], \quad (6.6)$$

где  $h$  – постоянная Планка;  $N_0$  – число Авогадро;  $R$  – универсальная газовая постоянная;

$U(\sigma, T)$  – энергия активации процесса разрушения межатомных связей при данном напряжении  $\sigma$  и температуре  $T$ :

$$U(\sigma_a, T) = U_0 - \Delta U(T) - (M_R^2 \cdot k_{\sigma}^2 / (18 \cdot v \cdot K)) \sigma^2, \quad (6.в)$$

$U_0$  – свободная энергия активации процесса при  $T = 0$  и  $\sigma = 0$ ;

$\Delta U(T) = \frac{3}{2} \cdot \alpha_0 \cdot K^{-1} \cdot T$  – доля энергии активации, определяемая температурой;

$K = E / (3 \cdot (1 - 2 \cdot \mu))$  – коэффициент всестороннего сжатия материала;

$\alpha_0$ ,  $\mu$ ,  $E$  – коэффициент линейного теплового расширения, коэффициент Пуассона и модуль упругости материала.

Совокупность уравнений (6.а-в) представляет собой математическую модель процесса стационарной повреждаемости элементов машин и конструкций, в которых под действием внешних нагрузок и постоянной температуры  $T$  возникают внутренние статические или динамические напряжения  $\sigma$ .

Для стационарного процесса повреждаемости нагруженного элемента (с постоянной скоростью  $\bar{u}_{et} = \bar{u}_e$ , определяемой выражениями (6.а-в)), среднее значение запаса надежности на любой момент времени  $t$  определяется по упрощенному выражению (3):

$$n_t = u_{e*} / \bar{u}_{et} = u_{e*} / (\bar{u}_{e0} + \bar{u}_e \cdot t), \quad (3.а)$$

а предельный ресурс – решением упрощенного выражения (5) относительно  $t = \bar{t}_{np}$  в виде:

$$t_{np} = (u_{e*} - \bar{u}_{e0}) / \bar{u}_e. \quad (5.а)$$

Совокупность уравнений (3.а), (5.а) – (6.а-в) представляет собой физико-вероятностную модель процесса формирования постепенных отказов элементов машин, в которых под действием внешних нагрузок и постоянной температуры  $T$  действуют внутренние статические или динамические напряжения  $\sigma$ .

Последовательность математических операций, построенная на основе этой модели для оценки ожидаемого среднего ресурса  $\bar{t}_{np}$ , определяет методику прогнозирования их долговечности и является теоретическим обоснованием известного экспериментального уравнения С.Н. Журкова [6, 7].



Пример реализации предложенной методики показан на рис. 1. На нем представлена графическая интерпретация решения уравнения (5.а), с учетом (6.а-в) для стержня из стали 25 с заданными согласно [8] физико-механическими характеристиками, подвергнутого статическому одноосному растяжению при различных температурах. В частности, при  $\sigma = 125 \text{ МПа}$  и температуре  $T = 40^\circ \text{C}$  его прогнозируемая предельная продолжительность – средний предельный ресурс («время жизни») в данных условиях, составляет  $\bar{t}_{\text{пр}} = 2,26 \text{ мес.}$

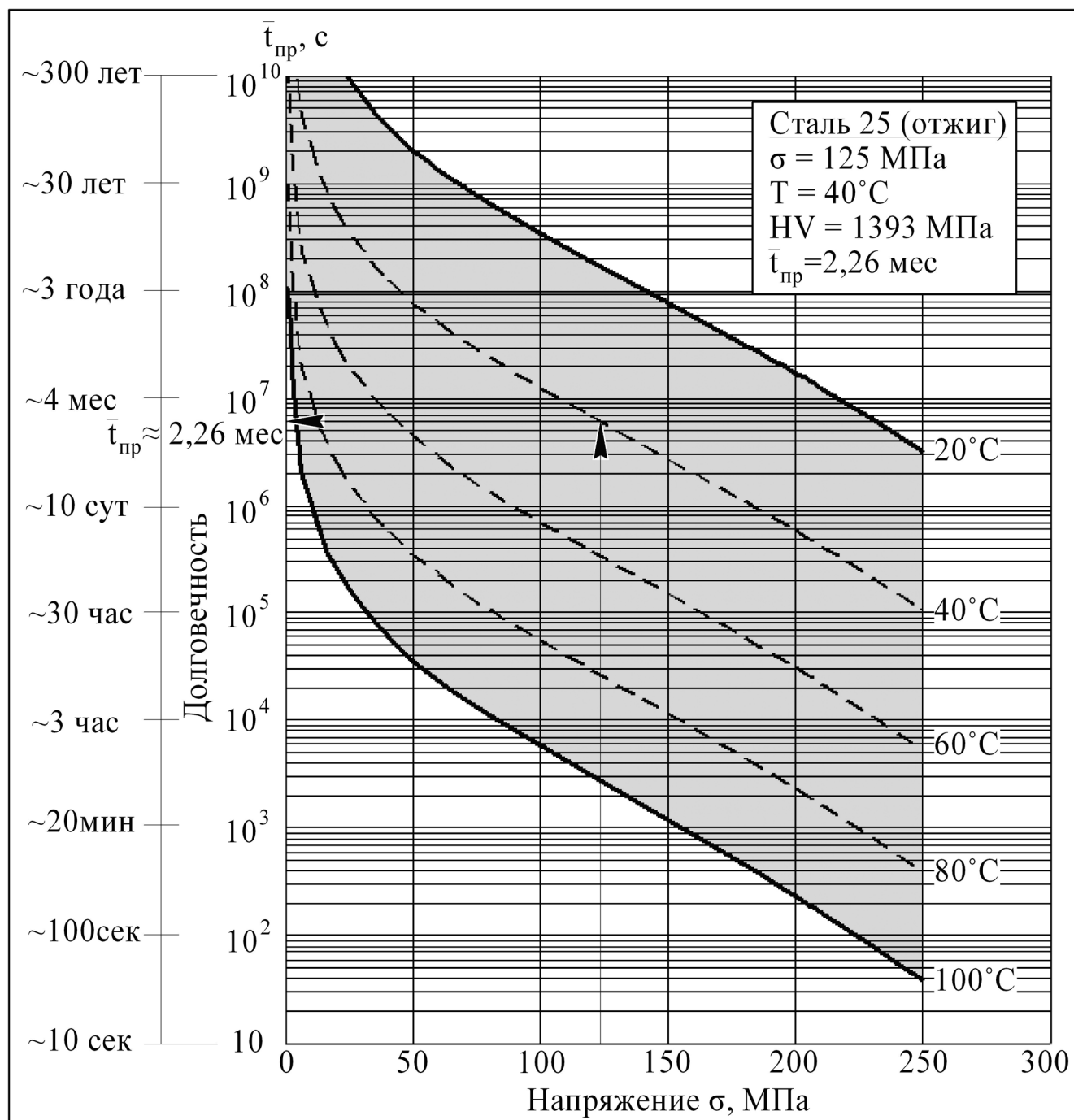


Рис. 1. Номограмма для оценки долговечности нагруженных элементов

Предложенный подход, на наш взгляд, позволяет прогнозировать долговечность различных нагруженных деталей по расчетным значениям максимальных напряжений  $\sigma$ , температуры  $T$  и физико-механических характеристик материала, а также анализировать возможные способы повышения их ресурса на стадии проектирования и эксплуатации. Например, из номограммы видно, что долговечность стержня может быть существенно повышена снижением его температуры, изменением физико-механических характеристик, а также других параметров, входящих в уравнения (5.а) – (6.а-в).

## Литература

1. Машиностроение. Энциклопедия в сорока томах. Ред. совет: **К.В. Фролов** (пред.) и др. М.: МЗ8 Машиностроение. Надежность машин. Т.IV-3/**В.В. Ключев, В.В. Болотин** и др.; 2003. – 592с.
2. **Проников А.С.** Параметрическая надежность машин. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. – 560с.
3. Новый энциклопедический словарь. – М.: Большая Российская энциклопедия: РИПОЛ классик, 2008.-1456с.
4. **Булыко А.Н.** Современный словарь иностранных слов. – М.: «Мартин», 2005. – 848с.
5. **Анцупов А.В., Анцупов А.В.(мл.), Анцупов В.П.** Методология прогнозирования надежности трибосопряжений // Трение и смазка в машинах и механизмах. -2012. -№2. – С.3-9.
6. **Журков С.Н., Нурзуллаев Б.Н.** Временная зависимость прочности при различных режимах нагружения // Журнал технической физики. 1953, вып.10. – С.1677-1689.
7. **Регель В.Р., Слуцкер А.И., Томашевский Э.Е.** Кинетическая природа прочности твердых тел. – Главная редакция физико-математической литературы изд-ва «Наука», 1974.- 560с.
8. **Федоров В.В.** Кинетика повреждаемости и разрушения твердых тел. – Ташкент.: Издательство «Фан» УзССР, 1985.- 165с.

**Antsupov A.V., Antsupov A.V. (jr), Antsupov V.P.**

## **METHODOLOGY OF MACHINE ELEMENTS' RELIABILITY PREDICTION BY MEANS OF VARIOUS CRITERIA**

*The paper offers a general methodological approach to reliability estimation of loaded elements of mechanical systems at the design stage in the form of sequence of construction procedure stages of a physical and probabilistic model for generating process of their parametrical failures due to various criteria. The methodology of durability prediction of parts by criterion of kinetic strength is presented and the example of its realization is shown.*

**Keywords:** methodology, prediction, reliability, durability, failure, damageability,  $\gamma$ -percentile life.

One of the most important problems of the reliability theory is behavior prediction (change of states) of mechanical systems' components and units in assumed conditions of external loading when parameters of their reliability and durability is possible to estimate with necessary degree of validity at the design stage. The basic method of prediction is mathematical modeling. In this case the estimation of system elements' behavior and change of their parameters at the future operation is carried out on dynamic, physical and probabilistic models [1, 2].

This paper defines the universal methodological approach to reliability prediction of mechanical system elements on the basis of the analysis of known models for estimation of the reliability of technical systems. The basic concepts of technical diagnostics (GOST 20911-89), reliability theory (GOST 27.002-89) as well as the probability theory [1, 2] are used in this study for solving the stated problem.

Understanding "methodology" as the doctrine, set of methodical methods, rules or principles according to which process of knowledge of objective natural phenomena is carried out [3, 4] (in these paper an objective natural phenomenon is considered as the objective process of failure generation of technical products at their damageability (degradation) in the field of external influences), the offered approach is represented as sequence of interconnected operations.

In general the approach can be stated as sequence of logic procedure stages for estimation of parameters of reliability and durability. This is the process of physical and mathematical model construction by various criteria for parametric reliability of both operating and newly designed technical objects.

Here it is stated in the probability form and represents package of seven consecutive stages [5].

## I. The choice of base parameter of an object state

Parameter  $X_t$  (as a random variable) is selected for product type being under development according to the standard (GOST 20911-89) definition of the concept "object state". Change of parameter  $X_t$  simulates product behavior (change of states) during the whole operation time in known conditions of external influence.

## II. Formulation of an object state equation

Derivation or choice of random function that is the dependence describing increasing (+) or decreasing (-) change of parameter  $X_t$  in time and modeling state change of a product at its ageing (degradation) while in service:

$$X_t = X_0 \pm \int_0^t \dot{X}_t \cdot dt, \quad (I)$$

where  $X_0$  is the distribution of parameter  $X_t$  during time point  $T = t_0$ , describing initial state of an object;

$\dot{X}_t = dX_t / dt$  is the current distribution of random variable of rate of object damageability during the time point  $T = t$ .

If the random variable of rate of object damageability does not change in time, then  $\dot{X}_t = \dot{X} = \text{const}$  and therefore the expression (I) can be written down in the form of:

$$X_t = X_0 \pm \dot{X} \cdot t. \quad (I.a)$$

The equation (I) models a process of object degradation in time.

## III. Formulation of condition of object operability

In conformity with the standard (GOST 27.002-89) definition "object operability", its condition of operability mathematically is formulated in the form of one of possible inequalities:

$$X_t = X_0 + \int_0^t \dot{X}_t \cdot dt < x_{np} \text{ or } X_t = X_0 - \int_0^t \dot{X}_t \cdot dt > x_{np}, \quad (II)$$

where  $x_{np}$  is the limiting value of parameter  $X_t$  specified in normative-technical documentation (NTD) or set according to operating experience of similar objects.

If random variables in the expression (I) are distributed under the normal law, and  $\dot{X}_t = \dot{X} = \text{const}$ , then the conditions of operability (II) can be written down in the form of:

$$X_t = X_0 + \dot{X} \cdot t < x_{np} \text{ and } X_t = X_0 - \dot{X} \cdot t > x_{np}. \quad (II.a)$$

Aligning and normalizing quantities  $X_t$  and  $x_{np}$ , inequalities (II.a) can be written down with use of corresponding fractiles in the form of:

$$U_t < u_{np(t)} \text{ or } U_t > u_{np(t)}. \quad (II.6)$$

Developing the current value of reciprocal normal rated distribution (NRD) of the parameter, it is possible to represent the conditions (II.6) in the following form:

$$\frac{X_t - (\bar{x}_0 + \bar{\dot{x}} \cdot t)}{\sqrt{\sigma_{x0}^2 + \sigma_{\dot{x}}^2 \cdot t^2}} > u_{np(t)} \text{ or } \frac{X_t - (\bar{x}_0 - \bar{\dot{x}} \cdot t)}{\sqrt{\sigma_{x0}^2 + \sigma_{\dot{x}}^2 \cdot t^2}} < u_{np(t)}, \quad (\text{II.B})$$

where  $u_{np(t)} = \frac{x_{np} - (\bar{x}_0 \pm \bar{\dot{x}} \cdot t)}{\sqrt{\sigma_{x0}^2 + \sigma_{\dot{x}}^2 \cdot t^2}}$  is the current limiting value of fractile NRD of random variable  $X_t = x_{np}$ ;

$\bar{x}_0 = (x_{0\max} + x_{0\min}) / 2$ ;  $\sigma_{x0} = (x_{0\max} - x_{0\min}) / 6$  are numerical characteristics (mean and standard) of random parameter  $X_t = X_0$  of tribological conjunction condition for the initial time point  $T = t_0$ ;  $x_{0\max}$ ,  $x_{0\min}$  are the maximal and minimal values of object parameter  $X_0$ , set as initial condition;  $\bar{\dot{x}}$  and  $\sigma_{\dot{x}}$  are numerical characteristics of random parameter  $\dot{X}$ .

The equations (II) reflect area of all possible states of object operability.

#### IV. Derivation of equations for estimation of object reliability parameters.

With use of the basic concept of the probability theory – “distribution function”, dependences for estimation of probability of object operation reliability, i.e. probabilities of conditions' fulfillment of operability (II) for any fixed time point of the future operation are formulated:

$$\begin{aligned} P(t) &= P(X_t < x_{np}) = P\left(X_0 + \int_0^t \dot{X}_t \cdot dt < x_{np}\right) = F(x_{np}) \\ &\text{or} \\ P(t) &= P(X_t > x_{np}) = 1 - P\left(X_0 - \int_0^t \dot{X}_t \cdot dt < x_{np}\right) = 1 - F(x_{np}). \end{aligned} \quad (\text{III})$$

If the normal distribution of parameter  $\dot{X}_t$  is invariable in time ( $\dot{X}_t = \dot{X} = \text{const}$ ), the basic parameter of reliability is expressed with the help of normal rated distribution (NRD) function  $F(u_{np(t)}) = F_t(x_{np})$  or Laplace function  $\Phi(u_{np(t)})$ :

$$\begin{aligned} P(t) &= P(X_t < x_{np}) = F(u_{np(t)}) = \Phi(u_{np(t)}) = \Phi\left(\frac{x_{np} - (\bar{x}_0 + \bar{\dot{x}} \cdot t)}{\sqrt{\sigma_{x0}^2 + \sigma_{\dot{x}}^2 \cdot t^2}}\right) \\ &\text{or} \\ P(t) &= P(X_t > x_{np}) = 1 - F(u_{np(t)}) = 1 - \Phi(u_{np(t)}) = 1 - \Phi\left(\frac{x_{np} - (\bar{x}_0 - \bar{\dot{x}} \cdot t)}{\sqrt{\sigma_{x0}^2 + \sigma_{\dot{x}}^2 \cdot t^2}}\right). \end{aligned} \quad (\text{III.a})$$

The equations (III.a) define the law of object reliability in integral (or differential  $f(t) = -dP(t)/dt$ ) form – the law of generation of gradual failures of object at solving direct problem in the reliability theory. According to the expression [2], it is asymmetric and does not conform to normal distribution.

## V. Formulation of the equation of object transition into marginal state (state of parametrical failure)

In conformity with the standard (GOST 27.002-89) definitions “marginal state” and “parametrical failure”, conditions of conjugation transition into the state of parametrical failure in the form of obtaining limiting value by parameter  $X_t$  are formulated:

$$X_t = X_0 \pm \int_0^t \dot{X}_t \cdot dt = x_{np}. \quad (IV)$$

If normal distribution of parameter  $\dot{X}_t$  is invariable in time that is  $\dot{X}_t = \dot{X} = const$ , then the expressions (IV) look like:

$$\frac{X_t - (\bar{x}_0 + \bar{\dot{x}} \cdot t)}{\sqrt{\sigma_{x0}^2 + \sigma_{\dot{x}}^2 \cdot t^2}} = u_{np(t)} \text{ or } \frac{X_t - (\bar{x}_0 - \bar{\dot{x}} \cdot t)}{\sqrt{\sigma_{x0}^2 + \sigma_{\dot{x}}^2 \cdot t^2}} = u_{np(t)}. \quad (IV.a)$$

The equations (IV) reflect the area of all possible marginal states of object.

## VI. Derivation of equations for estimation of durability parameters (life-time characteristics) of object

According to the definition of  $\gamma$ -percentile life  $t_\gamma$  under GOST 27.002-89, dependences for its estimation are derived by solving the equation (IV) relating  $t = t_\gamma$  for the specified admissible value of reliability probability  $[P(t)] = \gamma$  and a corresponding value of fractile  $[u_{np(\gamma)}]$  distributions of random variable  $X_t$  under the known law. In general this dependence can be presented by some function:

$$t_\gamma = f(\bar{x}_0, \sigma_{x0}, \bar{\dot{x}}, \sigma_{\dot{x}}, [u_{np(\gamma)}]). \quad (V)$$

If the normal distribution of parameter  $\dot{X}_t$  is invariable in time that is  $\dot{X}_t = \dot{X} = const$ , then the  $\gamma$ -percentile life is defined by solving the equations (IV.a) relating  $t = t_\gamma$  by substitution in it  $X_t = x_{np}$  and  $u_{np(t)} = [u_{np(\gamma)}]$  in the following form:

$$t_\gamma = \frac{(\pm \bar{\dot{x}}) \cdot \Delta \bar{x}_{np} - \sqrt{(\Delta \bar{x}_{np} \cdot \bar{\dot{x}})^2 - ([u_{np(\gamma)}]^2 \cdot \sigma_{\dot{x}}^2 - \bar{\dot{x}}^2) \cdot ([u_{np(\gamma)}]^2 \cdot \sigma_{x0}^2 - \Delta \bar{x}_{np}^2)}}{\bar{\dot{x}}^2 - [u_{np(\gamma)}]^2 \cdot \sigma_{\dot{x}}^2}, \quad (V.a)$$

where the value  $[u_{np(\gamma)}]$  is defined by the specified admissible value of reliability probability  $[P(t)] = \gamma$ , and the quantity  $\Delta \bar{x}_{np} = x_{np} - \bar{x}_0$  is the expectation estimation of limiting change  $\Delta X_t$  of parameter  $X_t$ .

## VII. Derivation of kinetic equation of object damageability

On the basis of any theory, concept or experimental researches, the kinetic equation is deduced for object damageability rate estimation  $\dot{X}_t$  depending on its geometrical and microgeometrical  $d_i, \Delta_t$  characteristics, properties  $\sigma_i$  of material, force and kinematic parameters,  $F, V$  external impacts, time  $t$  and other factors.

In general this equation can be presented in the form of some random function.

The condition (VI) is the kinetic equation of damageability of object.

$$\dot{X}_t = f(d_i, \Delta_t, F, V, \sigma_i, t, \dots). \quad (\text{VI})$$

The methodological approach stated above (I) – (VI) can be formulated in the form of individual methodology of reliability estimation (prediction) of specific groups of technical objects according to one of possible criteria – conditions (II) of reliability [1, 2]:

- Static or kinetic durability;
- Wear resistances;
- Rigidity;
- Bearing ability;
- Heat resistance, etc.

At the chosen parameter  $X_t$  of specific product (component, unit) state and at well-known following data:

- about the law of its distribution;
  - about the boundary conditions describing the scheme of object loading, its property and an initial state in expected conditions of operation;
  - about the equation (VI) and its damageability for estimation of  $\dot{X}_t$ ,
- the specified sequence of stages degenerates into sequence of operations (probabilistic technique) for quantitative estimation of reliability parameters  $P(t) = P(X_t < x_{np})$  or  $P(t) = P(X_t > x_{np})$  and durability parameters  $t_\gamma$  of investigated object or at its designing, or at operation.

In particular, in the study [5] the given approach is realized in the form of methodology of prediction of parametrical reliability of the big group of objects – “stationary” tribological assemblies, by criterion of wear resistance of their elements.

Below the methodology of reliability prediction of other group of objects – the loaded elements of machines and constructions has been formulated on the basis of the offered approach by criterion of kinetic durability.

Nowadays, the problem of durability of solids under loading is examined using the kinetic approach [6-8]. From this point of view a destruction process is represented as developing in time process of damages' accumulation of material structure. When material structure current density of defects in any local volume (its damageability) achieves limit value, a microcrack occurs which propagates with the speed of sound on the most loaded volumes of the whole material and that leads to its break into parts (destruction). Damage level of local volumes' structures of a component material during any fixed time point  $t$  is quantitatively estimated by density value of potential energy of defects  $u_e(t) = u_{e_t}$  which is defined by conditions of external loading and properties of material [8].

Considering the above, methodology stages for prediction of reliability and durability parameters of loaded components can be formulated, according to (I) – (VI), in the form of sequence of the following operations.



At the first stage we accept density of potential energy of defects  $u_{et}$  as parameter  $X_t$  of a component state in which under effects of external loadings at temperature  $T$ , there are internal stresses  $\sigma$ . Density of potential energy of defects  $u_{et}$  characterizes the current level of structure damages of local volumes of a component's material [8]. In addition to that, distribution of a random variable  $X_t = u_{et}$  at any time point  $t$  as the parameter depending on a set of independent random factors, we shall assume as normal, according to the central limit theorem of probability theory [2]. Besides for simplification of mathematical expressions, we shall operate with its mean value  $\bar{u}_{et}$ .

At the second stage we shall formulate the equation of the loaded element states:

$$\bar{u}_{et} = \bar{u}_{e0} + \int_0^t \bar{\dot{u}}_{et} \cdot dt. \quad (1)$$

where  $\bar{u}_{e0}$  is the mean density of the potential (latent) energy of a component material in initial state (at  $t = 0$ ) which, according to [8], is possible to define in function of mean value of Vickers hardness  $HV$ :

$$\bar{u}_{e0} = \frac{((0,071 \cdot HV)^{1,2})^2}{6 \cdot G(T) \cdot (6,47 \cdot 10^{-6} \cdot HV + 0,12 \cdot 10^{-2})^2}; \quad (1.a)$$

where  $\bar{\dot{u}}_{et} = d\bar{u}_{et} / dt$  is the average rate of damageability (accumulation of damages) of component material structure during the moment in time point  $t$ .

At the third stage we shall formulate operability condition of the loaded component:

$$\bar{u}_{et} = \bar{u}_{e0} + \int_0^t \bar{\dot{u}}_{et} \cdot dt < u_{e*}, \quad (2)$$

where  $u_{e*} = u_* - u_T$  is the critical density of defects' energy of structure in local volumes of the loaded component material [8];

$u_*$  is the critical density of internal energy (critical energy intensity) of material, equal to enthalpy of its melting in solid  $\Delta H_{TB}$  or liquid  $\Delta H_S$  state;

$u_T = \int_0^T \rho \cdot c dT$  is a thermal component of internal energy density of material of the loaded component at the set temperature  $T$ ;  $\rho$ ,  $c$  are the density and thermal capacity of a component's material.

At the fourth stage we shall write down the expression for reliability estimation of the loaded element during time point  $t$ , using safety margin (safety factor) as a parameter, calculated on mean value  $\bar{u}_{et}$  of state parameter [1, 2]:

$$n_t = u_{e*} / \bar{u}_{et} = u_{e*} / (\bar{u}_{e0} + \int_0^t \bar{\dot{u}}_{et} \cdot dt). \quad (3)$$

At the fifth stage we shall formulate the equation of transition of the loaded component into limit state (state of parametrical failure):

$$\bar{u}_{et} = \bar{u}_{e0} + \int_0^t \bar{\dot{u}}_{et} \cdot dt = u_{e*}. \quad (4)$$

At the sixth stage, using expression (5), we formulate the equation, whose solution relating to  $t = \bar{t}_{np}$ , will allow to define average limiting life-time to failure (destruction) of an element:

$$\int_0^{\bar{t}_{np}} \bar{\dot{u}}_{et} \cdot dt = u_{e*} - \bar{u}_{e0}. \quad (5)$$

At the seventh stage it is possible to use V.V. Feodorov's dependence constructed by him in work [8] with use of thermodynamic criterion of long-term durability. This dependence is used as the kinetic equation of damageability for estimation of average rate  $\bar{u}_{et}$  of damageability of the element which is being under loaded state. This rate is a member of the equations (1) – (5) of general layout of process of the element failure formation. In general this equation represents some function of the following form:

$$\bar{\dot{u}}_{et} = f(\sigma, T, u_{et}, t, \dots). \quad (6)$$

At performance of engineering calculations one of the simplified variants of this dependence for definition of time constant value  $\bar{\dot{u}}_{et} = \bar{\dot{u}}_e$  [8] is used:

$$\bar{\dot{u}}_e = M_R^2 \cdot k_\sigma^2 \cdot \sigma^2 \cdot A_0 / (6 \cdot G \cdot v), \quad (6.a)$$

where  $M_R^2 = ((1+r)^2 + (1-r)^2)/4$  is a factor of equivalence of the non-stationary stress state (transfer of the non-stationary stress state with factor of asymmetry  $r = \sigma_{\min}/\sigma_{\max}$  into equivalent stationary state with stress  $\sigma = \sigma_a$ );  $\sigma_{\min}$ ,  $\sigma_{\max}$ ,  $\sigma_a$  are minimal, maximal and amplitude stress of a cycle;

$k_\sigma = 1/(6,47 \cdot 10^{-6} \cdot HV + 0,12 \cdot 10^{-6})$  is a factor of overstress of interatomic connections;

$G$  and  $v$  are shear modulus and factor of non-uniformity of internal energy distribution over volume of the loaded component which value is selected under recommendations of work [8].

Factor  $A_0$  of influence of spherical part of stress tensor on energy of activation of interatomic connections' destruction according to [8]:

$$A_0 = \frac{v \cdot U(\sigma, T)}{h \cdot N_0} \exp \left[ -\frac{U(\sigma, T)}{R \cdot T} \right], \quad (6.b)$$

where  $h$  is Planck's constant;  $N_0$  is Avogadro number;  $R$  is universal gas constant;

$U(\sigma, T)$  is the energy of activation of interatomic connections' destruction at the given stress  $\sigma$  and temperature  $T$ :

$$U(\sigma_a, T) = U_0 - \Delta U(T) - \left( M_R^2 \cdot k_\sigma^2 / (18 \cdot \nu \cdot K) \right) \cdot \sigma^2, \quad (6.B)$$

$U_0$  – free energy of process activation at  $T = 0$  and  $\sigma = 0$ ;

$\Delta U(T) = \frac{3}{2} \cdot \alpha_0 \cdot K^{-1} \cdot T$  – a share of activation energy, defined by temperature;

$K = E / (3 \cdot (1 - 2 \cdot \mu))$  – Factor of all-round a material compression;

$\alpha_0$ ,  $\mu$ ,  $E$  – linear thermal expansion coefficient; Poisson's ratio and modulus of elasticity of material.

Set of the equations (6.a-b) represents a mathematical model of process of stationary damageability of elements of machines and constructions in which under effects of external loadings and constant temperature  $T$  there are internal static or dynamic stresses  $\sigma$ .

For stationary process of damageability of the loaded element (with constant rate  $\bar{u}_{et} = \bar{u}_e$ , defined by expressions (6.a-b), average value of reliability margin for any time point  $t$  is defined under on the simplified expression (3):

$$n_t = u_{e*} / \bar{u}_{et} = u_{e*} / (\bar{u}_{e0} + \bar{u}_e \cdot t). \quad (3.a),$$

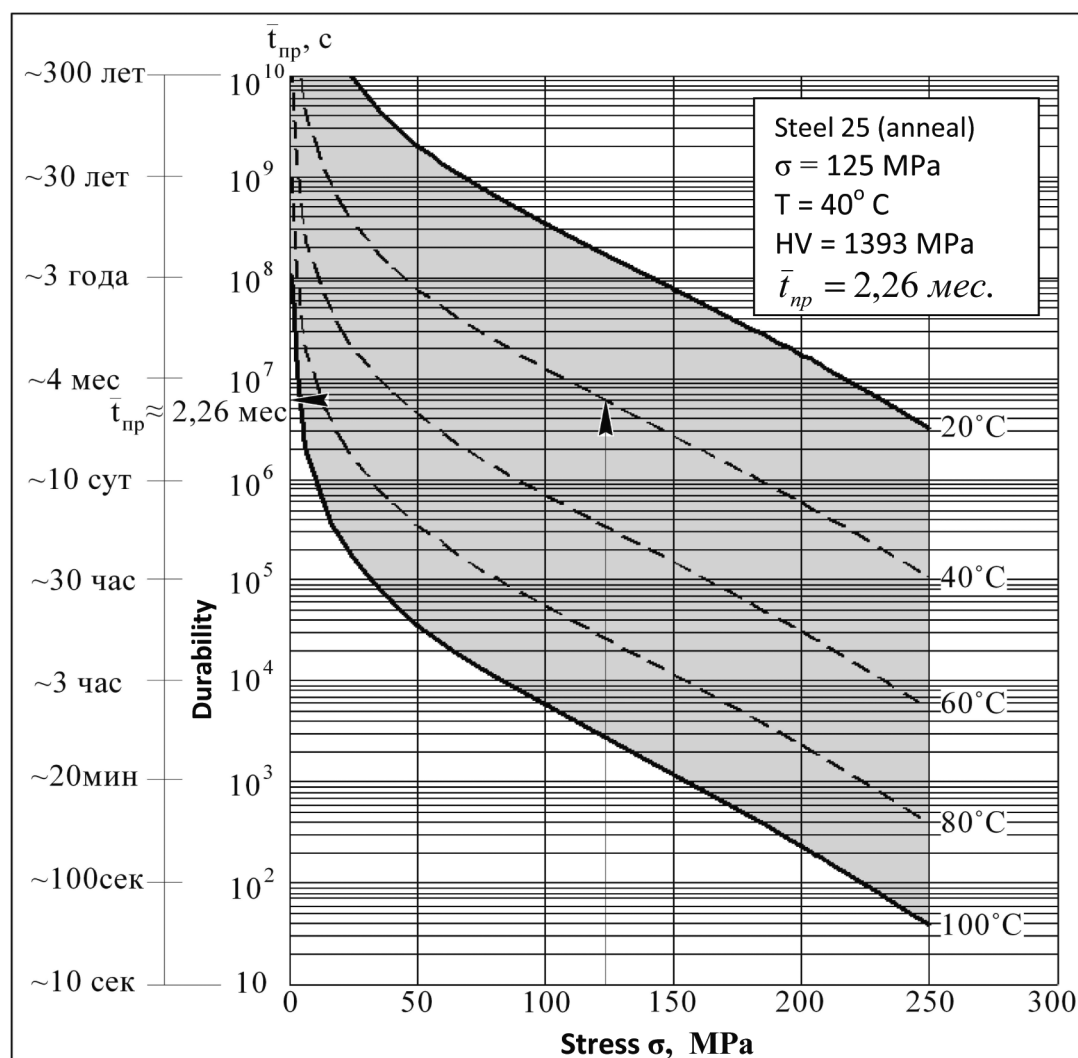


Fig. 1. Nomograph for estimation of durability of loaded elements

and limiting life-time is determined by solving of the simplified expression (5) in relation of  $t = \bar{t}_{np}$  in the following form:

$$t_{np} = (u_{e*} - \bar{u}_{e0}) / \bar{u}_e. \quad (5.a)$$

Set of the equations (3.a), (5.a) – (6.a-b) represents a physical and probabilistic model of formation process of gradual failures of machines' components in which under effects of external loadings and constant temperature  $T$  internal static or dynamic stresses  $\sigma$  take place.

The sequence of mathematical operations constructed on the basis of this model for an estimation of the expected average life-time  $\bar{t}_{np}$  defines the technique of prediction of their durability and is a theoretical justification of a known S.N. Zhurkov experimental equation [6, 7].

The example of realization of the offered technique is shown in Fig.1. The figure shows a graphic interpretation of the solution of equation (5.a), in view of (6.a-b), for a 25 steel rod with physical and mathematical characteristics set according to [8], subjected to static one-axle stretching at various temperatures. In particular, at  $\sigma = 125 \text{ MPa}$  and temperature  $T = 40^\circ \text{C}$  its predicted limiting duration, i.e. an average limiting resource ("life time") in the given conditions, makes up  $\bar{t}_{np} = 2,26 \text{ mec}$ .

The offered approach, in our opinion, allows to predict durability of the various loaded parts on values of maximal pressure  $\sigma$ , temperatures  $T$  and physical and mechanical characteristics of material, and as well as to analyze possible ways of increase of their resource at the design and operational stages. For example, the nomograph shows that the durability of a rod can be essentially raised by reduction in its temperature, change of physical and mechanical characteristics, and also other parameters which are part of equations (5.a) – (6.a-b).

## References

1. Mechanical engineering. Encyclopedia in forty volumes. Ed. by K.V.Frolov et al. M.: M38 Mechanical engineering. Reliability of equipment. T.IV-3/B.B. Klyuyev, V.V.Bolotin, etc.; 2003. – p.592.
2. **Pronikov A.S.** Parametrical reliability of equipment. – M.: Publishing house of MGTU N.E.Bauman, 2002. – p.560.
3. New encyclopedic dictionary.-M.: Bolshaya Russian encyclopedia: RIPOl classic, 2008.-p.1456.
4. **Bulyko A.N.** Modern dictionary of foreign words. – M.: "Martin", 2005. – p.848.
5. **Antsupov A.V., Antsupov A.V. (jr.), Antsupov V.P.** Methodology of reliability prediction of tribologic conjunctions // Friction and greasing in machines and mechanisms.-2012. – №2. – Pp..3-9.
6. **Zhurkov S.N., Nurzullaev B.N.** Time dependence of durability at various load modes // Journal of technical physics. 1953, Issue.10. – Pp..1677-1689.
7. **Regel V.R., Slutsker A.I., Tomashevsky E.E.** Kinetic nature of durability of solid objects. – "Science", 1974. P.560.
8. **Feodorov V.V.** Kinetics of damageability and destructions of solid objects. – Tashkent: Publishing house "Fan" UzSSR, 1985. P.165.

**Шишкин В.В., Романов Ю.В., Стенюшкин Д.И.**

## **РАЗРАБОТКА СИСТЕМ FRACAS ДЛЯ БОРТОВОГО ОБОРУДОВАНИЯ С АВТОМАТИЗИРОВАННЫМ ОПРЕДЕЛЕНИЕМ ИСТОЧНИКОВ СИСТЕМАТИЧЕСКИХ ОТКАЗОВ**

*В статье представлена методика разработки электронной структуры бортового авиационного оборудования в аспекте обеспечения надежности на постпроизводственных этапах жизненного цикла, позволяющая повысить эффективность систем FRACAS за счет автоматизированного анализа общей причины, направленного на определение источников систематических отказов и разработку результативных корректирующих действий.*

**Ключевые слова:** электронная структура изделия, систематический отказ, источник отказа, корректирующие действия.

Современный рынок авиационной техники (АТ) характеризуется повышением требований авиакомпаний к обеспечению надежности воздушных судов (ВС) и их бортового оборудования (БО). При заключении контрактов на поставку БО для современных воздушных судов, таких, как Ан-148, SSJ-100, Ту-204СМ, МС-21, особое внимание в рамках послепродажного обслуживания уделяется программам гарантии надежности и регулярности вылета. Неспособность поставщика АТ продемонстрировать наличие ресурсов для реализации такой программы делает его продукцию неконкурентоспособной. С другой стороны, отмечается непрерывный рост сложности БО, обусловленный расширением функциональных задач и диапазона условий эксплуатации. Кроме того, сохраняется тенденция к сокращению времени, отводимого на проектирование и технологическую подготовку производства БО, что определяется ростом конкуренции на рынке поставщиков БО.

В этих условиях возникает необходимость в разработке новых методов и инструментальных средств, позволяющих:

- обеспечить эффективную реализацию программы гарантии надежности на постпроизводственных этапах и продемонстрировать потребителю АТ возможность такой реализации;
- использовать полученную в результате реализации программы информацию для проектирования и технологической подготовки новых проектов БО.

Наиболее эффективно для решения поставленной задачи могут применяться системы, реализующие анализ отчета об отказах системы и корректирующих действий (FRACAS). Это системы

замкнутого цикла, которые обычно включают следующие этапы: регистрация отказов – анализ отказов – определение необходимых корректирующих действий – оценка результативности корректирующих действий. В настоящее время на рынке программных комплексов, реализующих принцип FRACAS, представлены системы Relex FRACAS (PTC) и FRACAS FavoWeb (A.L.D.) [1, 2].

Хотя преимущества применения систем FRACAS являются очевидными, реализовать эффективную систему, гарантирующую обеспечение надежности БО на постпроизводственных этапах жизненного цикла, довольно сложно. Проблема состоит в том, что результативность корректирующих действий зависит от точности и своевременности определения причины отказа, что является трудно формализуемой задачей. Также остается трудно формализуемой задача использования полученных по результатам реальной эксплуатации данных для анализа надежности новых проектов.

В результате существующие системы представляют собой средства, позволяющие автоматизировать сбор информации об отказах и оценку надежности (количественный анализ). Определение причин отказов по данным эксплуатации и использование полученной информации в новых проектах (качественный анализ) по-прежнему представляет собой трудоемкий процесс, требующий больших затрат и постоянного участия высококвалифицированных специалистов.

Для определения критериев результативности системы FRACAS рассмотрим изменение уровня надежности БО на постпроизводственных этапах. Учитывая сложность современного БО и его жизненного цикла, в начальный период эксплуатации БО характерно наличие систематических отказов. Это приводит к снижению надежности БО в эксплуатации на некоторое значение  $\Delta R_n$ . Величина  $\Delta R_n$  зависит от количества видов дефектов, приводящих к систематическим отказам и от количества БО, выпущенного с такими дефектами.

При выявлении несоответствия требованиям к надежности БО в процессе эксплуатации проводятся корректирующие действия, направленные на изжитие причин систематических отказов. В результате по мере устранения причин систематических отказов и доработки изделий, находящихся в эксплуатации, происходит повышение надежности и доведение уровня надежности до требуе-

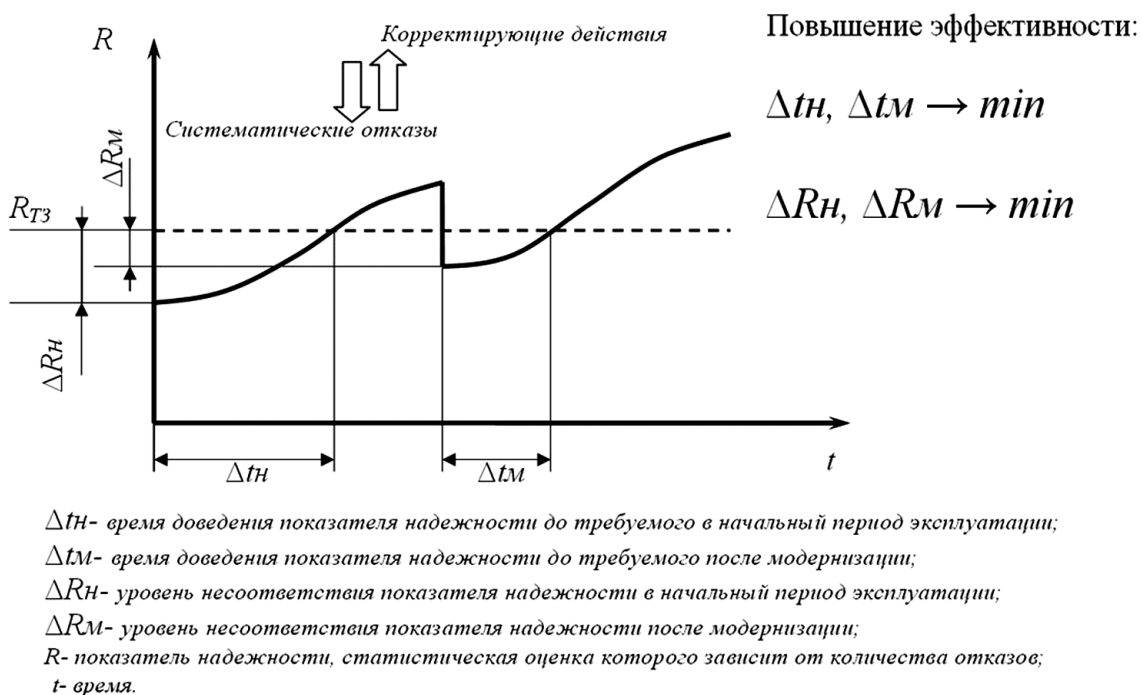


Рис. 1. Критерии эффективности обеспечения надежности БО

мого. Время доведения надежности до требуемого уровня  $\Delta t_n$  зависит от времени определения причин систематических отказов, времени разработки результативных корректирующих действий, времени определения объема коррекции и проведения доработок.

Часто в процессе эксплуатации БО проводится его модернизация, обусловленная расширением спектра функциональных задач. При проведении существенной модернизации также возможно появление систематических отказов и снижение уровня надежности на значение  $\Delta R_m$ , на доведение которого до требуемого уровня необходимо время  $\Delta t_m$ .

Таким образом, повышение эффективности обеспечения надежности БО можно охарактеризовать следующими критериями:

$$\Delta t_n, \Delta t_m \rightarrow \min; \Delta R_n, \Delta R_m \rightarrow \min.$$

Изменение уровня надежности в начальный период эксплуатации и после проведения модернизации показано на рис. 1.

Как было показано в [3], для решения указанных задач необходимо создание специализированных методов и программных модулей обработки данных, функционирующих под управлением PDM-системы. При этом необходимо решить задачу разработки электронной структуры изделия (ЭСИ) в указанном аспекте.

Для построения модели будем опираться на следующие определения, приведенные в [4].

Причина отказа – обстоятельства в ходе разработки, производства или использования, которые привели к отказу.

Систематический отказ – отказ, однозначно вызванный одной причиной, которая может быть устранена только модификацией проекта или производственного процесса, правил эксплуатации и документации.

Из определений следует, что источниками отказов являются процессы разработки, производства и эксплуатации. Источниками общей причины отказов элементов при этом являются общие реализации процессов ЖЦ.

Таким образом, содержательная часть ЭСИ, разработанной в аспекте системы FRACAS, должна, кроме данных о составе БО и связях его составных частей, содержать данные о значимых с точки зрения источника отказов процессах.

Структуру БО можно представить в виде формулы:

$$O = (K, Q, t), \quad (1)$$

где  $K$  – множество элементов системы;

$Q$  – множество связей между элементами;

$t$  – момент времени, к которому относится описание БО.

Среди всего множества элементов БО можно выделить классы эквивалентности по уровню надежности (элементы одного типа). Из множества элементов, имеющих одинаковый уровень надежности, можно выделить подмножества элементов, имеющих одинаковые источники общей причины. Таким образом, формируются варианты применения однотипных элементов БО относительно каждого источника систематических отказов.

При этом наличие систематических отказов по какому-либо источнику отказов вызывает резкое увеличение интенсивности отказа одного из вариантов применения и, как следствие, наличие неоднородности статистических оценок, что может являться критерием необходимости разработки корректирующих действий по данному процессу.

Таким образом, выражение (1) необходимо дополнить до вида

$$O = (K, Q, P, R, t), \quad (2)$$

где символ  $P$  означает параметры процессов, характеризующие элементы БО с точки зрения источников общей причины;

символ  $R$  – параметры, определяющие фактическую интенсивность отказа элемента или параметра потока отказов.

Оценка результативности корректирующих действий выполняется сравнением надежности элементов, изготовленных без учета корректирующих действий, с элементами, изготовленными с учетом корректирующих действий. Для идентификации внедренных корректирующих действий выражение (2) необходимо дополнить до вида

$$O = (K, Q, P, R, C, t), \quad (3)$$

где символ  $C$  – атрибут, определяющий признак внедренного корректирующего действия.

Таким образом, для разработки модели БО в аспекте обеспечения надежности необходимо определить:

- перечень и значения атрибутов, характеризующих структуру БО;
- перечень и значения атрибутов, характеризующих источники общей причины;
- перечень и значения атрибутов для выполнения статистических оценок;
- перечень и значения атрибутов, определяющих внедрение корректирующих действий;
- порядок изменения значений атрибутов в процессе ЖЦ.

Процессы ЖЦ БО являются объектом исследования с точки зрения формирования проектных решений при проектировании БО и разработки корректирующих действий и оценки их результативности при эксплуатации БО. В процессе ЖЦ БО формируется событийно-динамическое пространство, в котором решаются задачи:

- оценки новых проектов БО при проектировании по результатам эксплуатации изделий-аналогов;
- определения причин систематических отказов, разработки корректирующих действий и оценки их результативности.

Модель жизненного цикла БО в аспекте обеспечения надежности приведена на рис.2.

В 2011 году разработаны: База данных для экспертной системы для анализа безотказности авиационных бортовых информационных систем [5] и Экспертная система для анализа безотказности авиационных бортовых информационных систем [6].

При их разработке учтен опыт реализации программ гарантий надежности БО различного назначения, а именно: комплексных информационных систем сигнализации; систем электронной сигнализации; систем предупреждения критических режимов; комплексных систем электронной



индикации и сигнализации; систем аварийной сигнализации; систем внутрикабинного освещения; систем преобразования аналоговой и дискретной информации; систем управления общесамолетным оборудованием; систем ограничительных сигналов; систем воздушных сигналов вертолетов; бортовых информационных систем контроля; систем восприятия воздушных данных, установленных на ВС: Ту-204, Ту-214, Ту-334, Ил-96-300, Ил-96-400, Ил-76, Ил-114, Ан-148, Ка-226, Ка-31, Ка-32, Ансат и др.

Источники отказов процесса проектирования выбраны в соответствии с Руководством по оценке правильности применения электрорадиоизделий, используемым предприятиями промышленности при анализе причин отказов электрорадиоизделий в образцах аппаратуры и выработке предложений по повышению ее надежности [7], и квалификационными требованиями КТ-160D, устанавливающими условия эксплуатации и окружающей среды для бортового авиационного оборудования [8].

Источники отказов процесса производства выбраны в соответствии с базовым перечнем специальных технологических процессов (СПТП), разрабатываемым для авиационной промышленности в целом, а также перечнем СПТП, составляемым для конкретных изделий АТ [9].

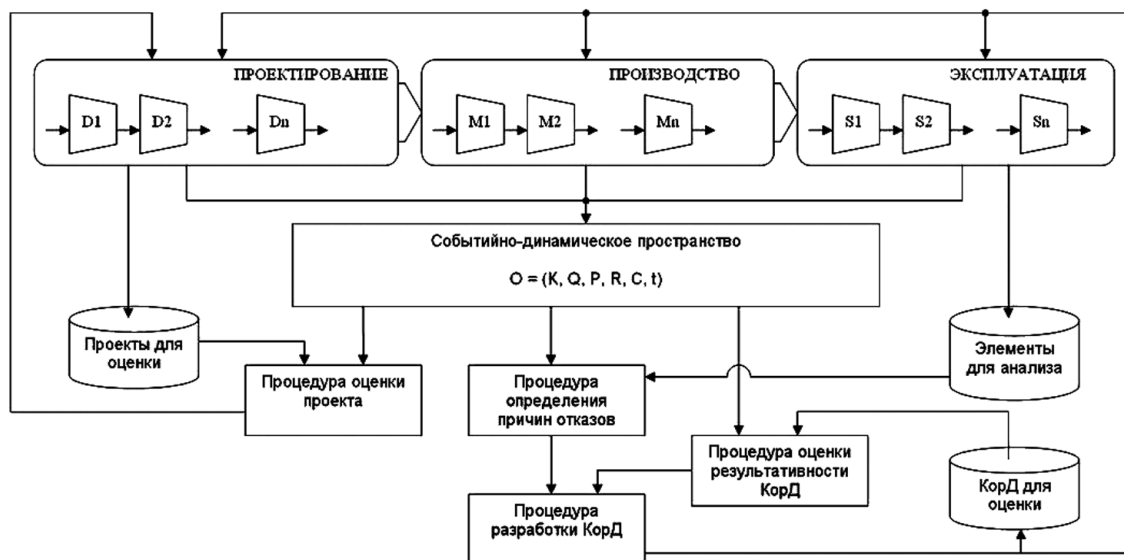


Рис. 2. Модель жизненного цикла БО в аспекте обеспечения надежности

Так как базовый перечень процессов сформирован с точки зрения предприятия-разработчика и изготовителя БО, детализация постпроизводственного этапа на процессы проводилась с меньшей степенью. При этом для модели сформированы совокупности процессов, осуществляемых в рамках одного предприятия, такие, как монтаж на ВС, эксплуатация, ремонт, которые рассматриваются как отдельные процессы.

Внешний вид интерфейсной части модуля определения источников систематических отказов и оценки результативности корректирующих действий представлен на рис. 3.

Верхняя часть экрана содержит сведения об анализируемом элементе или узле БО и рассматриваемом процессе.

В правой части экрана расположено поле вариантов применения. Варианты применения показаны в виде графа, вершины которого соответствуют анализируемому элементу, а узлы – подмножествам элементов, распределенных по источникам общей причины.

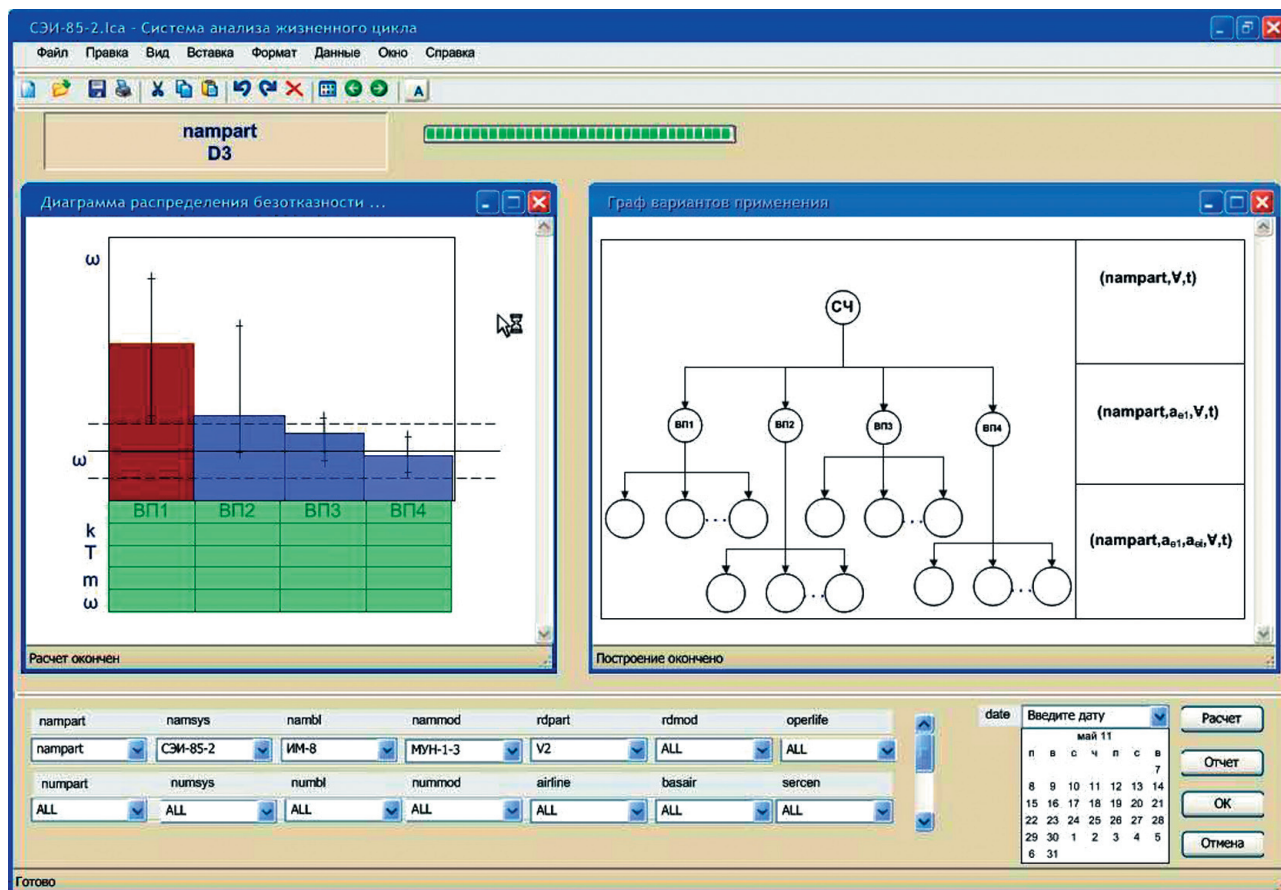


Рис. 3. Интерфейсная часть модуля определения причин систематических отказов

В левой части экрана расположено поле диаграммы. Каждый столбец диаграммы представляет собой статистическую оценку надежности одного из вариантов применения с доверительными границами показателя. Столбцы диаграммы, статистические оценки которых неоднородны, выделяются цветом.

В нижней части экрана расположен конструктор, который позволяет вносить изменения в кортежи, по которым формируются варианты применения. Это позволяет эксперту при необходимости вмешиваться в процесс анализа для реализации своих стратегий.

Также предусмотрена возможность изменения даты актуальности модели для анализа. Это позволяет анализировать динамику уровня надежности.

## Заключение

В работе разработана электронная структура БО с точки зрения анализа информации об отказах и разработки корректирующих действий и рассмотрена модель БО в аспекте системы FRACAS, позволяющая в событийно-динамическом пространстве атрибутов процессов ЖЦ решать задачи определения источников систематических отказов с последующей разработкой корректирующих действий и оценкой их результативности.

## Литература

1. [сайт]. URL: [www.relex.com/products/fracas.asp](http://www.relex.com/products/fracas.asp) (дата обращения: 12.11.2012)
2. Программный продукт FAVOWEB. Краткое описание и преимущество. Компания ALD. с. 17.
3. **Романов Ю.В.** Использование CALS – технологий для повышения эффективности процесса обеспечения безотказности бортового радиоэлектронного оборудования / Ю.В. Романов, В.В. Шишкин // Надежность. – 2009 – №4. С.36-44
4. Надежность в технике. Термины и определения: ГОСТ Р 27.002-2009. – М.: Стандартинформ, 2010. – 54 с.
5. **Шишкин В.В.** Экспертная система для анализа безотказности авиационных бортовых информационных систем / В.В. Шишкин, Ю.В. Романов, Д.И. Стенюшкин // Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ №2012610068. – М.: РОСПАТЕНТ, 10.01.2012.
6. **Шишкин В.В.** База данных для экспертной системы для анализа безотказности авиационных бортовых информационных систем. / В.В. Шишкин, Ю.В. Романов, Д.И. Стенюшкин // Свидетельство о государственной регистрации базы данных №2012620014. – М.: РОСПАТЕНТ, 10.01.2012.
7. Аппаратура, приборы, устройства и оборудование военного назначения. Руководство по оценке правильности применения электрорадиоизделий. Комплексная система контроля качества: РД В 319.01.09-94 (ред. 2-2000). Ч. 1: Общие положения. Карты рабочих режимов и условий применения электрорадиоизделий / МО РФ. – М., 2000. – 152 с.
8. Квалификационные требования. Условия эксплуатации и окружающей среды для бортового авиационного оборудования. Требования, нормы и методы испытаний: КТ-160D / АРМАК. – М., 2004. – 323 с.
9. Руководящий технический материал. Специальные технологические процессы. Требования к порядку разработки, оформлению документации при подготовке производства, изготовлении и ремонте авиационной техники: РТМ 1.4.2118-2003. – Введ. 2004-01-01. – М.: ОАО «НИАТ», 2004г.- 26 с.

**Shishkin V.V., Romanov Yu.V., Stenyushkin D.I.**

## **DEVELOPMENT OF FRACAS SYSTEMS FOR AIRBORNE EQUIPMENT WITH AUTOMATED IDENTIFICATION OF SOURCES OF SYSTEMATIC FAILURES**

*The paper presents a methodology for the development of the electronic structure of airborne avionics in the aspect of dependability assurance in the post-production stages of the life cycle, allowing increasing the efficiency of FRACAS systems by computerized analysis of common cause, aimed at identifying the sources of systematic failures and the development of effective corrective actions.*

**Keywords:** *electronic structure of a product, systematic failure, source of failures, corrective actions.*

The increased requirements of airlines for dependability assurance of aircraft (AC) and its airborne equipment (AE) define the current market of aviation technology (AT). At the placement of contracts for AE supply for modern aircrafts such as the An-148, SSJ-100, Tu-204SM, MS-21, a special focus within after-sales service is given to programs of dependability assurance and regularity of flights. Inability of an AT provider to demonstrate the availability of resources for the implementation of such a program makes its products uncompetitive. On the other hand, there is a continuous increase in the complexity of AE due to the expansion of functional tasks and the range of operating conditions.

In addition, the trend to a reduction of time allowed for the design and technological preparation of AE production is retained, which is determined by increased competition in the market of AE suppliers.

Under these conditions, there is a need to develop new methods and tools that allow:

- to ensure the effective implementation of the program to guarantee the dependability at post-production stages and to demonstrate to an AT consumer the possibility of such an implementation;
- to use the information obtained as a result of the program implementation for design and technological preparation of new AE projects.

Systems implementing the analysis of a report about system failures and corrective actions (FRACAS) can be applied as the most effective ones for the assigned task solution. These are closed-loop systems, which usually include the following stages: failure registration – failure analysis – determining the necessary corrective actions – evaluation of corrective actions' effectiveness. Currently, the market of software systems that implement the principle of FRACAS presents the systems Relex FRACAS (PTC) and FRACAS FavoWeb (ALD) [1, 2].

Although the advantages of using FRACAS systems are obvious, it is difficult to implement an effective system ensuring AE dependability at post-production stages of a life cycle. The problem is that the effectiveness of corrective actions depends on the accuracy and timeliness of determination of failure cause, and it is difficult to formalize the task. In addition, the task of using the results obtained from the use of real data to analyze the dependability of new projects is also difficult for formalization.

As a result, the existing systems represent means to automate the collection of information about failures and dependability assessment (quantitative analysis). Identification of failure causes according to the operation data and use of the obtained information in the new projects (qualitative analysis) still represents a time-consuming process, requiring costly and continuous participation of highly qualified experts.

To determine the performance criteria of FRACAS system, we shall consider the change of AE dependability level at post-production stages. Taking into account the complexity of modern AE and its life cycle, systematic failures are typical at the initial period of AE operation. This leads to reduction of AE dependability in operation by a certain value  $\Delta R_H$ . The quantity of  $\Delta R_H$  depends on the number of types of defects that lead to systematic failures and on the number of AE produced with such defects.

Corrective actions aimed at eliminating the causes of systematic failures are carried out at the detection of discrepancy in dependability of AE during its operation. As a result, under elimination of systematic failures' causes and refinement of products in use, an increase of dependability and bringing its level to the desired one take place. Time to bring dependability to the required level  $\Delta t_H$  depends on the time needed for the determination of systematic failures' causes, the time needed for development of effective corrective actions, and the time needed for determining the amount of correction and carrying out improvements.

Often during the AE operation, its modernization is carried out due to expansion of the range of functional tasks. Systematic failures' occurrence and dependability decrease on the value equal to  $\Delta R_M$  is also possible at carrying out substantial modernization and bringing it back to the required level needs time  $\Delta t_M$ .

Thus, the efficiency enhancement of AE dependability can be described by the following criteria:

$$\Delta t_H, \Delta t_M \rightarrow \min; \Delta R_H, \Delta R_M \rightarrow \min.$$

Change of dependability level at the initial period of operation and after the upgrade is shown in Fig. 1.

As shown in [3], to solve these problems, it is necessary to develop special-purpose methods and data processing software operating under the control of PDM-system. At the same time, in this aspect it is necessary to solve the problem of developing an electronic product structure (EPS).

To construct the model, we shall rely on the following definitions given in [4].

Failure cause is the circumstances in the process of development, production or use, which has led to a failure.

The systematic failure is the failure definitely caused by a cause, which can only be eliminated by modification of the project or the production process, operating rules and documentation.

From the definitions, it follows that the sources of failures are the processes of development, production and operation. Sources of common cause failures of elements in this process are the general implementations of life cycle processes.

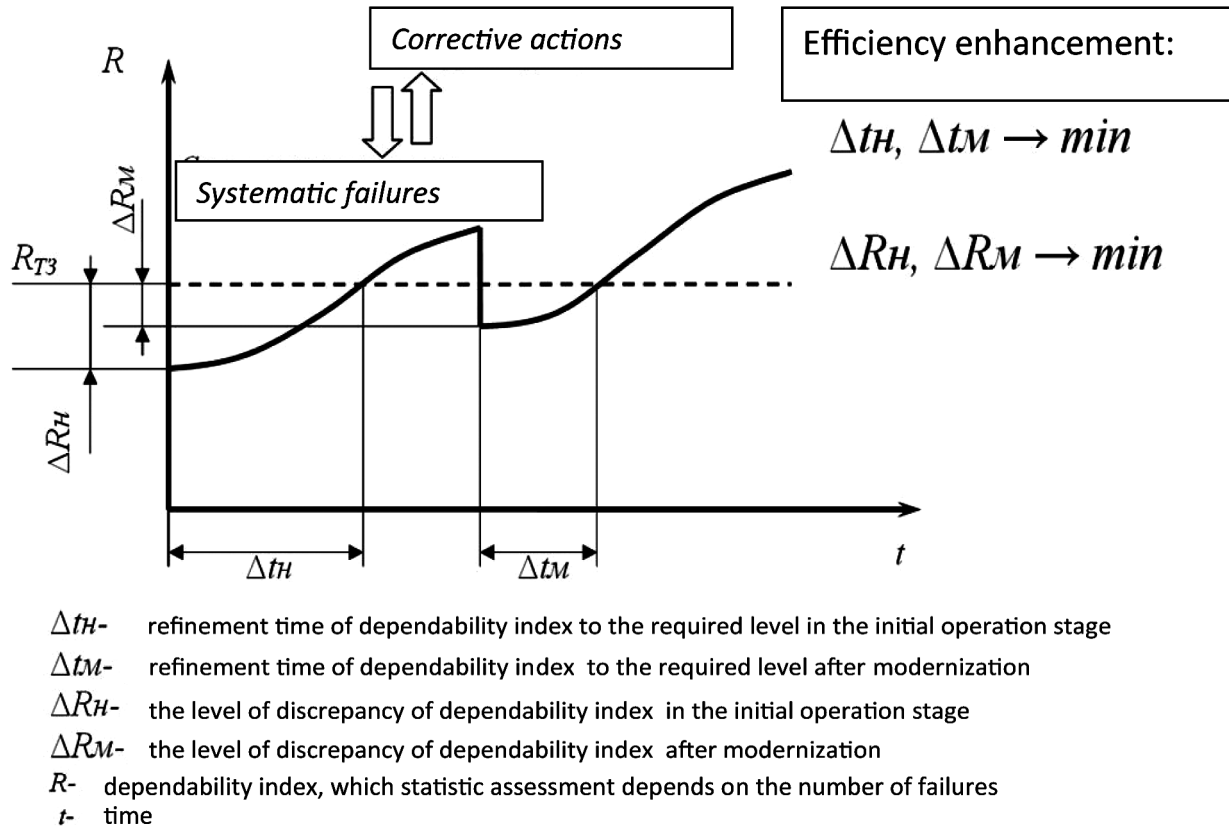


Fig. 1. Performance criteria of AE dependability

Thus, the EPS' purposeful part developed in the aspect of FRACAS system, in addition to data about AE structure and connection of its constituent parts must contain data about significant processes in terms of source of failures.

The structure of AE can be represented by the formula:

$$O = (K, Q, t), \quad (1)$$

where  $K$  is the set of elements in the system;

$Q$  is a set of connections between the system's elements;

$t$  is the time, to which the description of AE refers.

Among the total set of AE elements, it is possible to single out equivalence classes according to a dependability level (the elements of the same type). Subsets of elements having the same common cause sources can be distinguished from a set of elements having the same dependability level. Thus, alternatives of applications of the same elements in AE with respect to each source of systematic failures are generated.

At the same time, the presence of systematic faults in any source of failures causes a sharp increase of failure rate of one of the application alternatives, and consequently, the presence of statistical estimates' heterogeneity, which can be a criterion of the need for corrective actions of the given process.

Thus, the expression (1) must be completed to the following form

$$O = (K, Q, P, R, t), \quad (2)$$

where the symbol P means process parameters that describe the AE elements in terms of common cause sources, the symbol R presents the parameters defining the actual failure rate of an element or a failure stream parameter.

Evaluation of corrective actions' effectiveness is performed by comparing the dependability of components made without corrective actions, with elements made in view of the corrective actions. For the identification of implemented corrective actions, the expression (2) must be completed as to the following form

$$O = (K, Q, P, R, C, t), \quad (3)$$

where the symbol C is the attribute that defines the indicator of implementation of corrective actions. Thus, to develop an AE model in the aspect of dependability assurance, it is necessary to determine:

- a list and values of attributes that describe the AE structure;
- a list and values of attributes that characterize the sources of common cause;
- a list and values of attributes for statistical estimations;
- a list and values of attributes that determine the implementation of corrective actions;
- procedure of changing the values of attributes in the life cycle process.

Life cycle processes of AE are the subject of research in terms of the generation of the design decisions in the design of AE and the development of corrective actions and the assessment of their effectiveness during the operation of AE. In the process of AE life cycle, event-trigger and dynamic space is generated, in which the following problems are solved:

- evaluation of new projects of AE during their design according to operation results of analogous products;
- determination of causes of systematic failures, development of corrective actions and assessment of their effectiveness.

The life cycle model of AE in the aspect of dependability assurance is shown in Fig. 2.

The database for the expert system for the analysis of reliability of aircraft airborne information systems [5] and for the expert system for the analysis of dependability of aircraft airborne information systems [6] were developed in 2011.

Their development has taken into account the implementation experience of programs assuring dependability of AE for various purposes, such as:

- integrated information systems of signaling,
- electronic warning systems,
- critical behavior warning systems,
- the complex system of electronic display and signaling,
- alarm signaling systems,
- cockpit interior lighting systems,
- systems for converting analog and discrete information,
- control systems for general air-borne equipment,
- systems of limiting signals, systems of air signals of helicopters,
- onboard information systems of control,
- perception of air data systems that are installed on the following aircrafts: Tu-204, Tu-214, Tu-334, Il-96-300, Il- 96-400, Il-76, Il-114, AN-148, Ka-226, Ka-31 and Ka-32, Ansat etc.

Sources of failure in the design process are selected in accordance with the “Guidelines for the assessment of the correct application of electrical and radio products” used by industrial enterprises in the analysis of causes of electrical and radio products’ failures in samples of equipment and in the development of proposals to improve its reliability [7], and also in accordance with qualifying requirements KT-160D, establishing operation conditions and environment for airborne equipment [8].

Sources of failures in the production process are selected according to the basic list of special processes (SP), developed for the aviation industry as a whole, as well as a list of SP formed for specific products of aviation technology [9].

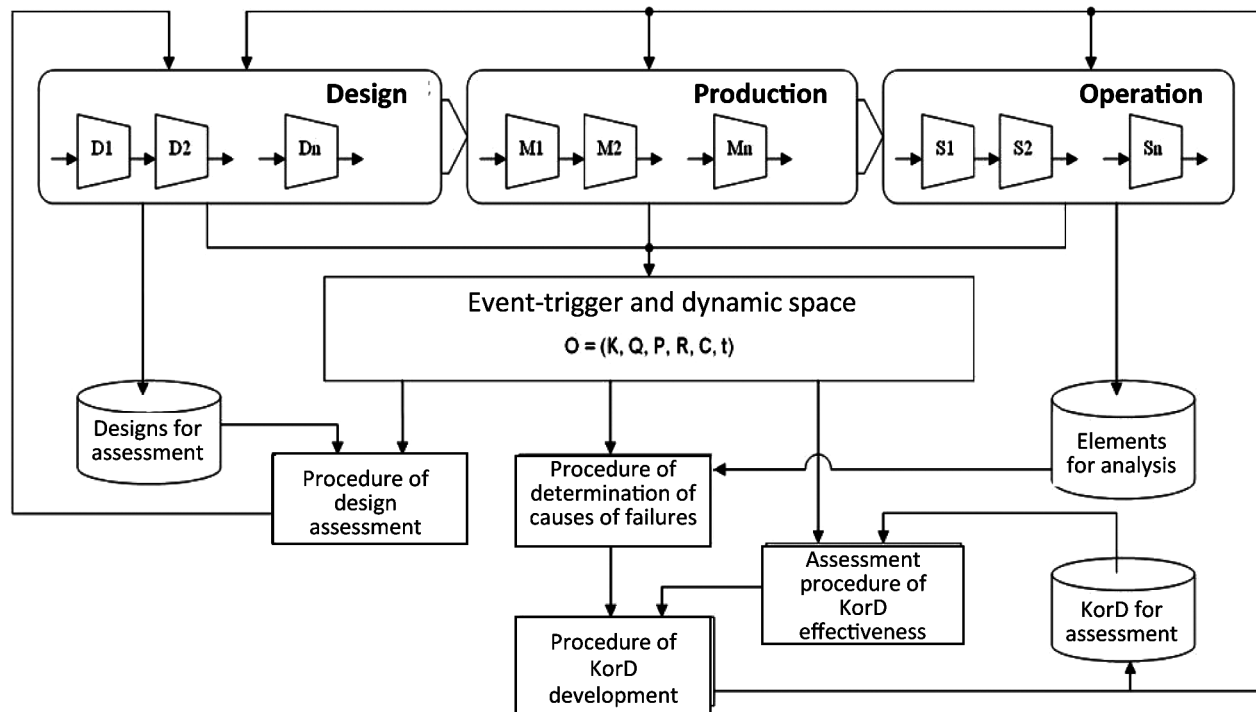


Fig. 2. The life cycle model of AE in terms of dependability assurance

Since the basic list of processes is generated from the point of view of the enterprise-developer and manufacturer of AE, detailing of the post-production stage onto processes has been carried out with less level. In this case, a set of processes implemented within an enterprise was generated for the model, such as the installation on the aircraft, operation, repairs, which are treated as separate processes.

The appearance of the interface part of the module for identification of sources of systematic failures and performance assessment of corrective actions are presented in Fig. 3.

The upper part of the screen contains information about the analyzed element or AE unit and considered process.

In the right part of the screen, there is a field of alternative applications. Applications are shown in the form of a graph whose vertices correspond to the elements analyzed, and nodes – to subsets of elements distributed by source of common cause.

On the left side of the screen, there is a diagram field. Each column of the diagram is a statistical assessment of dependability of one of the applications with the confidence limits of indicator. The columns of the diagram, statistical estimates of which are heterogeneous, are highlighted in color.



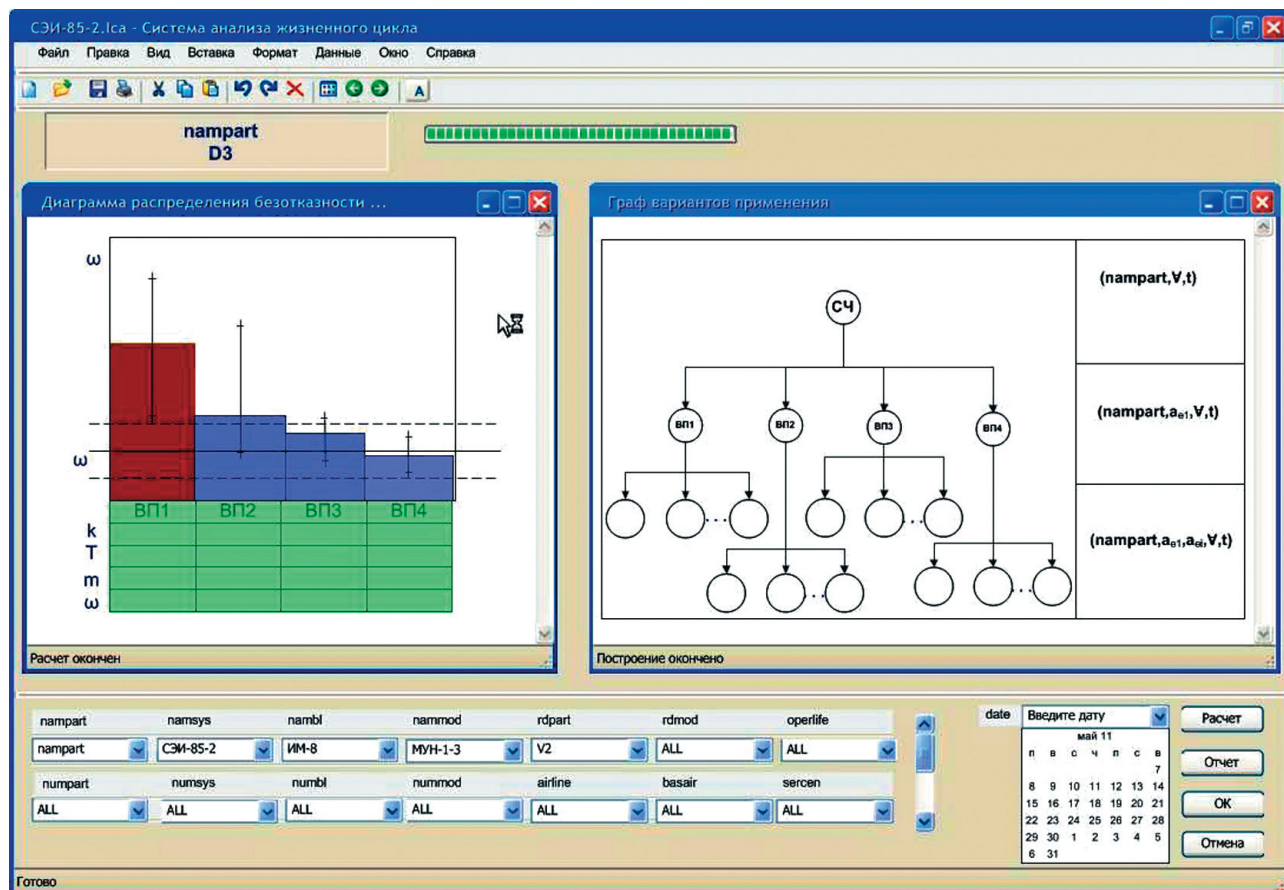


Fig. 3. The interface part of the module for identification of sources of systematic failures

At the bottom part of the screen, there is a constructor, which allows making changes in the tuple, by which application options are generated. This allows the expert, if necessary, to intervene in the process of analysis to implement his strategies.

The possibility to change the date of the relevance of the model for analysis is also provided. This allows us to analyze the dynamics of dependability level.

## Conclusion

The paper developed the electronic structure of AE in terms of the analysis of information about failures and development of corrective actions. Besides the model of AE in the aspect of FRACAS system was constructed, which allows an event-trigger and dynamic space of attributes of life cycle processes to solve the problems of determining the sources of systematic failures and the subsequent development of corrective actions and the assessment of their effectiveness.

## References

1. [Website]. URL: [www.relex.com / products / fracas.asp](http://www.relex.com/products/fracas.asp) (access date: 12/11/2012).
2. The software product FAVOWEB. Brief description and the advantage. The company ALD. P.17.
3. **Romanov Yu.V.** Using CALS – technologies to improve the efficiency of the process to ensure dependability of avionics / Romanov Yu.V., Shishkin V.V. // Dependability. – 2009 – # 4. Pp. 36-44.
4. Dependability in engineering. Terms and definitions GOST 27.002-2009. – Moscow: Standartinform, 2010. – P.54.

5. **Shishkin V.V.** An expert system for the analysis of dependability of air-born information systems / V.V. Shishkin, Yu.V. Romanov, D.I. Stenyushkin // Certificate of state registration of computer programs # 2012610068. – Moscow: Rospatent, 10.01.2012.
6. **Shishkin V.V.** The database of an expert system for dependability analysis of aircraft air-born information systems. / V.V. Shishkin, Yu.V. Romanov, D.I. Stenyushkin // Certificate of state registration of the database #2012620014. – Moscow: Rospatent, 10.01.2012.
7. Apparatus, instrumentation, devices, and equipment for military use. Guidance on the assessment of the correct application electrical and radio products. A comprehensive quality control system: RD V 319.01.09-94 (ed. 2-2000). Part 1: Generalities. Charts of operating modes and conditions of use of electrical and radio products / Defense Ministry. – M., 2000. – P. 152.
8. Qualifying requirements. Conditions of operation and environment for the air-born aircraft equipment. Requirements, standards and test methods: KT-160 D / ARMAK.- M., 2004. – P. 323.
9. Guidelines engineering material. Special processes. Procedural requirements for the development of design documentation for the production preparation, manufacture and repair of aviation technology: RTM 1.4.2118-2003. – Enter. 2004-01-01. – Moscow: JSC “NIAT”, 2004. – P.26.

**Байнева И.Д., Байнев В.В.**

## **ИССЛЕДОВАНИЕ И КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НАДЕЖНОСТИ ТЕХНИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ**

*В статье описываются методики, модели, программное обеспечение для оценки надежности различных технических объектов.*

**Ключевые слова:** надежность, метод, программа, распределение, закон, испытание, характеристика, вариационный ряд, безотказность, отказ, интерполяция.

### **Введение**

Развитие современной техники и технологий в последние десятилетия осуществляется большими скачками. При этом особенно актуальной является проблема обеспечения и повышения надежности технических объектов (приборов, аппаратов, оборудования, технологических комплексов, строительных конструкций и пр.), которые работают в условиях постоянной миниатюризации элементов и конструкций, различных нагрузок (температурных, механических, химических и пр.). Надежность, являясь одним из основных показателей качества любого изделия, в значительной степени определяет экономическую целесообразность его производства. Решение задачи повышения надежности усложняется тем, что она является многогранной и отражает специфику всех фаз существования технических объектов (ТО) – от стадии проектирования до стадии эксплуатации.

### **Теоретическая часть**

#### **1. Аспекты теории надежности**

Наука о надежности возникла на стыке ряда научных дисциплин, а именно: теории вероятностей и случайных процессов, математической логики, термодинамики, технической диагностики и др., развитие которых взаимосвязано и находит своё отражение в развитии теории надежности. К числу актуальных вопросов теории надежности относятся оценка и обеспечение надежности не только уже упомянутых ТО, но и современных автоматизированных систем управления ТО различного назначения (технологическим процессом, предприятием, производством, образованием и пр.).

Причинами изготовления ненадежной продукции могут быть: отсутствие регулярной проверки соответствия стандартам; ошибки в применении и неправильный контроль материалов в ходе производства; отсутствие испытаний материалов на их соответствие требованиям качества и безопасности; неправильный учет и отчетность по контролю; невыполнение стандартов по приемочным испытаниям; отсутствие инструкций и указаний по проведению контроля.

В области надежности, как правило, выделяют такие направления как техническая надежность и эксплуатационная надежность. Техническая надежность является исходной базой для определения и расчета показателей работоспособности ТО и их элементов, начиная с этапа проектирования и заканчивая процессом изготовления. При этом обеспечивается ремонтпригодность, обосновывается долговечность, учитываются особенности производственно-технологических процессов и т.д. [1].

Основной задачей эксплуатационной надежности является разработка и обоснование комплекса мероприятий по обеспечению надежности ТО уже непосредственно при их эксплуатации (работе). Эти мероприятия могут применять методы определения показателей надежности реальных ТО, осуществлять прогнозирование и непосредственное управление их техническим состоянием, обосновывать объемы и периодичность ремонтных работ, выстраивать рациональную организацию процесса технической эксплуатации и др.

## **2. Цели, методы и модели расчета надежности**

К основным целям определения и расчета надежности ТО можно отнести обоснование выбора того или иного конструктивного решения, подтверждение или неприятие выбора материалов или элементов, выяснение возможностей и целесообразности резервирования и т.д.

Очень часто представления о надежности ТО формируются на фактическом материале лабораторных, стендовых и производственных испытаний, на результатах длительных наблюдений за их работой в реальных условиях. На основании этих оценок подбирается соответствующее распределение случайных величин, которое и принимается за расчетную модель. Обработка и обобщение такой информации базируется на теории вероятностей, математической статистике, системном анализе, также привлекаются методы оптимизации, прогнозирования, подобия, экспертных оценок и др.

## **3. Показатели надежности технических объектов**

При исследовании надежности ТО приходится определять те или иные параметры по весьма ограниченному объему статистического материала.

Количественная характеристика одного или нескольких свойств, составляющих надежность технического объекта, называется показателем надежности. К показателям надежности относятся безотказность, долговечность, ремонтпригодность и сохраняемость. Эксплуатационная надежность обусловлена безотказностью и долговечностью наиболее часто выходящих из строя элементов, и ремонтпригодностью с точки зрения устранения случайных отказов.

Т.к. в некоторых случаях отказы отдельных элементов объектов не означают полной потери их работоспособности, то характеристики безотказности и ремонтпригодности являются в этом случае односторонними, а надежность должна оцениваться обобщенными показателями (комплексные показатели надежности).

Общее число таких показателей, подразделяемых на основные и второстепенные и регламентируемых государственными стандартами, составляет более 70. Это существенно затрудняет формирование требований к надежности ТО и контроль за их уровнем. В качестве компромиссного

варианта отечественные предприятия-изготовители закладывают в рабочую документацию на ТО очень ограниченное число основных показателей надежности. Это:

1. Показатели безотказности: вероятность безотказной работы; вероятность отказа; интенсивность отказов; средняя наработка до отказа; параметр потока отказов; средняя наработка на отказ.

2. Показатели долговечности (ресурсные показатели): гамма-процентный ресурс; средний ресурс; срок службы.

3. Показатели ремонтпригодности: среднее время восстановления; удельная суммарная трудоемкость технических обслуживаний; удельная суммарная трудоемкость unplanned текущих ремонтов.

4. Показатель сохраняемости: средний срок сохраняемости.

5. Комплексные показатели: коэффициент готовности; коэффициент технического использования.

Проблема надежности любых объектов связана с изучением явления отказа. Процесс функционирования восстанавливаемого объекта можно представить, как последовательность чередующихся интервалов работоспособности и восстановления (простоя) после отказа (рис. 1).

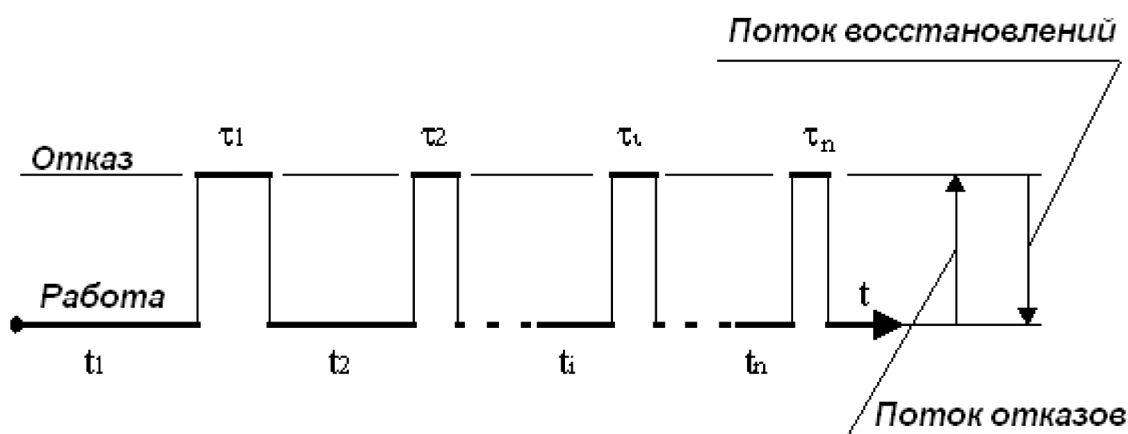


Рис. 1. График функционирования восстанавливаемого объекта:  
 $t_1 \dots t_n$  – интервалы работоспособности;  $\tau_1 \dots \tau_n$  – интервалы восстановления

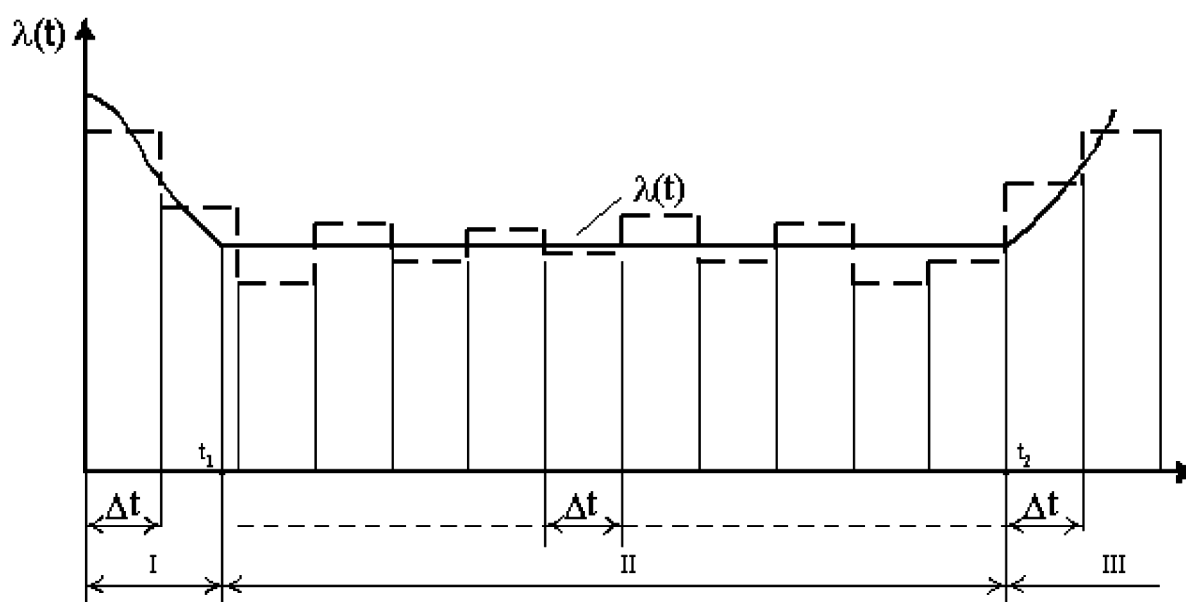


Рис. 2. Кривая зависимости интенсивности отказов от времени  
 I – интервал приработки, II – интервал нормальной эксплуатации, III – интервал старения

Регистрация числа и времени отказов позволяет получить для каждого из блоков зависимость интенсивности отказов  $\lambda$  от времени  $t$ . Если при статистической оценке время эксперимента разбить на достаточно большое количество одинаковых интервалов  $\Delta t$  за длительный срок, то результатом обработки опытных данных будет график, изображенный на рис. 2.

#### 4. Характеристика испытаний на надежность

Испытания на надежность проводятся по определенной унифицированной программе, которая является их организационно-методической основой. Программа устанавливает план испытаний (наблюдений), методы обработки полученных данных, правила принятия решений [3,4].

План испытаний определяет число испытываемых объектов (наиболее ответственная задача), продолжительность и критерии прекращения испытаний, число ступеней контроля, характер действий с отказавшими (достигшими предельного состояния) объектами – замена, восстановление и т.п. В большинстве случаев такие планы стандартизованы.

Сбор исходных данных для определения показателей надежности осуществляется визуально, с помощью специальных счетчиков наработки, счетчиков числа включений и др., а также на основании журналов техобслуживания и ремонта, требований на запасные части, учета работы механизмов, учета наработок и отказов и т.п.

Принятие решений по результатам испытаний осуществляется по определенным правилам, которые с математической точки зрения являются индикаторными функциями, принимающими значения 1 или 0. Положительное решение (1) означает соответствие, а отрицательное (0) – несоответствие контролируемых показателей заданным требованиям (нормам).

В настоящее время при определении показателей безотказности и долговечности ТО используются три источника информации: определительные испытания; контрольные испытания; эксплуатационные испытания в производственных условиях.

Определительные испытания позволяют установить номинальные значения показателей надежности новых образцов техники, которые закладываются в нормативную документацию.

Контрольные испытания проводятся на базовых серийных ТО для оценки соответствия фактических значений показателей надежности требованиям стандартов или технических условий. Методика контрольных испытаний на надежность, проводимых периодически, в самом общем случае должна содержать перечень показателей надежности, подлежащих контролю, а также следующие данные по каждому конкретному показателю надежности: приемочный и браковочный уровень; риск изготовителя и риск заказчика; число испытываемых образцов; время испытания каждого из них; допустимое число отказов; метод проведения испытаний; план испытаний; перечень параметров, характеризующих состояние ТО; условия испытаний (уровень воздействующих факторов и их значения, последовательность и продолжительность их воздействия и др.); решающее правило (приемка или отбраковка партии изделий).

При испытаниях устанавливается правило, которым руководствуются на каждой стадии эксперимента при принятии одного из трех возможных решений: принять основную гипотезу, принять конкурирующую гипотезу, продолжить испытания. Выбор трех критических областей при принятии решения основан на анализе последовательного критерия отношения правдоподобия.

## 5. Математический аппарат исследования надежности технических объектов

Поскольку расчёты надежности производятся главным образом на этапе проектирования, это позволяет выбрать наиболее подходящий вариант конструкции и методы обеспечения надежности, выявить «слабые места», обоснованно назначить рабочие режимы, форму и порядок обслуживания ТО.

Расчет надежности может состоять из следующих этапов:

1. Определение состава определяемых показателей надежности.
2. Выбор метода расчета надежности.
3. Составление математической модели.
4. Выполнение расчета, анализ полученных результатов, корректировка расчетной модели.

Весьма ответственной задачей является количественная оценка гипотезы о принадлежности результатов наблюдений к какому-либо закону распределения. Для принятия решения по этому вопросу служат критерии согласия, наиболее распространенные и эффективные из которых – критерии согласия Пирсона и Колмогорова. В общем случае методика определения полученного закона распределения исследуемой характеристики заключается в следующем.

1. Экспериментальным путем получают набор статистических данных, записывают их в виде вариационного ряда.
2. Экспериментальные данные наносятся на координатную сетку распределений (экспоненциального, нормального, Вейбулла и др.).
3. Определяют возможность линейной интерполяции экспериментальных данных.
4. Находят наибольшее отклонение от нее экспериментальных точек и проверяют по критерию согласия Колмогорова.

Моделирование на ЭВМ является наиболее эффективным средством анализа надежности сложных систем. Широко распространены два алгоритма моделирования: первый основан на моделировании физических процессов, происходящих в исследуемом объекте (оценка надежности при этом определяется по числу выходов параметров объекта за пределы допуска); второй основан на решении систем уравнений, описывающих состояния исследуемого объекта.

Анализ физико-химических процессов также позволяет получить оценку надежности исследуемого ТО, т.к. часто удаётся установить зависимость надежности от состояния и характера протекания физико-химических процессов (соотношение показателей прочности и нагрузки, износостойкость, наличие примесей в материалах, изменение электрических и магнитных характеристик, шумовые эффекты и т.д.).

### Практическая реализация задачи

Обработка результатов контрольных и определительных испытаний и расчет показателей надежности является достаточно сложной и трудоемкой задачей. Одним из способов предварительной разработки модели для облегчения визуализации структуры данных является построение функциональной диаграммы с обозначением внешних сущностей, потоков данных и обозначением всех основных процессов в AllFusion ERwin Data Modeler (рис. 3).

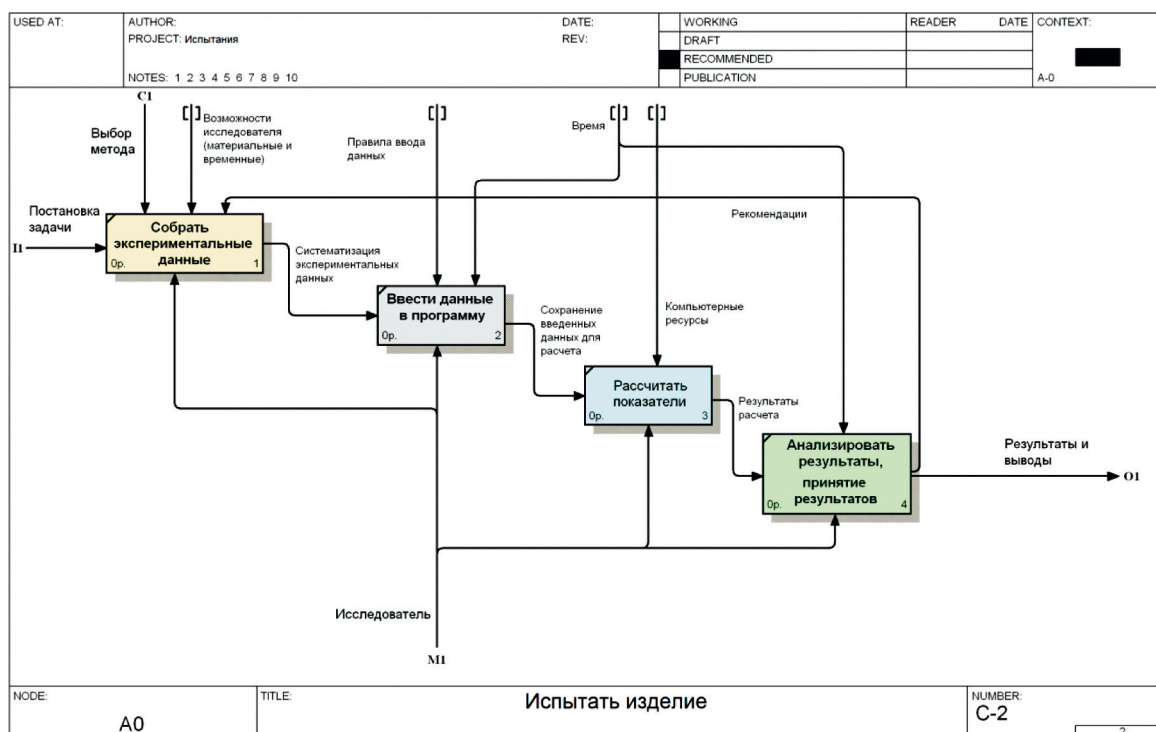


Рис. 3. Функциональная диаграмма

На базе данной диаграммы в среде быстрой разработки приложений Embarcadero RAD Studio XE3 была разработана программа «DeviceTest» для обработки и интерпретации результатов испытаний [5]. Программа позволяет выполнять исследования и расчеты следующих видов:

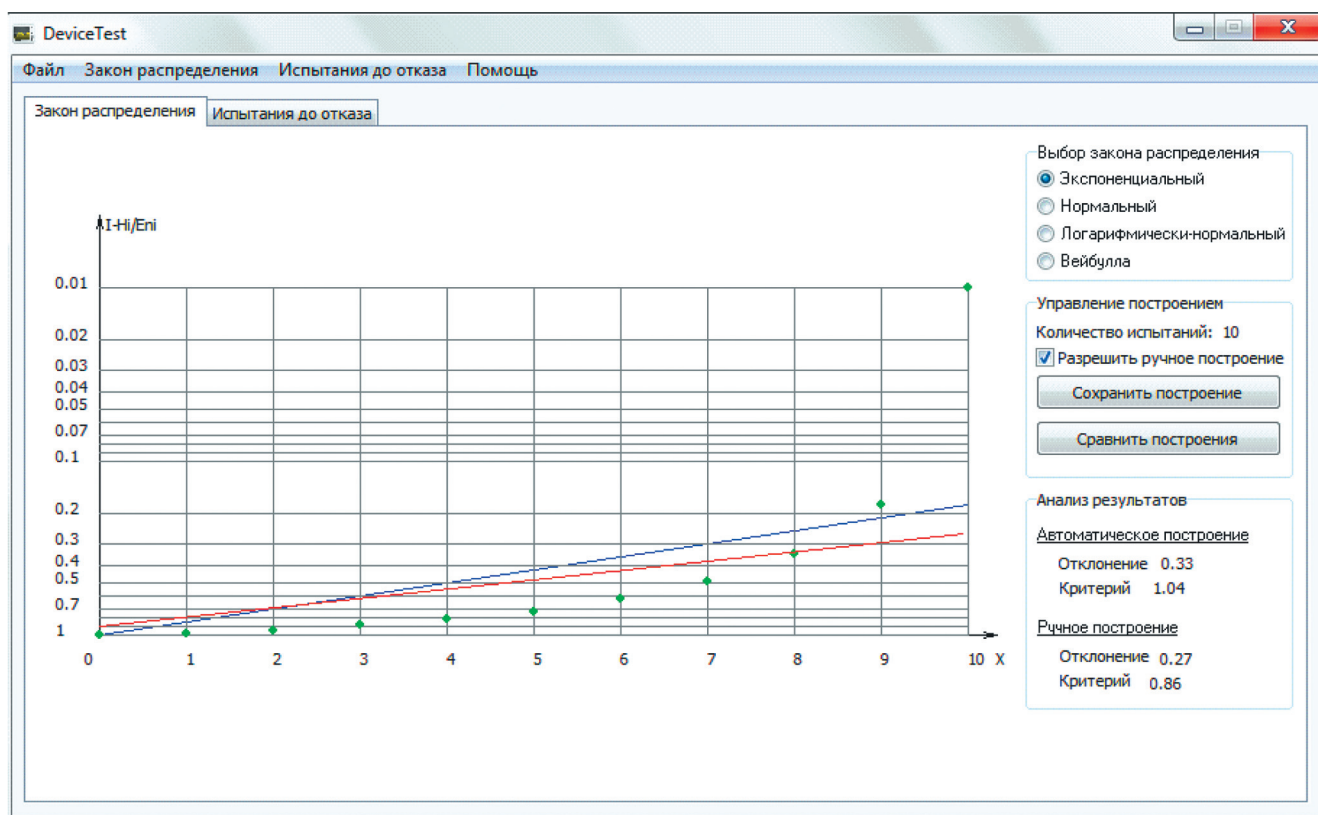


Рис. 4. Результат интерполяции (автоматического и ручного построения) для экспоненциального закона распределения



- проверять достаточность данных испытаний технических (и не только) объектов;
- определять вид закона распределения.

Для определения вида закона распределения нужно ввести количество произведенных испытаний и данные, полученные экспериментальным путем. После этого активизируется процесс интерполяции введенных данных применительно к первому виду закона распределения – экспоненциальному (рис. 4). Если автоматическая интерполяция не устраивает пользователя или критерий согласия Колмогорова не выполняется, то можно осуществить интерполяцию данных «вручную» (рис. 4).

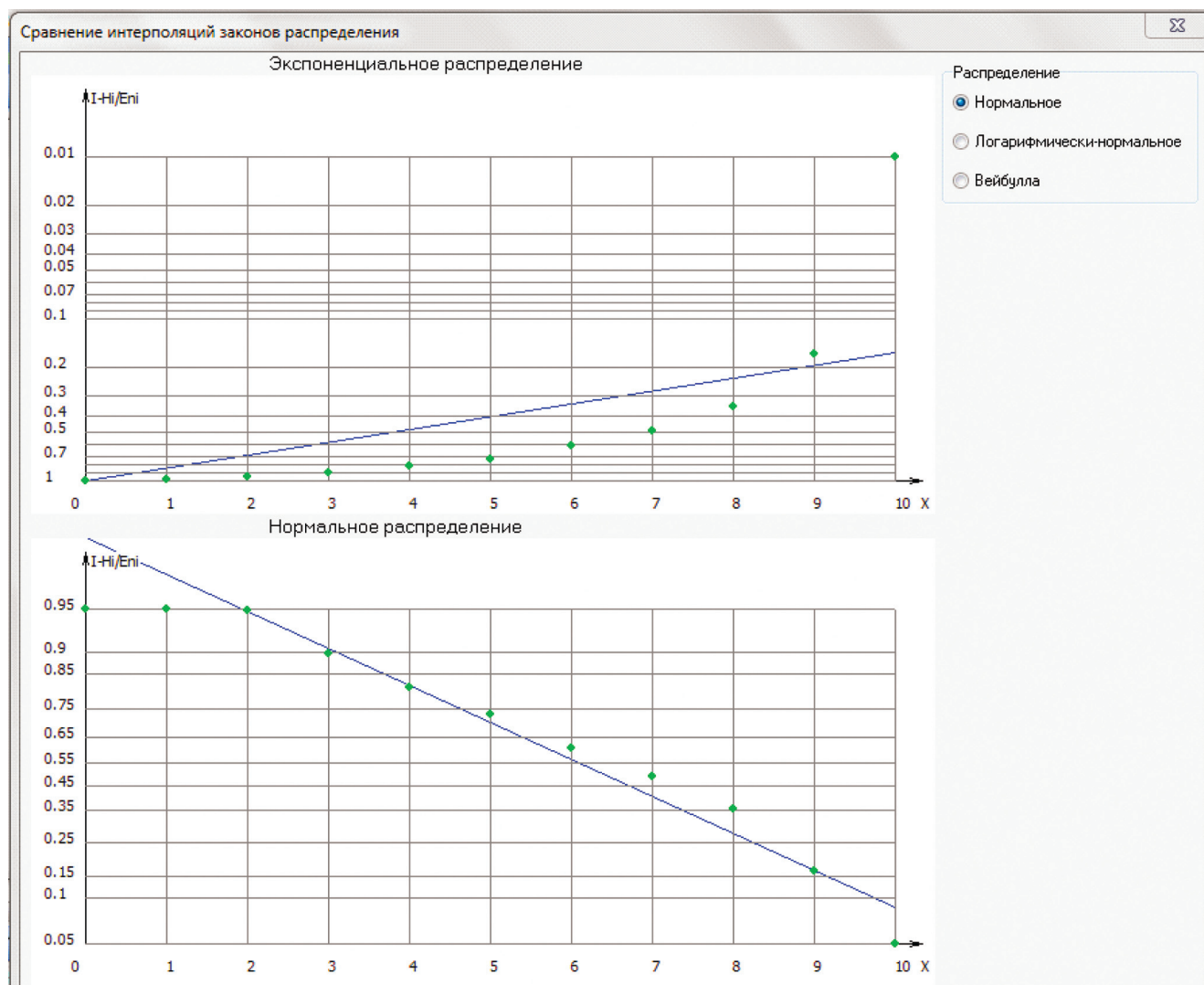


Рис. 5. Окно для сравнения результатов автоматической интерполяции данных

Результаты линейной интерполяции разными законами распределения можно сравнить для возможности субъективного выбора исследователем одного из них (рис. 5). После определения вида закона распределения можно решать многие задачи по оценке и анализу показателей надежности.

Для проверки достаточности результатов испытаний используются следующие исходные данные (рис. 6):

- риск поставщика  $\alpha$   ;
- риск заказчика  $\beta$   ;
- приемочное значение средней наработки на отказ  $T_\alpha$   ;
- браковочный уровень средней наработки на отказ  $T_\beta$   ;
- усечение результатов испытаний по количеству отказов  $m_{yc}$   ;
- усечение результатов испытаний по времени  $t_{yc}$   .

Кроме того, вводятся полученные экспериментально интересующие исследователя показатели (например, число отказов за период времени). Заранее принимают решение об усечении (ограничении) последовательного анализа. При этом методика предполагает одновременное испытание всех образцов с фиксацией отказов в моменты их возникновения. Параметры усечения  $m_{yc}$  и  $t_{yc}$  определяются по таблицам, приведенным в ГОСТ 27.410-83 или устанавливаются исследователем. После построения графика появляется информационное окно, в котором выводится сообщение о результатах построения плана последовательных испытаний (рис. 6).

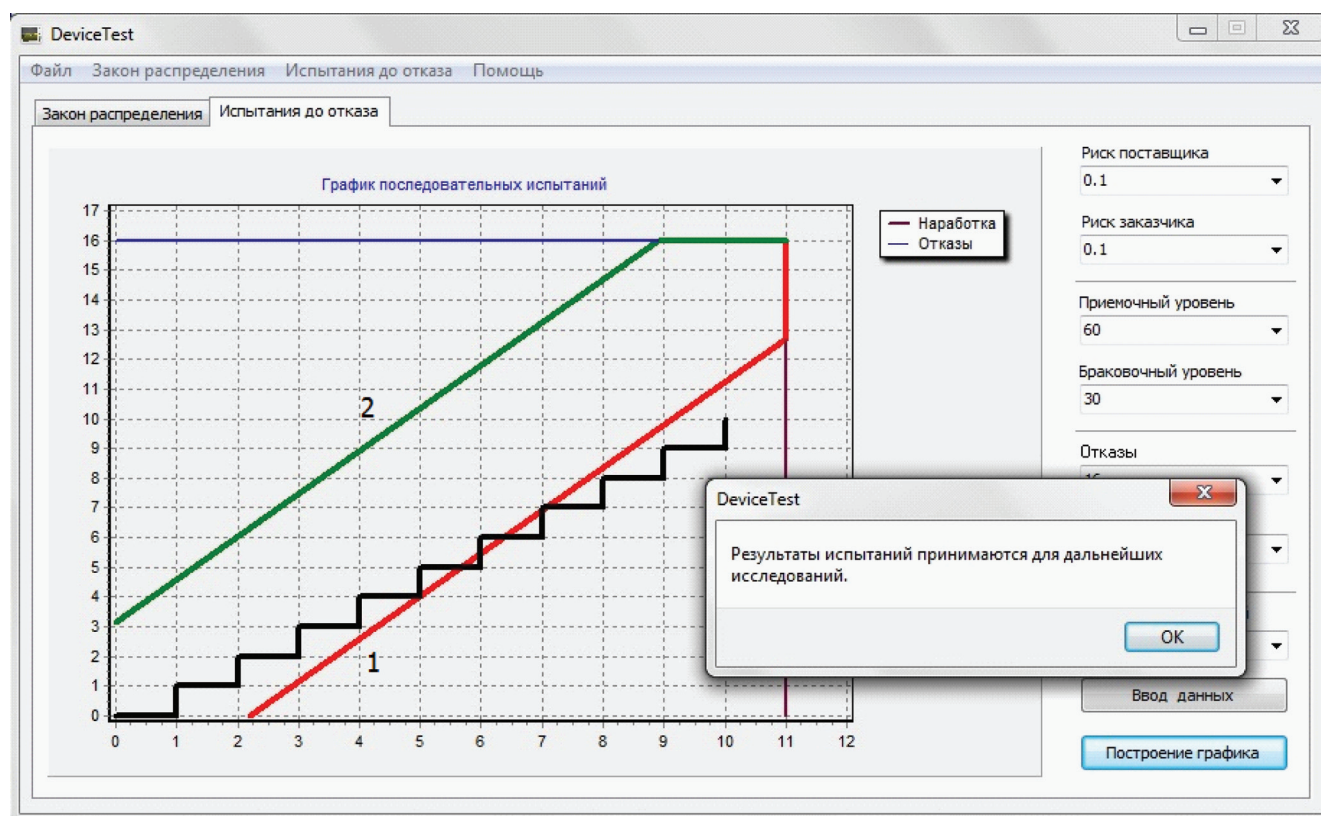


Рис. 6. Проверка достаточности данных хронометража последовательным методом  
1 – линия несоответствия; 2 – линия соответствия

## Литература

1. **Дружинин Г.В.** Надежность автоматизированных систем. – М.: Энергия, 1977. – 536 с.
2. **Беляев Ю.К., Богатырев В.А., Болотин В.В.** Надежность технических систем. – М.: Радио и связь, 1985. – 607 с.
3. **Байнева И.И.** Оценка эффективности и надежности светодиодных источников света. Проблемы и перспективы развития отечественной светотехники, электротехники и энергетики: Сб. науч. тр. VIII Междунар. науч.- техн. конф., Саранск: СВМО, 2010. С.11-13.
4. **Байнева И.И., Байнев В.В.** Оценка эффективности и надежности светодиодных источников света и приборов. Фотоника. 2011. Т.27, № 3. С.66-68.
5. **Байнева И.И., Байнев В.В.** Программа для определения уровня надежности технических объектов по результатам испытаний. Свидетельство на программу для ЭВМ №2012613210 Российская Федерация. Зарегистр. 05.04.2012.

**Bayneva I.I., Baynev V.V.**

## **STUDY AND COMPUTER MODELING OF DEPENDABILITY OF TECHNICAL OBJECTS**

*The paper describes methodologies, models and software for dependability assessment of various technical objects.*

**Keywords:** *dependability, method, software, distribution, law, test, feature, variation series, reliability, failure, interpolation.*

### **Introduction**

The development of modern engineering and technology in the past decade is carried out by great leaps. In addition to that, the problem of ensuring and improving the dependability of technical facilities (devices, instrument, equipment, technological systems, building structures, etc.), which work under the constant miniaturization of components and structures, different loads (thermal, mechanical, chemical, etc.), is particularly urgent. Dependability, as one of the main indicators of the quality of any products, largely determines the economic feasibility of its production. Solution of dependability problem is complicated by the fact that it is versatile and reflects the specifics of all the phases of existence of technical objects (TO) – from the design stage to operation.

### **Theoretical part**

#### **I. Aspects of dependability theory**

The science of dependability emerged at the junction of several scientific disciplines, namely, the theory of probability and random processes, mathematical logic, thermodynamics, technical diagnostics, and others, the development of which is interconnected and is reflected in the development of the theory of dependability. Assessment and ensuring the dependability of not only the already mentioned TO, but of modern and automated control systems for TO of various purposes (process, undertaking, production, education, etc.) are among the urgent issues of the dependability theory.

The reasons for the manufacture of unreliable products can be such as the lack of regular compliance checks, mistakes in the application and improper control of materials during production, the lack of test-

ing of materials for their compliance with quality and safety; improper accounting and reporting about controls, failure to comply with standards for the acceptance tests, the lack of instructions and guidelines for control.

Such directions as the technical dependability and operational dependability are distinguished in the area of dependability. Technical dependability is the starting point for the definition and calculation of up-state indices of TO and their elements, beginning with the design stage and finishing with manufacturing process. This ensures maintainability, substantiates durability, takes into account production and technological processes etc. [1].

The main objective of operational dependability is to develop and justify a set of measures to ensure the dependability of TO directly in their operation (work). These activities can apply methods for determining the dependability of real TO, to carry out forecast and immediate control of their technical condition, justify the amount and frequency of repairs, build a rational arrangement of the process of technical operation etc.

## **II. Objectives, methods and models for calculating dependability**

The main purposes of the definition and calculation of dependability can include justification for the selection of a design solution, the confirmation or rejection of the choice of materials or elements, finding out the possibility and suitability of redundancy, etc.

Very often the idea of the TO dependability is formed upon actual data of laboratory, bench and industrial tests on the results of long-term observations of their operation in the real conditions. Based on these estimates, an appropriate distribution of random variables is selected, which is taken as the calculation model. Processing and generalization of this information is based on the probability theory, mathematical statistics, and systems analysis. Methods of optimization, forecasting, similarity, peer reviews etc. are also involved.

## **III. Dependability indices of technical objects**

In the study of dependability of TO, engineers have to define some parameters with use of very limited amount of statistical data.

A quantitative characteristic of one or more properties constituting the dependability of the technical object is called the reliability index. Indicators of dependability include dependability, durability, maintainability, and survivability. Operational dependability is conditioned by reliability and durability of the most frequently failed components, and maintainability in terms of removal of random failures.

Because in some cases failures of individual components of objects do not mean a total loss of their operating capacity, the characteristics of reliability and maintainability are one-sided in this case, and dependability should be evaluated by overall indices (integrated dependability index).

The total number of such indices subdivided into the primary and secondary indices and regulated by the state standards is more than 70. This greatly hinders the formation of the requirements for TO dependability and their level control. As a compromise, domestic manufacturers embed a very limited number of key dependability indices in technical documents for TO. They are:

1. Reliability indices: the probability of failure-free operation, the probability of failure, failure rate, mean time to failure, failure stream parameter, mean time between failures.
2. Life characteristics (resource indicators):  $\gamma$ -percentile life, mean life; lifetime.
3. Maintainability indices: the average recovery time, total unit man-hours of maintenances, total unit man-hours of corrective maintenance.

4. Survivability index: the average survivability time.
5. Integrated indices: availability factor, utilization factor.

The problem of dependability of any objects is associated with the study of the phenomenon of failure. The functioning process of the restored object can be represented as a series of alternate intervals of operability and recovery after failure (Fig. 1).

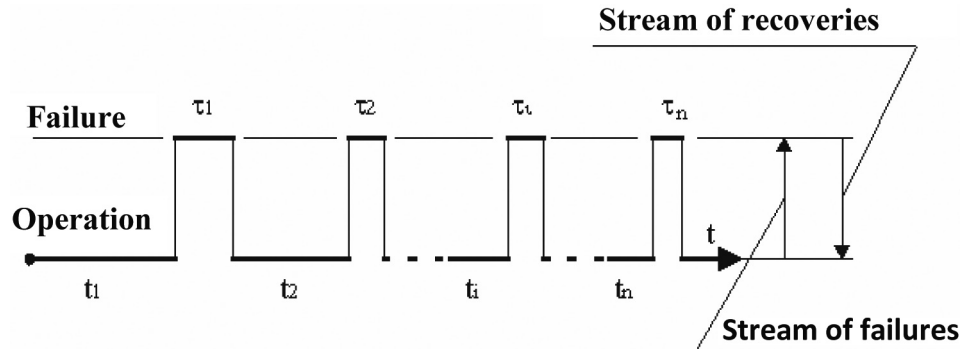


Fig. 1. Diagram of functioning of the recoverable object:  
 $t_1 \dots t_n$  are intervals of operability,  $\tau_1 \dots \tau_n$  are recovery intervals

Registration of the number and the time of failures allows us to obtain for each of the units the dependence of the failure rate  $\lambda$  on the time  $t$ . If the statistical evaluation of the experiment is divided by a sufficiently large number of equal time  $\Delta t$  for a long term, the result of processing of the experimental data is a graph shown in Fig. 2.

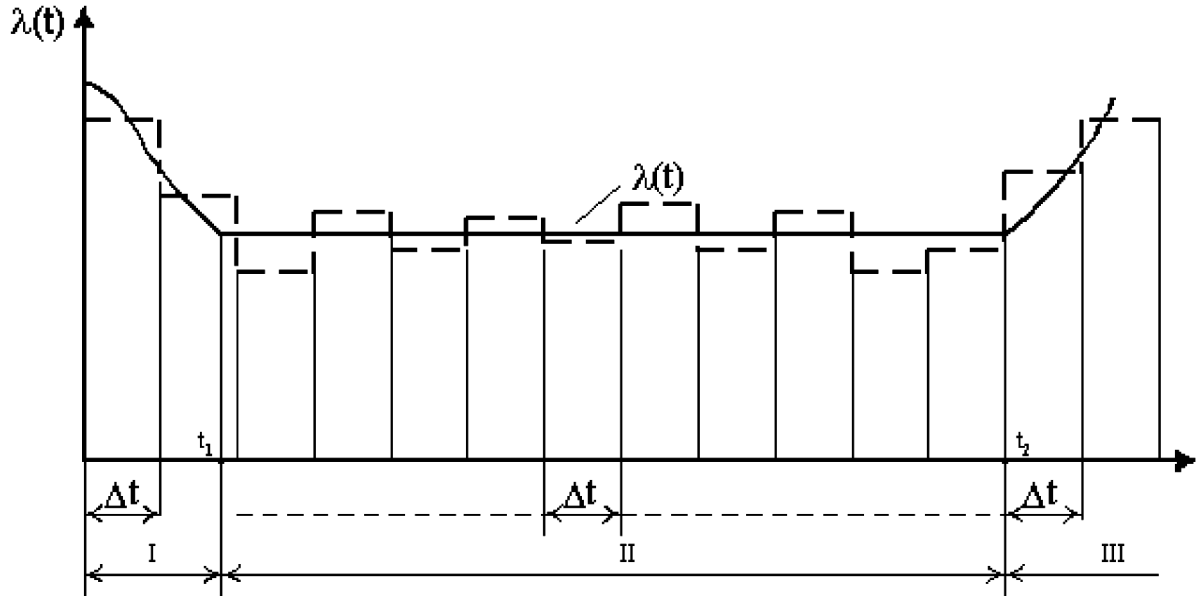


Fig. 2. The dependence of the failure rate on time  
 I is break-in interval, II is normal operation interval, III is aging interval

#### IV. Description of tests for dependability

Dependability tests are carried out using some specified unified program, which is their organizational and methodical basis. The program establishes the test plan (observations), methods of processing data obtained, the rules of decision-making [3,4].

The test plan defines a number of objects being tested (the most responsible task), duration and termination test criteria, the number of levels of control, the nature of action with failed objects (which have reached the limit state) – the replacement, recovery, etc. In most cases, these plans are standardized.

Collection of initial data to determine the dependability indices is carried out visually, using special time meter of operating time, counters of the number of switching on, etc., as well as on the basis of maintenance and repair register logs and logs of requirements for spare parts, the account of the mechanisms' operation and records of operating time and failures, etc.

Decision-making based on the results of tests is carried out by established rules that from a mathematical point of view are indicator functions taking the values 1 or 0. A positive solution of (1) is compliance, and a negative one (0) is non-compliance of controlled indices to specified requirements (standards).

Currently, at the definition of dependability and durability of TO three sources of information is used: definitive tests, routine check tests, operational tests in production conditions.

Definitive tests allow us to set the nominal values of the dependability of new equipment, which are placed in normative documentation.

Routine check tests are carried out on the basic serial TO for the conformity assessment of the actual values of dependability indices to standards' requirements or specifications. The method of routine check tests for dependability are carried out periodically, and in the general case it should contain a list of dependability indices to be controlled, and the following data for each specific index of dependability: acceptance and rejection level, the risk of a manufacturer and the risk of a customer, the number of test specimens, the test time for each of them, the permissible number of failures, the method of testing, a test plan, a list of parameters that characterize the condition of TO; test conditions (level of influencing factors and their values, sequence and duration of their effect, etc.), the decisive rule (acceptance or rejection of a production lot).

There is a rule established at testing that must be followed at each stage of the experiment in taking one of the three decisions: to accept the basic hypothesis, to accept a competing hypothesis, go on with further tests. Choice of three critical areas in decision-making is based on the analysis of the sequential likelihood ratio test.

## **V. Body of mathematics for the study of dependability of technical objects**

Since the dependability calculations are mainly carried out at the design phase, it allows us to choose the most suitable option of construction and methods to ensure dependability and to identify "trouble spots", reasonably assign operating modes, the form and the order of TO maintenance.

Calculation of dependability can consist of the following stages:

1. Determining a composition of defined dependability indices.
2. Selecting a method for the dependability calculation.
3. Working out a mathematical model.
4. Carrying out calculations, analysis of the results, and adjustment of the calculation model.

A very important task is a quantitative assessment of the hypothesis that observation results belong to any law of distribution. To make a decision on this issue, there are fitting criteria, the most common and effective of which the fitting criterion of Pearson and Kolmogorov. In general, the method of determining the resulting characteristics of the distribution law under study consists in the following.

1. A set of statistical data is obtained by experimenting, and then it is written down in the form of a variance series.

2. The experimental data are plotted on the coordinate grid distributions (exponential, normal, Weibull, etc.).
3. The possibility of linear interpolation of the experimental data is defined.
4. The maximum deviation of experimental points from linear interpolation is found out and checked by fitting criterion of Kolmogorov.

Computer simulation is the most effective means of dependability analysis of complex systems. Two algorithms for modeling are widely disseminated: the first is based on the modeling of the physical processes occurring in an object under study (dependability evaluation is then determined by the number of parameters of the object going out of tolerable limits), the second is based on solving systems of equations that describe the state of the object.

Analysis of physical and chemical processes also provides a possibility to obtain the estimate of dependability of TO under test because it is often possible to establish a relationship between dependability and the condition and the character of the physical and chemical processes (the relation of strength and load, wear resistance, presence of impurities in materials, change of the electrical and magnetic characteristics, noise, etc.).

### Practical implementation of the task

Processing of the results of routine check tests and definitive tests and dependability indices calculation is a difficult and tedious task. One way of tentative model development to facilitate visualization of the data structure is to construct a functional diagram indicating the external entities, data flows, and the designation of all key processes in the AllFusion ERwin Data Modeler (Fig. 3).

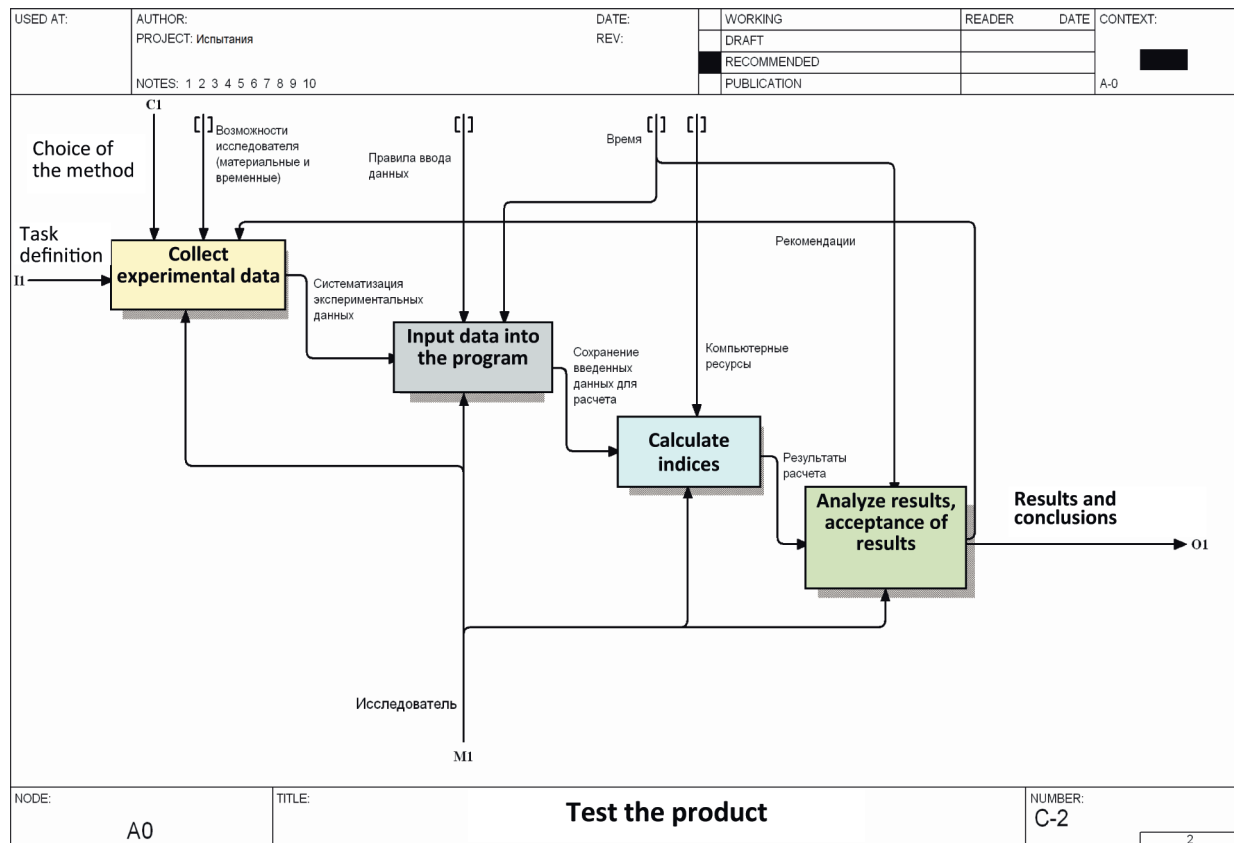


Fig. 3. Functional diagram



Based on this diagram, the program “DeviceTest” was developed in rapid application development environment Embarcadero RAD Studio XE3 for processing and interpretation of test results. [5] The program allows us to carry out investigations and calculation of the following types:

- To check the sufficiency of test data of technical (and other) facilities;
- To determine the type of the distribution law.

To determine the type of the distribution law, it is necessary to enter the number of tests performed and the data obtained experimentally. After that, we activate the process of input data interpolation for to the first type of the distribution law, i.e. the exponential one (Fig. 4). If the automatic interpolation does not satisfy the user or the fitting criterion of Kolmogorov is not met, it is possible to implement the interpolation of data “manually” (Fig. 4).

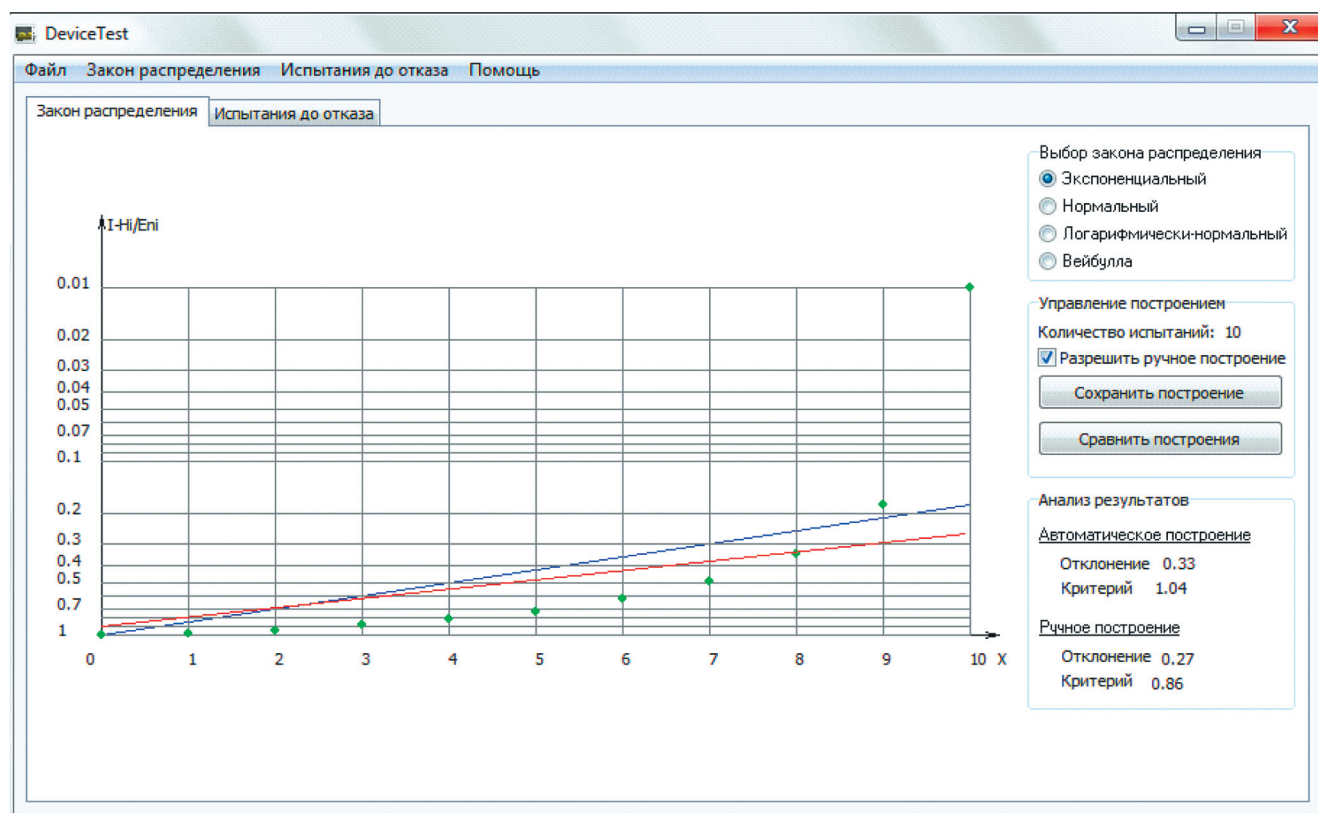


Fig. 4. The result of the interpolation (automatic and manual) for the exponential distribution law

The results of linear interpolation by different distribution laws can be compared for the possibility of subjective researcher choice of one of them (Fig. 5). After determining the type of distribution, it is possible to solve many problems for the evaluation and assessment of dependability indices.

To check the sufficiency of the test results, the following initial data is used (Fig. 6):

Supplier's risk  ;  
 Customer's risk  ;  
 Acceptance value of MTTF T  ;

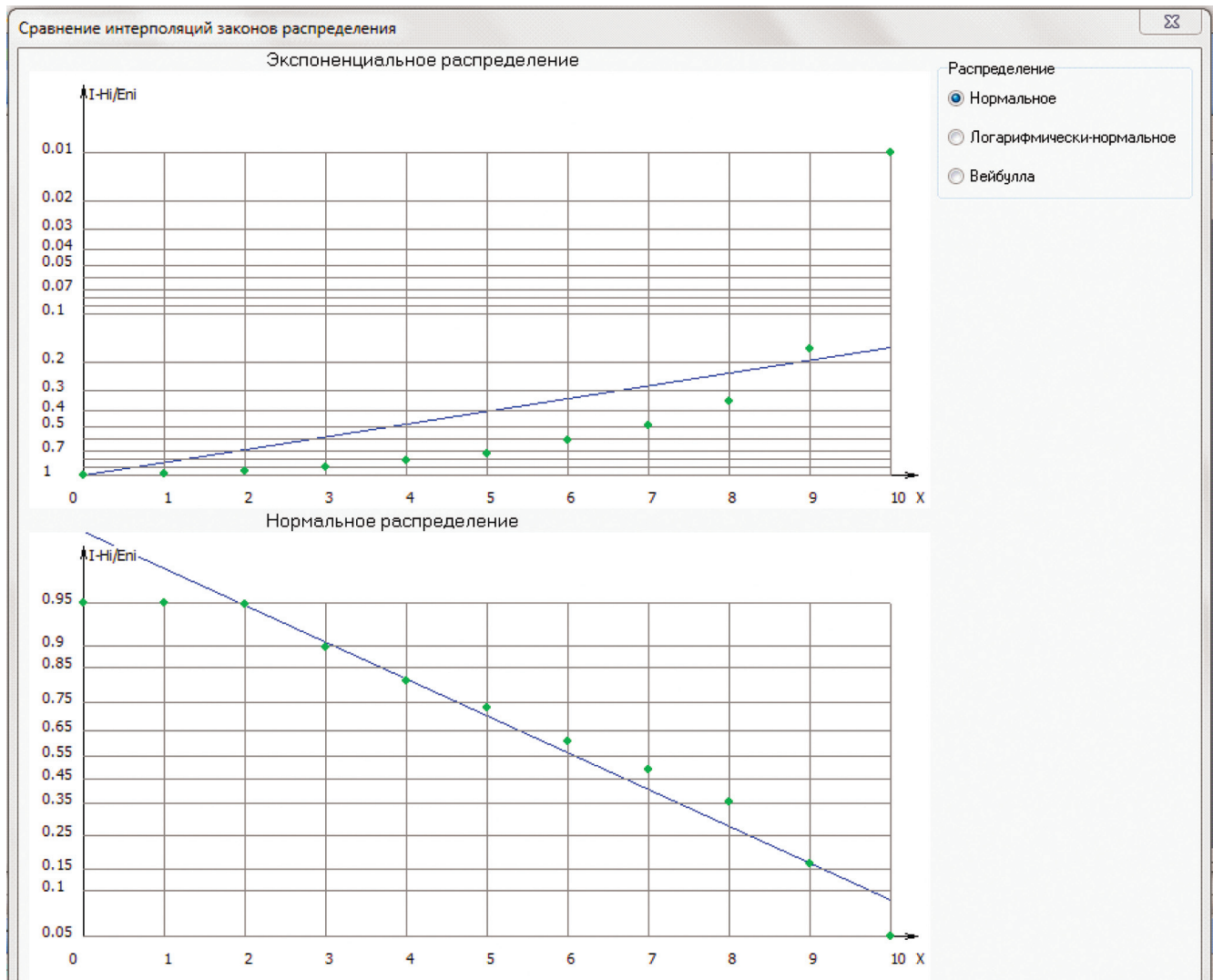


Fig. 5. The window to compare the results of automatic interpolation

Браковочный уровень  
 Rejection level of MTTF T  ;  
 Отказы  
 Truncation of the test results by the number of failures myc  ;  
 Нарabотка  
 Truncation of the test results by time tyc  .

In addition to that, obtained experimental indicators interesting for researchers are introduced (e.g., the number of failures per time period). Decision to truncate (restrict) sequential analysis is made in advance. In this case the method involves the simultaneous testing of all samples with the fixation failures when they occur.

Truncation parameters myc and tyc are defined by the tables in GOST 27.410-83 or imposed by the researcher. After plotting a message box, there appears a window that displays the message about the results of the construction plan of successive tests (Fig. 6).

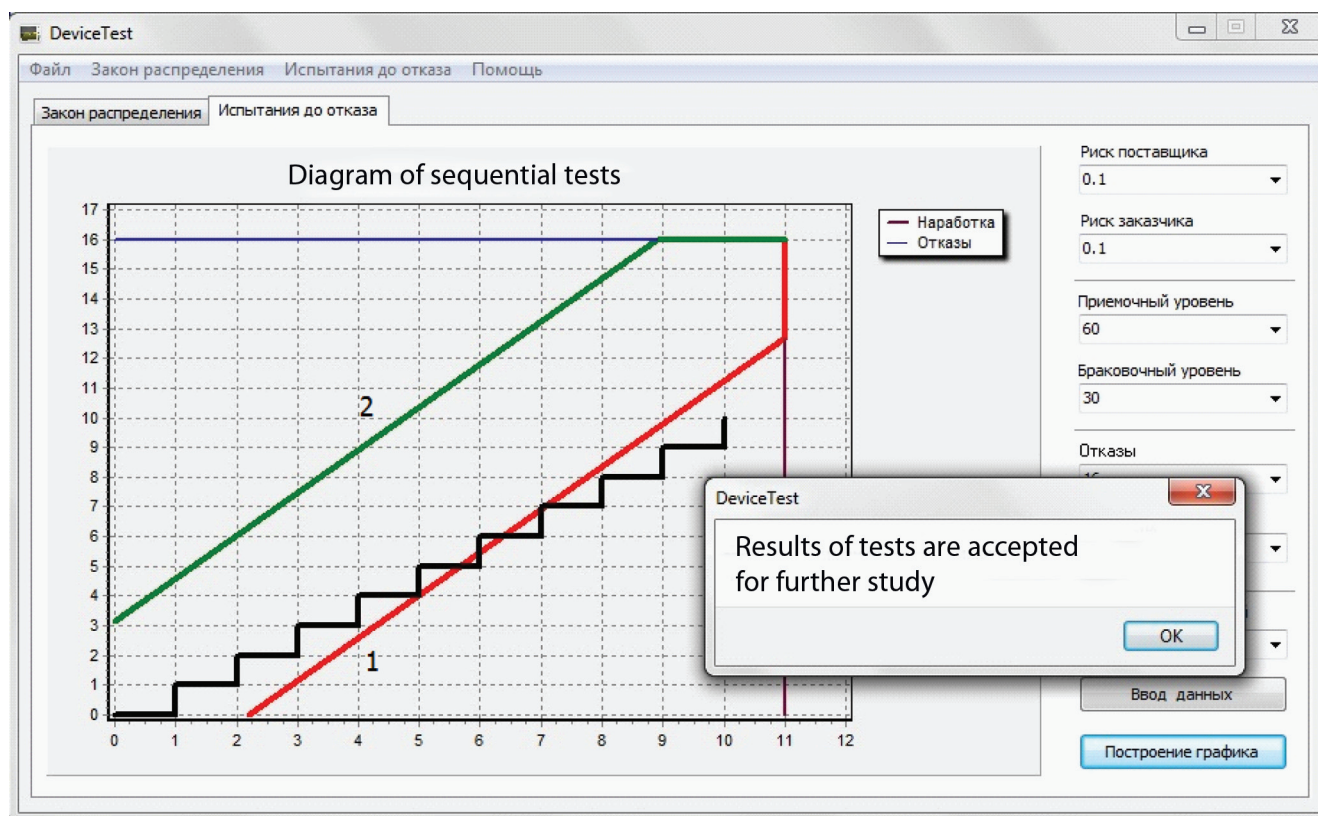


Fig. 6. Test data of sufficiency timing by sequential method  
1 is the line of non-conformity, 2 is the line of conformity

## References

1. **Druzhinin G.V.** The dependability of automated systems. – Moscow: Energy, 1977. – 536 p.
2. **Belyaev U.K., Bogatyrev V.A., Bolotin V.V.** The dependability of technical systems. – M.: Radio and communication, 1985. – 607 p.
3. **Bayneva I.I.** Evaluating the effectiveness and dependability of LED light sources. Problems and prospects of development of domestic lighting technology, electrical engineering and energy: Proceedings. VIII International scientific and technical conference, Saransk SBMO, 2010. P.11-13.
4. **Bayneva I.I., Baynev V.V.** Evaluating the effectiveness and dependability of LED lighting technology and appliances. Photonics. 2011. V.27, # 3. P.66-68.
5. **Bayneva I.I., Baynev V.V.** Program to determine the level of dependability of complex objects based on the results of tests. Certificate to the computer program number 2012613210 Russia. Reg. 04/05/2012.

**Онищенко Д.Д.**

## **ЭМПИРИЧЕСКАЯ МЕТОДИКА ПРЕДСКАЗАНИЯ КОЛЛАПСА НАГРУЖАЕМОЙ МНОГОЭЛЕМЕНТНОЙ СИСТЕМЫ**

*В работе предложена методика оценки ресурса надёжности нагружаемой многоэлементной системы, производимой в режиме реального времени по ходу разрушения системы. Постановка задачи о разрушении – квазистатическая, в качестве модельного примера используется классический пучок Даниэлса.*

*Методика основана на статистическом анализе последовательностей единовременных отказов нескольких элементов (пакетов разрушений). По мере развития процесса разрушения отмечаются моменты фиксации наибольшей частоты пакетов определённого объёма (единичных, двойных и т.д.). На основании этого при помощи усреднения в рамках «плавающих окон» уточняется статистическая оценка времени, оставшегося до наступления лавины и полного коллапса системы.*

*Для иллюстрации работы новой методики использованы результаты компьютерного моделирования. Проводится её сравнение с подходами, предлагавшимися ранее другими авторами, показаны её преимущества.*

**Ключевые слова:** квазистатическое разрушение, многоэлементная система, пучок Даниэлса, время жизни, лавина, статистика пакетов разрушений, скользящее окно.

### **Введение**

Задача о предсказании наступления коллапса (полного разрушения) нагружаемой многоэлементной системы встречается в различных её вариациях во многих областях физики (модели разрушения неоднородных сред), техники и инженерного моделирования, причем на существенно различных пространственных и временных масштабах (например, [1]). Характерными примерами могут служить сейсмическая и вулканическая активность, различные модели электромеханических систем, разрушение материалов при эксплуатации инженерных систем и конструкций [2-5]. Ситуация, когда речь идёт о прогнозировании ресурса системы на стадии её проектирования, широко представлена в литературе [6-7]. Однако особый интерес представляют случаи, когда требуется дать прогноз времени наступления коллапса непосредственно по ходу развития процесса разрушения на основе наблюдений за поведением системы.

В общем случае коллапсу предшествует период постепенной деградации системы, выражающийся в последовательных разрушениях отдельных элементов. При этом имеют место как одиночные

разрушения, так и групповые. Задача локализации крупных групповых разрушений (как потенциальных источников зарождения лавины) в исследуемой системе может решаться, например, с помощью разновидностей метода акустической эмиссии [8-9]. С другой стороны, в ряде случаев (например, при выполнении каких-либо условий однородности системы) можно пытаться делать вывод о её близости к коллапсу на основании анализа одной лишь последовательности интенсивностей отдельных промежуточных актов одновременного разрушения элементов, не интересуясь при этом пространственными характеристиками этих актов. Большое число работ по данной теме было посвящено изучению различных дискретных вероятностных моделей, среди которых базовыми являются модификации модели пучка волокон [10-12]. Исследовались также модели непрерывного разрушения [13].

В настоящей работе предлагается методика динамического, т.е. в режиме реального времени, предсказания момента наступления окончательного разрушения системы под действием возрастающей нагрузки. Данная методика, основанная на изучении результатов численных экспериментов, иллюстрируется на примере исходной модели пучка [14], которую принято называть пучком Даниэлса. Помимо описания самой модели и её численной реализации, приводится описание характеристик, используемых для анализа текущего состояния системы (т.е. стадии, на которой находится процесс разрушения, и близости системы к коллапсу) и результаты компьютерного моделирования. Основное внимание уделено анализу изменения частоты фиксации групповых разрушений малого объема. Проводится сравнение предлагаемой методики с подходами, предлагавшимися ранее другими авторами.

## Постановка задачи

Вначале приведем краткое описание рассматриваемой классической модели – пучка Даниэлса, лежащей в основе многочисленных более сложных моделей. Речь идёт о математической модели пучка – системы, состоящей из  $N$  параллельных волокон, закреплённых с обоих концов таким образом, что удлинения всех волокон под действием растягивающей нагрузки, приложенной к пучку, одинаковы. Каждому волокну сопоставлено положительное число – его прочность, т.е. минимальное значение растягивающего продольного усилия, под действием которого волокно разрушается. Волокна будем считать статистически идентичными, т.е. подразумевается, что закон распределения прочности, как случайной величины, один и тот же для всех волокон в пучке и описывается некоторой функцией распределения  $F(x)$ ,  $x \geq 0$ .

Предполагается, что на пучок действует продольная растягивающая нагрузка, значение которой монотонно возрастает от нулевого значения. В силу сделанных предположений нагрузка равномерно распределяется между волокнами.

Ясно, что фактически мы имеем дело с абстрактной математической моделью, в которой внешняя нагрузка распределяется равномерно между всеми работоспособными элементами системы. В дальнейшем будем для удобства использовать термин «пучок волокон» для обозначения указанной модели.

Волокно назовем перегруженным, если усилие в нем равно его прочности или превосходит её. При моделировании процесса разрушения пучка, когда волокно оказывается перегруженным, оно удаляется из пучка (разрушается), а суммарная нагрузка на пучок равномерно перераспределяется между оставшимися волокнами. Процесс нагружения рассматривается в квазистатической постановке: удаление перегруженных волокон и перераспределение нагрузки при неизменной текущей

общей нагрузке считается происходящим мгновенно и заканчивается, когда перегруженных волокон не остаётся. Только после этого, если остались не удалённые волокна, продолжается монотонное увеличение нагрузки на пучок.

Последний будем называть разрушенным, когда из него удалены все волокна. Критической нагрузкой назовем такое значение нагрузки на пучок, при котором разрушилось последнее волокно. Величину критической нагрузки, отнесённую к исходному числу волокон  $N$ , будем называть критической удельной нагрузкой  $q_{br}$ .

Далее назовем пакетом разрушений (или просто пакетом) набор волокон, разрушившихся одновременно, т.е. при одной и той же нагрузке на пучок. Характеристиками пакета являются его порядковый номер (в рамках текущего процесса разрушения), объём (количество разрушившихся волокон) и значение нагрузки, при котором происходило разрушение волокон из данного пакета. Последний пакет (после которого пучок полностью разрушен) будем называть лавиной.

Сформулируем следующую общую задачу: оценить динамически, т.е. по ходу разрушения пучка, время, оставшееся до наступления лавины. Более строго, по некоторому начальному участку процесса разрушения требуется оценить порядковый номер лавины в последовательности пакетов и критическую удельную нагрузку. Ясно, что чем длиннее этот начальный участок, тем, вообще говоря, точнее будут полученные оценки. В то же время, сигнал о приближении лавины хотелось бы получить «не слишком поздно». Последнюю характеристику можно уточнять различными способами.

## Планирование численного эксперимента

Двумя параметрами сформулированной задачи являются объём пучка  $N$  и функция распределения прочности волокон  $F(x)$ . Далее в работе приводятся результаты численного анализа рассматриваемой модели для различных значений  $N$  и двух типов распределения прочности: а) равномерного на отрезке  $[0;1]$  (для которого среднее значение прочности и её дисперсия равны соответственно  $1/2$  и  $1/12$ ); б) двухпараметрического распределения Вейбулла с теми же средним и дисперсией. Эти два типа в дальнейшем будем называть соответственно первым и вторым.

В основополагающей работе [14] получен следующий результат: асимптотически при  $N \rightarrow \infty$  критическая удельная нагрузка есть нормально распределённая случайная величина с известными средним и дисперсией. Первое равно максимальному значению функции

$$q(x) = x(1 - F(x)),$$

а вторая асимптотически стремится к 0. В частности, для двух указанных типов распределения прочности соответствующие средние значения критической удельной нагрузки суть  $q_1 = 0,25$  и  $q_2 \approx 0,23$  соответственно.

Важное, хотя и элементарное, замечание состоит в том, что при известных  $N$  и  $F(x)$  поставленная задача о предсказании лавины сводится к стандартному построению доверительного интервала. Однако на практике основной интерес представляет исследование случая, когда отсутствует возможность измерения нагрузки, а фиксируются лишь акты локального разрушения (пакеты). Кроме того, обычно неизвестен и объём пучка.

При проведении численного эксперимента ограничимся случаем, когда внешняя нагрузка на пучок возрастает пропорционально времени. При этом из данных выше определений вытекает следующее: в рассматриваемой постановке в качестве дискретного аналога времени может быть

выбрано значение порядкового номера пакета или значение нагрузки, соответствующее данному пакету. Вообще процесс разрушения полностью описывается двумя последовательностями: объёмов последовательных пакетов и соответствующих им значений нагрузки. Соответственно в ходе численного моделирования именно эти последовательности составляют выходную информацию по итогам каждого отдельного эксперимента. По накопленным данным производится анализ статистических характеристик процесса разрушения, основное внимание при этом уделяется изучению изменчивости долей пакетов различного объема по мере развития процесса разрушения и поиску возможных закономерностей.

## Реализация и анализ результатов

Ход численного моделирования представляет собой следующую логическую последовательность шагов.

1. Для заданного объёма пучка  $N$  и типа пучка (I или II) волокнам в пучке присваивают случайные значения прочности.

2. Текущей полной нагрузке на пучок присваивают нулевое значение. Множество разрушенных волокон полагают пустым.

3. Если в пучке имеются неразрушенные волокна, упорядочивают значения их прочности по возрастанию. Скачкообразно увеличивают текущее значение полной нагрузки на пучок до  $\nu \cdot \sigma_m$ , где  $\nu$  – текущее число неразрушенных волокон,  $\sigma_m$  – минимальное из значений прочности неразрушенных волокон.

Если неразрушенных волокон в пучке нет, процесс моделирования разрушения считается окончанным.

4. Пока среди неразрушенных волокон имеются перегруженные, последние удаляются из пучка (т.е. присоединяются к множеству разрушенных) с одновременным перерасчётом текущей удельной нагрузки на остальные волокна. Полная нагрузка на пучок в рамках этого цикла остаётся постоянной. Когда перегруженных волокон не остаётся, возвращаются на шаг 3.

По итогам моделирования сохраняется информация о критической удельной нагрузке, последовательных объёмах пакетов, формирующихся на шагах 4, и соответствующих пакетам значениях удельной нагрузки.

Будем графически представлять траекторию возникающего случайного процесса, откладывая по ходу разрушения пучка значения объёмов пакетов по оси ординат, а соответствующие значения удельной нагрузки – по оси абсцисс.

В качестве примера на рис. 1, а приведена типичная траектория возникающего точечного случайного процесса для пучка первого типа (по оси абсцисс – текущая удельная нагрузка, по оси ординат – объёмы фиксируемых пакетов). В данном случае при объёме пучка  $N = 10\,000$  волокон значение критической удельной нагрузки оказалось равным 0,2535, а объём лавины составил волокно. На рис. 1, б приведена частотная диаграмма для объёмов пакетов, зафиксированных в процессе разрушения; их общее число в данном эксперименте составило  $K_b = 3056$ .

Отметим, что отношение  $K_b/N$  во всех проведенных экспериментах оказывалось с весьма малой изменчивостью близким к определенному значению. Например, для пучков первого типа это значение составило приблизительно 31 %. Если последующие исследования модели с различными другими типами распределений прочности волокон приведут к аналогичным результатам, то соответствующие эмпирические оценки суммарного количества пакетов могут быть использованы для



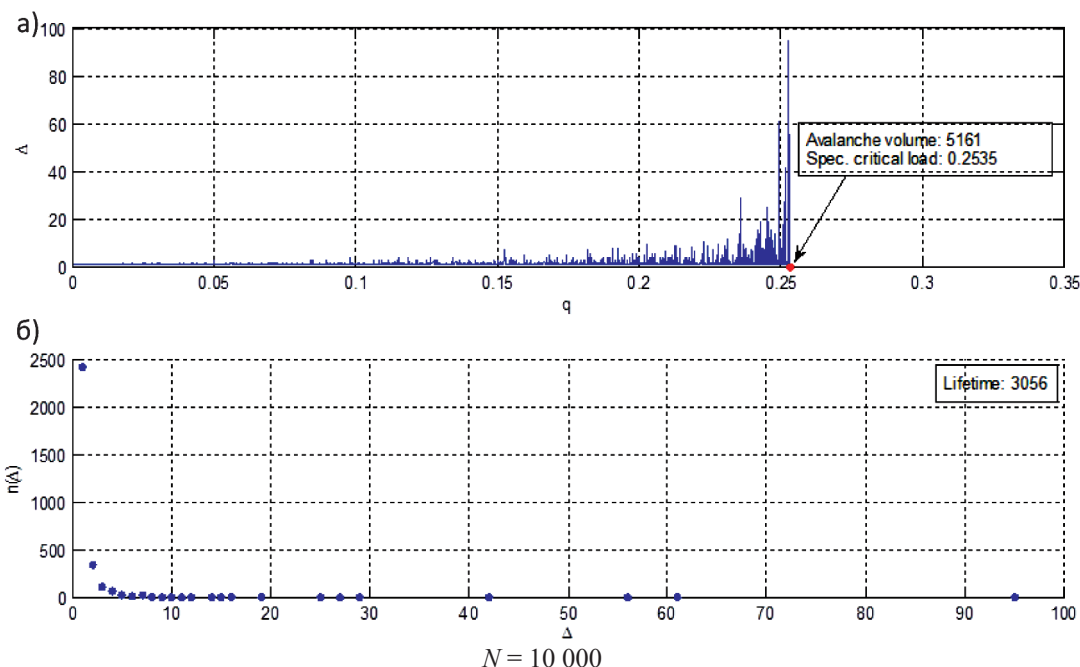


Рис. 1. Результаты численного моделирования разрушения одного пучка: объёмы последовательных пакетов (а), количество зафиксированных пакетов данного объема (б)

предсказания близости лавины в задаче с известной функцией распределения прочности. Найти описание соответствующего аналитического или численного результата в литературе автору не удалось.

Представление частотной диаграммы (рис. 1, б) в логарифмических координатах демонстрирует хорошее соответствие известному асимптотическому соотношению [15]

$$\frac{n(\Delta)}{N} \propto \Delta^{-\frac{5}{2}};$$

где  $n(\Delta)$  – общее число зафиксированных по ходу разрушения пакетов объема  $\Delta$ .

В работе [16] предлагается следующий подход к прогнозированию времени возникновения лавины. Авторы отмечают, что при приближении к коллапсу (т.е. на так называемом предлавином участке) вышеуказанное асимптотическое соотношение трансформируется в

$$\frac{\tilde{n}(\Delta)}{N} \propto \Delta^{-\frac{3}{2}},$$

где  $\tilde{n}(\Delta)$  – общее число зафиксированных на предлавином участке пакетов объема  $\Delta$ . Они предлагают считать изменение оценки показателя степени в выражении  $\Delta^a$  со значений, близких к  $a_1 = -(5/2)$ , на значения, близкие к  $a_2 = -(3/2)$ , указанием на приближение лавины.

Необходимо отметить, однако, что строгое определение предлавиного участка в указанной работе отсутствует, а в своих численных расчетах авторы берут в качестве этого участка такой, в начале которого удельная нагрузка составляла 90 % от критического значения. Поскольку понятие удельной нагрузки не определено в условиях, когда объем пучка неизвестен, данный подход не может быть непосредственно использован для количественного предсказания момента наступления лавины в задаче с неизвестным количеством элементов.



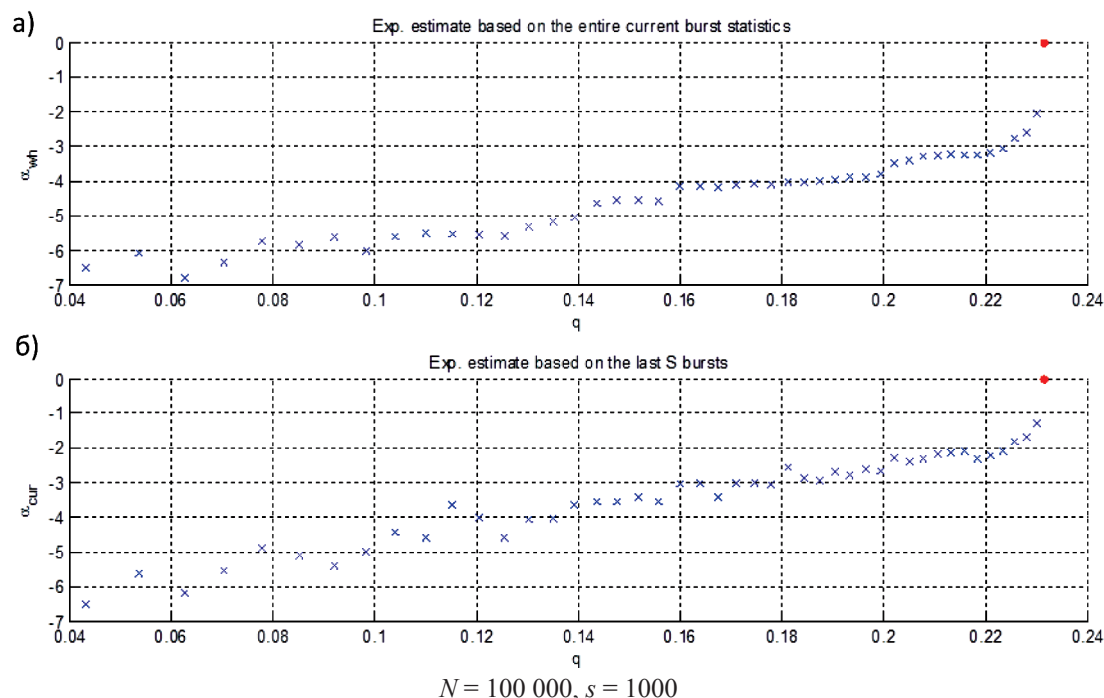


Рис. 2. Оценка показателя степени в законе распределения объемов пакетов в одном эксперименте: по всем зафиксированным к текущему моменту времени пакетам (а), по последним  $s$  зафиксированным пакетам (б)

Попытаемся модифицировать этот подход, используя оценку  $\alpha$  по скользящему временному окну (т.е. по  $s$  последним пакетам, где  $s$  – некоторое наперед заданное число). На рис. 2 приведены результаты численного моделирования разрушения пучка второго типа. Пучок состоит из  $N = 100\,000$  волокон, ширина окна наблюдения составляет  $s = 1000$  пакетов.

При этом на рис. 2, а оценка показателя степени получена с учетом суммарного количества пакетов, зафиксированных с самого начала процесса разрушения, а на рис. 2, б – с учетом количества

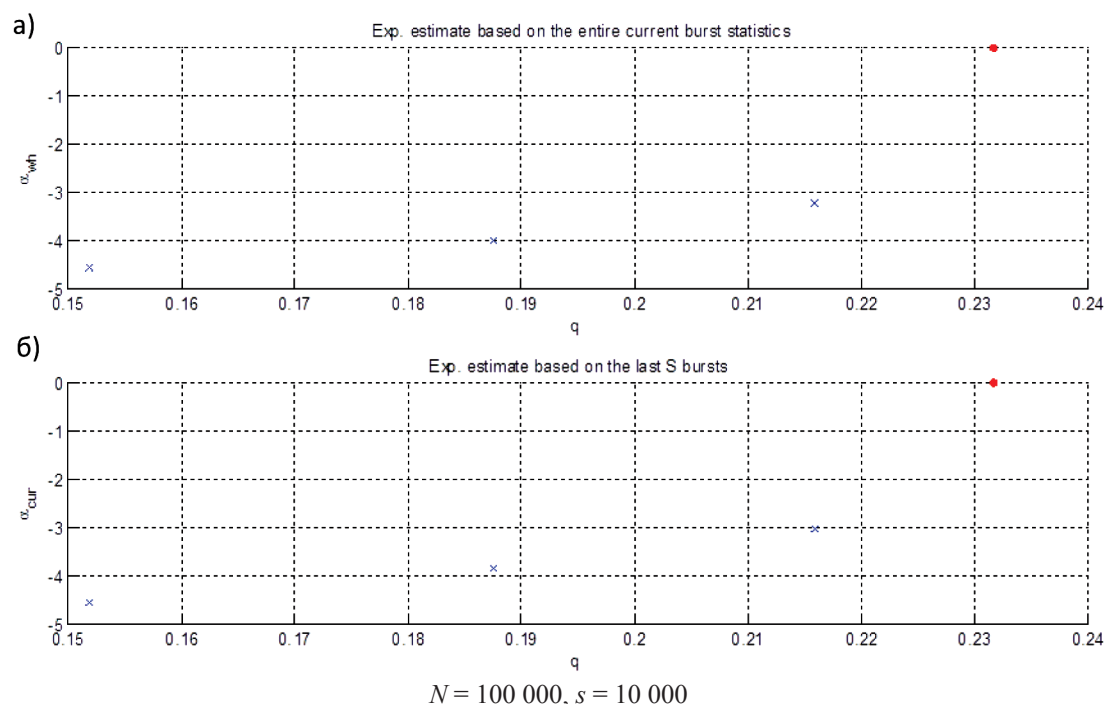


Рис. 3. Оценка показателя степени в законе распределения объемов пакетов в одном эксперименте: по всем зафиксированным к текущему моменту времени пакетам (а), по последним  $s$  зафиксированным пакетам (б)

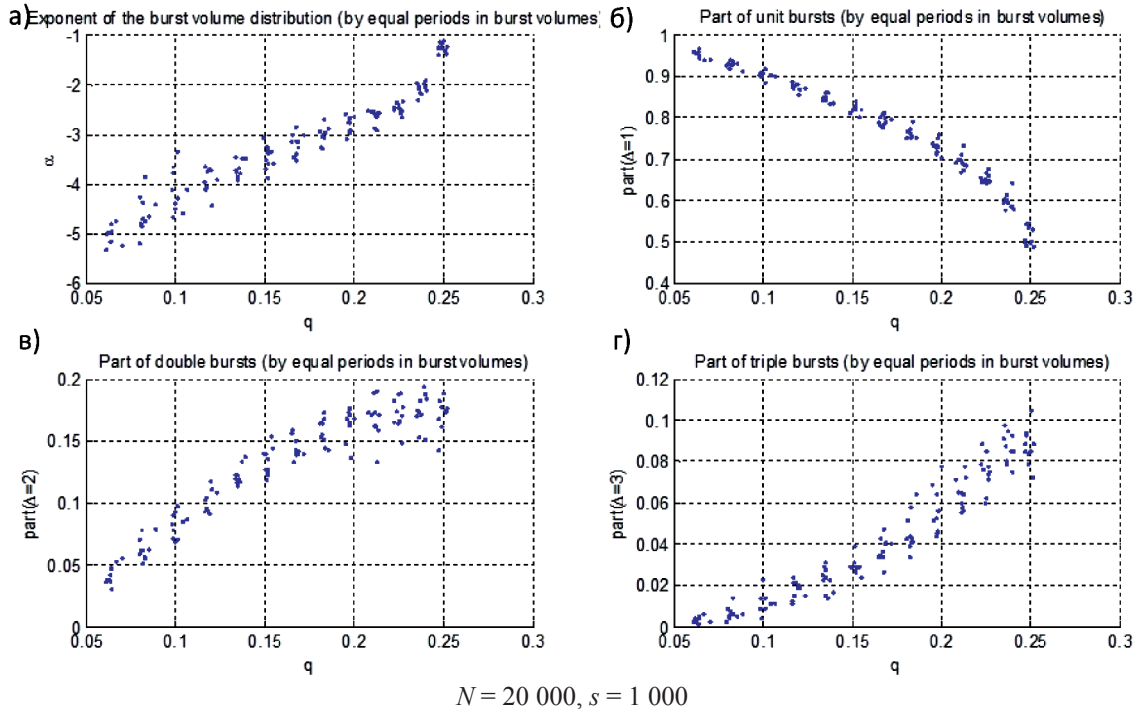


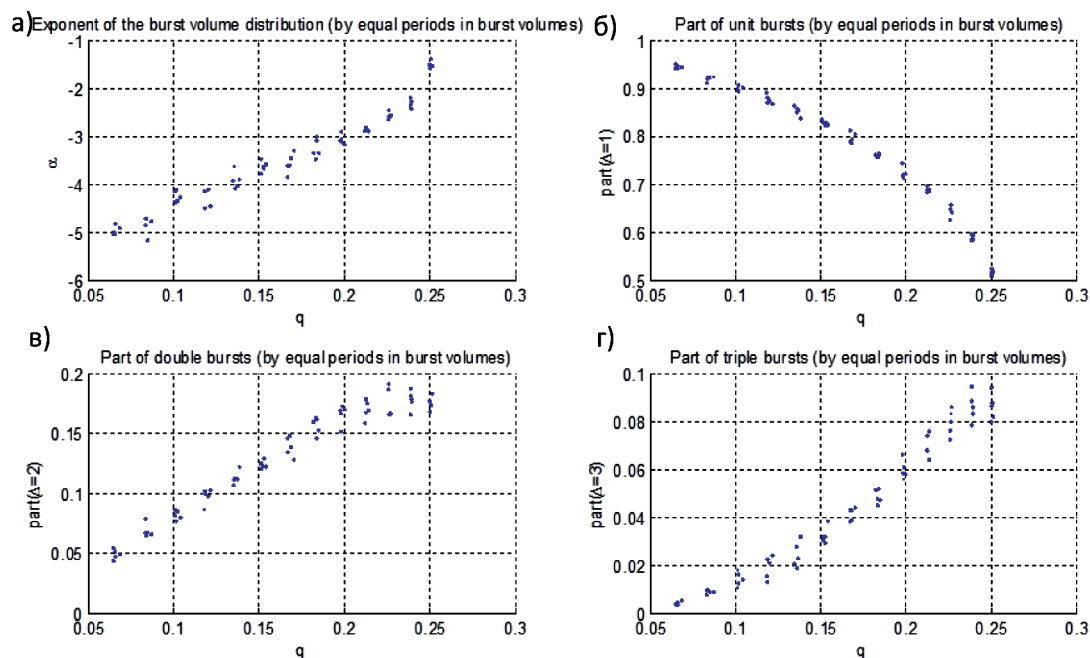
Рис. 4. Результаты численного моделирования разрушения 10 пучков с равномерным распределением прочности волокон: оценка показателя степени в распределении пакетов (а), доля пакетов объема 1 (б), доля пакетов объема 2 (в), доля пакетов объема 3 (г)

пакетов, зафиксированных в пределах текущего окна. Видно, что стабилизация оценки около значения  $a_1$  практически отсутствует, причем в первом случае ситуация существенно хуже. Результаты численных экспериментов показывают, что при больших значениях объема пучка стабилизация если и имеет место, то происходит медленно. Кроме того, переход к значениям показателя, близким к  $a_2$ , происходит без характерного ступенчатого скачка, который позволил бы локализовать момент начала предлавиного участка. Важно, что описанная картина не зависит от размера  $s$  используемого окна. Например, на рис. 3 приведены соответствующие графики для той же реализации процесса разрушения, что и на рис. 2, но при другом значении размера окна:  $s = 10\,000$ .

## Предлагаемая методика предсказания лавины

Более эффективным и одновременно более простым оказывается следующий подход к статистическому анализу процесса разрушения. Зададимся некоторым достаточно большим значением  $s$  ширины скользящего окна. Начиная с пакета под номером  $s$  через каждые  $s/2$  пакетов будем вычислять доли пакетов объема 1, 2 и 3, фиксируемые в текущем окне. Параллельно будем отслеживать оценку вышеупомянутого показателя степени по тем же последним  $s$  пакетам.

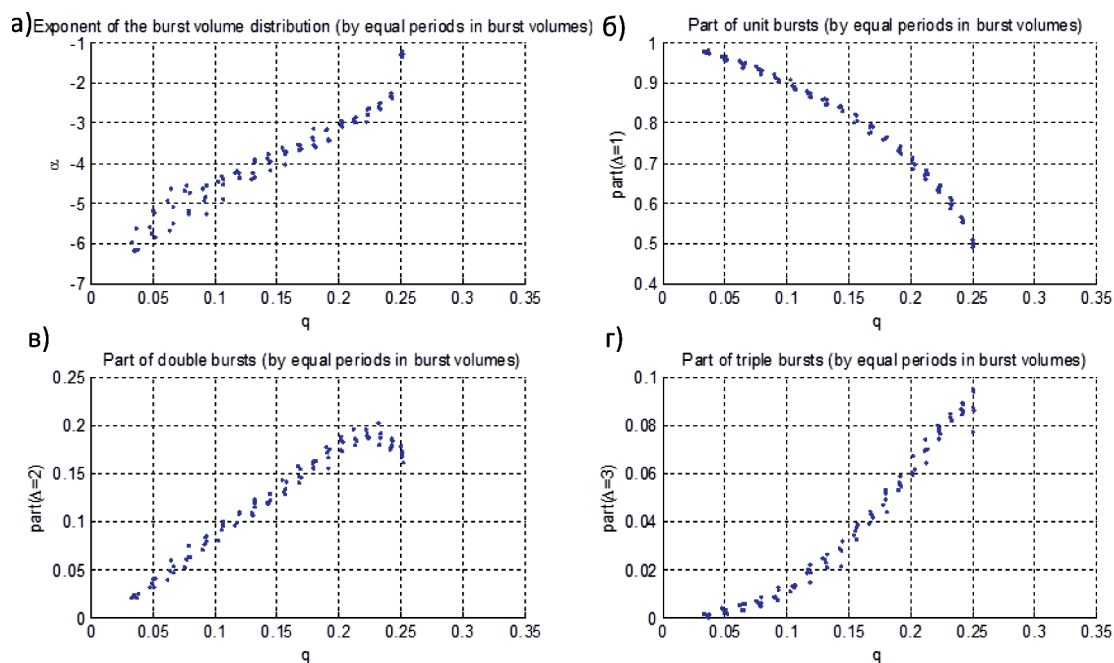
Численный анализ показывает, что получающиеся графики (роль времени, как упоминалось выше, играет текущее значение удельной нагрузки на пучок) обладают свойством универсальности в следующем смысле: их статистическое усреднение, т.е. по итогам независимо проведенных численных экспериментов, есть (при фиксированном типе пучка) траектория, не зависящая ни от объема пучка, ни от размера используемого скользящего окна. На рис. 4, 5 и 6 приведены результаты расчетов по итогам пяти численных экспериментов для каждого из пучков объема  $N = 20\,000$ ,  $50\,000$  и  $100\,000$  соответственно. На соответствующих рис. (а) показаны графики изменения показателя степени  $\alpha$ ; на соответствующих рис. (б) – графики изменения доли пакетов единичного объема относительно общего числа зафиксированных в текущем окне пакетов, на соответствующих



$N = 50\,000, s = 2\,000$

Рис. 5. Результаты численного моделирования разрушения 5 пучков с равномерным распределением прочности волокон: оценка показателя степени в распределении пакетов (а), доля пакетов объема 1 (б), доля пакетов объема 2 (в), доля пакетов объема 3 (г)

рис. (в) – графики изменения доли пакетов объема  $\Delta=2$  и на соответствующих рис. (г) – графики изменения доли пакетов объема  $\Delta=3$ . Каждая точка на рис. 4 – 6 получена по результатам фиксаций в «окне наблюдения», соответственно, из  $s = 1000, 2000$  и  $3000$  последовательных пакетов, при этом сдвиг между окнами составляет  $s/2$  пакетов. По оси абсцисс отложены значения нагрузки, соответствующие последним пакетам в текущем окне.



$N = 100\,000, s = 3\,000$

Рис. 6. Результаты численного моделирования разрушения 5 пучков с равномерным распределением прочности волокон: оценка показателя степени в распределении пакетов (а), доля пакетов объема 1 (б), доля пакетов объема 2 (в), доля пакетов объема 3 (г)

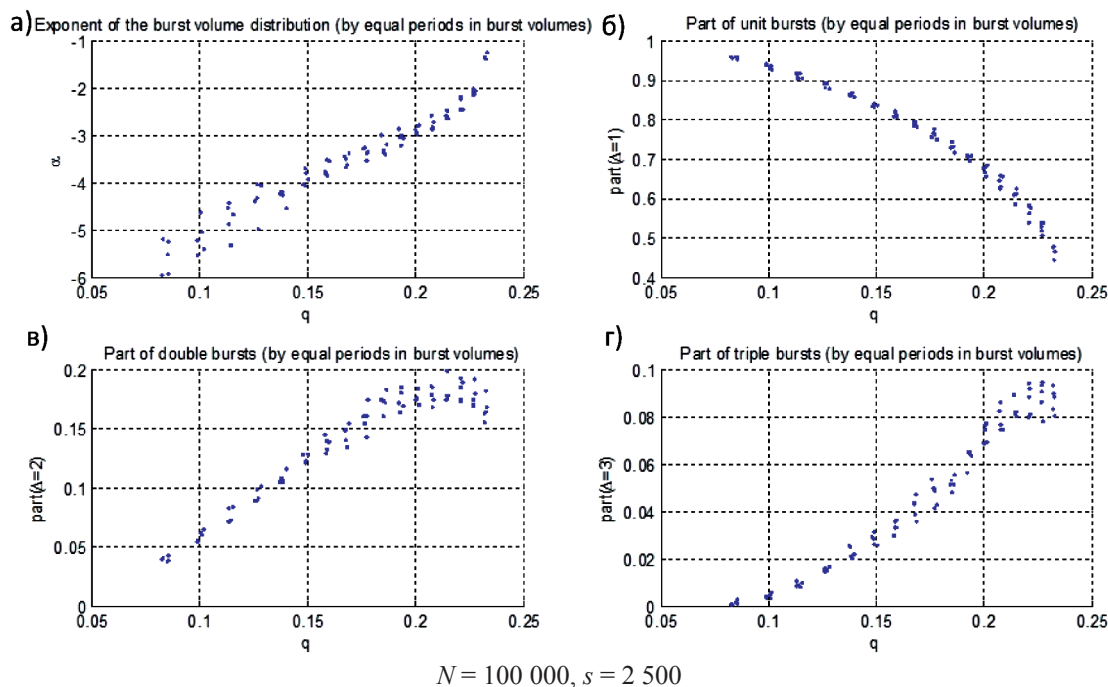


Рис. 7. Результаты численного моделирования разрушения 5 пучков с вейбулловским распределением прочности волокон: оценка показателя степени в распределении пакетов (а), доля пакетов объема 1 (б), доля пакетов объема 2 (в), доля пакетов объема 3 (г)

Видно, что доля пакетов единичного объема значительно убывает со временем, в то время как доли пакетов объема 2 и 3 возрастают по мере приближения системы к коллапсу. Особенно характерной представляется форма графиков для  $\Delta=2$  (рис. (в)): наблюдается устойчивое наличие выраженного максимума доли двойных пакетов незадолго до лавины. Время от прохождения этого максимума до наступления лавины составляет для пучков первого типа в среднем 10 % от полной длительности процесса разрушения.

Важно отметить, что характерные формы соответствующих траекторий типичны и для пучков второго типа. На рис. 7 представлены аналогичные зависимости для случая распределения Вейбулла. Сохраняются как свойства монотонности траекторий, так и относительная величина временной паузы между прохождением максимума доли двойных пакетов и моментом разрушения системы.

В силу описанной универсальности, данное эмпирическое наблюдение может служить одним из критериев предсказания лавины в рассматриваемой модели пучка. Получая в реальном времени (по ходу разрушения) последовательные точки дискретной траектории для  $\Delta=2$ , сигнал о приближении лавины предлагается подавать немедленно после прохождения локального максимума доли двойных пакетов. При этом абсолютную величину времени, оставшегося до лавины, предлагается оценивать (в условиях, когда  $N$  неизвестно, и априори оценить длительность процесса разрушения невозможно) с помощью сравнения формы траекторий для  $\Delta=1,3$ , получаемых в реальном времени, с формой траекторий из модельных примеров. На основании этого сравнения следует производить масштабирование оси абсцисс на обсуждаемых графиках.

Что касается резкого скачка оценки  $\alpha$ , который действительно наблюдается (рис. 4, а; 5, а; 6, а), то он происходит непосредственно перед лавиной и не может помочь предсказать момент наступления коллапса системы с запасом по времени.

## Заключение

В работе на основе статистической обработки результатов численных экспериментов по моделированию процесса разрушения пучка Даниэлса выявлены некоторые закономерности изменения во времени (по мере увеличения нагрузки) доли пакетов разрушений малого объема в общем количестве фиксируемых пакетов. Эмпирически показано, что при достаточно большом размере пучка графики изменения доли пакетов объема  $\Delta=2$  относительно общего числа пакетов, зафиксированных в текущем окне наблюдения, имеют выраженный максимум незадолго до лавины. Предварительные оценки показывают, что участок от точки максимума до момента начала лавины составляет около 10 % от длительности всего процесса разрушения. При этом имеются основания предполагать универсальность данного критерия предсказания лавины в модели пучка, поскольку это значение оказалось одинаковым для обоих типов рассмотренных распределений прочности волокон – равномерного и вейбулловского, и оно реализуется для пучков различного объема и при использовании окон наблюдения различной длины.

Интересной задачей представляется проверка гипотезы о том, что при неограниченном росте объема пучка максимумы будут возникать также и на графиках долей пакетов объема  $\Delta>2$ , причём тем ближе к моменту наступления лавины, чем больше значение  $\Delta$ . Подтверждение этой гипотезы позволило бы выстраивать подобие иерархического плана предсказания коллапса системы.

Среди других возможных направлений дальнейшей работы можно выделить проверку наличия аналогичных закономерностей в более сложных моделях, в частности, моделях пучка с другим типом перераспределения нагрузки, моделях неоднородного пучка (т.е. содержащего различные по статистическим свойствам волокна) [17], иерархических моделях типа деревьев.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 11\_08-01243а.

## Литература

1. Statistical Models for the Fracture of Disordered Media // Ed. H. J. Herrmann and R. Roux. Amsterdam: North-Holland. 1990. 368 p.
2. Zapperi S., Ray P., Stanley H. E., Vespignani A. Avalanches in breakdown and fracture processes // Phys. Rev. E. 1999. V. 59, No. 5. P. 5049–5057.
3. Gabrielov A., Zaliapin I., Newman W.I., Keilis-Borok V.I. Colliding cascades model for earthquake prediction // Geophys. J. Int. 2000. V. 143. P. 427–437.
4. Newman W.I., Turcotte D.L., Gabrielov A.M. Log-periodic behavior of a hierarchical failure model with applications to precursory seismic activation // Phys. Rev. E. 1995. V. 52. No. 5. P. 4827–4835.
5. Moreno Y., Gomez J.B., Pacheco A.F. Instability of scale-free networks under node-breaking avalanches // Eur. Phys. Lett. 2002. V. 58. P. 630.
6. Болотин В.В. Прогнозирование ресурса машин и конструкций. – М.: Машиностроение, 1984. – 312 с.
7. Богданов Дж., Козин Ф. Вероятностные модели накопления повреждений: Пер. с англ. – М.: Мир, 1989. – 344 с.
8. Брагинский А.П. О прогнозировании структурных перестроек в материалах по особенностям коллективного поведения источников акустической эмиссии // Физические аспекты прогнозирования разрушения и деформирования гетерогенных материалов: сб. Л., 1987. С. 55-75.

9. **Еренков О.Ю., Мазин Р.С., Халин А.А., Сушков П.С.** Экспериментальное исследование кинетики процесса разрушения полимерных материалов методом акустической эмиссии. // Изв. ЮЗГУ, № 1 (2011). С. 7-15.
10. **Онищенко Д.А.** Вероятностное моделирование многомасштабного разрушения. // Механика твёрдого тела, № 5 (1999). С. 27-48.
11. **Hemmer P.C., Hansen A., Pradhan S.** Rupture processes in fibre bundle model // Lect. Notes Phys. 2007. V. 705. P. 27–55.
12. **Kun F., Raischel F., Hidalgo R.C., Herrmann H.J.** Extensions of Fibre Bundle Models // Lect. Notes Phys. 2007. V. 705. P. 57–92.
13. **Hidalgo R.C., Kun F., Herrmann H.J.** Bursts in a fiber model with continuous damage. / Phys. Rev. E 2001. V. 64. No. 6 (pt. 2).
14. **Daniels H. E.** The Statistical Theory of the Strength of Bundles of Threads. I. // Proc. Roy. Soc. London 1945 V. A183. P. 405.
15. **Kloster M., Hansen A., Hemmer P.C.** Burst avalanches in solvable models of fibrous materials // Phys. Rev. E 1997. V. 56. P. 2615.
16. **Pradhan S., Hansen A., Hemmer P.C.** Burst Statistics as a Criterion for Imminent Failure // in F.M. Borodich (ed.) IUTAM Bookseries, 1, vol. 10, IUTAM Symposium on Scaling in Solid Mechanics, Springer, 2009.
17. **Herrmann H.J., Kun F., Raischel F.** Some New Results on Fibre Models // Scaling in Solid Mechanics // Ed. F.M. Borodich. Springer Science, 2009. P. 263–272.

**Onischenko D.D.**

## **EMPERICAL TECHNIQUE OF FORECASTING OF LOADED MULTI-ELEMENT SYSTEM COLLAPSE**

*The paper presents a technique of lifetime reliability estimation for a loaded multi-element system, with the estimation being conducted during the failure of the system. The failure process is considered as quasi-static, and as a model example, the Daniels fiber bundle model is used.*

*The method is based on statistical analysis of the burst sequence, where burst is a simultaneous failure of a number of elements under current total load (package of destructions). As the destructions progresses, we register maximum frequencies for bursts of successive sizes (i.e., single, double etc.). This data is used (via "moving window" averaging technique) for the improvement of the statistical estimate of the time remaining to the avalanche and full system collapse.*

*Computer simulation is used to illustrate the performance of the proposed procedure. A comparison of the approach proposed with ones previously suggested by other researchers is presented, and the benefits of the new technique are shown.*

**Keywords:** *quasi-static failure, multi-element system, Daniels fiber bundle, lifetime, avalanche, burst statistics, moving window.*

### **Introduction**

The task of forecasting collapse coming (full destruction) for a loaded multi-element system is faced and found in its different variations in many areas of physics (models of non-uniform environments' destruction), technical equipment and engineering modeling, and on essentially various spatial and time scales (see, for example, [1]). Seismic and volcanic activity, various models of electromechanical systems, destruction of materials at operation of engineering systems and designs represent characteristic examples [2-5]. The situation when it is a question of forecasting a system resource at its designing stage is widely presented in the literature [6-7]. However, special interest is represented with cases when it is required to give the time forecasting of collapse coming directly in process of destruction progression based on supervision over system behavior.

Generally, the collapse is preceded with the period of gradual degradation of a system, expressed in consecutive destructions of separate elements. At the same time, there are both single and group destructions. The problem of localization of large group destructions (as potential sources of an avalanche origin) in investigated system can be solved, for example, by means of diverse methods of acoustical emission [8-9]. On the other hand, in some cases (for example, at fulfillment of any conditions of system uniformity), it is possible to attempt making conclusions about its affinity to a collapse based on the analysis of

only one sequence of separate intermediate events of simultaneous destruction of elements, not being interested with spatial characteristics of these events. Many works relating to this subject has been devoted to studying of various discrete probabilistic models, among which modifications of a fiber bundle model are basic [10-12]. Models of continuous destruction [13] have been also investigated.

The present paper offers the technique related to dynamic, real time forecasting of the moment of a system final destruction coming under effect of increasing loading. The given technique is illustrated by an example of initial fiber bundle model [14], which is usually named as Daniels fiber bundle. The illustration is based on results of study of numerical experiments. Beside the description of the model and its numerical realization, the definition of characteristics used for the analysis of the system (current condition during the process of destruction stages on which there is an affinity to collapse system) and results of computer modeling are presented. The basic attention is given to the frequency change analysis of fixing group destructions of a small volume. Comparison of the offered technique with the approaches suggested earlier by other authors has been carried out.

## Problem statement

First, let us give the brief description of considered classical model, Daniels fiber bundle, underlying in numerous models that are more complex. It is a question of fiber bundle mathematical model – the system consisting of  $N$  parallel fibers, fixed with both ends in such a manner that lengthening of all fibers under stretching loading imposed to a bundle are identical. The positive number, which reflects fiber strength, is appointed to each fiber. This number represents the minimal value of stretching longitudinal load under which the fiber collapses. Fibers are considered statistically identical and it is assumed, that the law of strength distribution as random variable is the same for all fibers in a bundle and it is described by some distribution function  $F_x, x \geq 0$ .

It is supposed that the stretching longitudinal load applied to the fiber bundle monotonously increases from zero value. By virtue of accepted assumptions loading is evenly distributed between fibers.

Actually, we deal with an abstract mathematical model in which external loading is evenly distributed between all efficient system elements. Further, for convenience we shall use the term “fiber bundle” for the designation of the specified model.

We shall name a fiber as overloaded one if the load in the fiber is equal to its strength or surpasses it. At modeling process of bundle destruction when the fiber appears overloaded, it is removed from the bundle (it collapses), and the total loading on the bundle is evenly redistributed between the remained fibers. Loading process is considered in quasi-static statement: removal of the overstressed (overloaded) fibers and load redistribution at constant current general load is considered as instant event and comes to an end, when there are no more overstressed fibers. Only after that, if there were not removed fibers, the monotonous load increases continue at a bundle.

The latter we shall name as a collapsed bundle when all fibers are removed from it. We shall name critical load a such value of bundle loading at which last fiber has collapsed. The value of critical load related to initial number of fibers  $N$ , we shall name critical specific load  $q_{br}$ .

Next, we shall name a package of destructions (or simply a package) a set of the fibers, which have collapsed simultaneously, that is at the same load applied to a bundle. Characteristics of a package are its sequence number (within the limits of current process of destruction), volume (amount of the collapsed fibers) and load value at which there was a destruction of fibers from the given package. Last package (after which the bundle is completely collapsed) we shall name an avalanche.



Let us formulate the following general problem: to estimate dynamically, i.e. on a course of a bundle destruction, time which has remained before an avalanche. More strictly, it is required to estimate a sequence number of an avalanche in sequences of packages and critical specific load according to some initial site of destruction process. It is evident, that the longer this initial site, then the obtained estimations, generally speaking, will be more accurate. At the same time, the signal about avalanche approach was to be received “not too late”. The latter characteristic can be specified in various ways.

## Planning of numerical experiment

Bundle volume of  $N$  and strength distribution function of fibers  $F_x$  are two parameters of the formulated problem. Further, results of the numerical analysis of considered model are presented in the work for various values  $N$  and the two types of strength distribution: uniform on a segment  $[0; 1]$  (for which average strength value and its dispersion are equal accordingly to  $1/2$  and  $1/12$ ); two-parametrical Weibull distribution with the same average strength value and dispersion. In the, we shall name these two types as the first type and the second type accordingly.

The following result has been obtained in the fundamental work [14]: critical specific load asymptotically at  $N \rightarrow \infty$  normally represents distributed random variable with known average strength value and dispersion. The first is equal to maximal value of function

$$q_x = x(1 - F_x),$$

and the second one asymptotically converges to 0. In particular, for two specified types of strength distribution corresponding to average values of critical specific load is an essence  $q_1^* = 0,25$  and  $q_2^* \approx 0,23$  accordingly.

The important, but elementary remark consists in the fact that at known  $N$  and  $F_x$  the specified task of forecasting of an avalanche is reduced to standard construction of a confidential interval. However in practice the basic interest represents research of a case when there is no opportunity of load measurement, and only effects of local destructions (packages) are registered. Besides, a bundle volume is also usually unknown.

At carrying out of numerical experiment, we shall be limited by the case when external load onto a bundle increases proportionally to time. At the same time we have the following from the given above definitions: sequence number value of a package or the load value corresponding to the given package can be chosen in considered statement as discrete analogue of time. In general, process of destruction is completely described by two sequences: volumes of consecutive packages and values of load corresponding to them. Accordingly, during numerical modeling these sequences make the output information on results of each separate experiment. The analysis of statistical characteristics of destruction process is made on the accumulated data, and the basic attention is given to studying shares of packages' variability of various volume in process of development of destruction process and to search of possible regularities.

## Realization and analysis of results

The course of numerical modeling represents the following logic sequence of steps.

1. Bundle fibers are bind with random strength value for the specified bundle volume  $N$  and bundle type (I or II).
2. Zero value is bind to the current full load on a bundle. Set of the destroyed fibers is assumed empty.

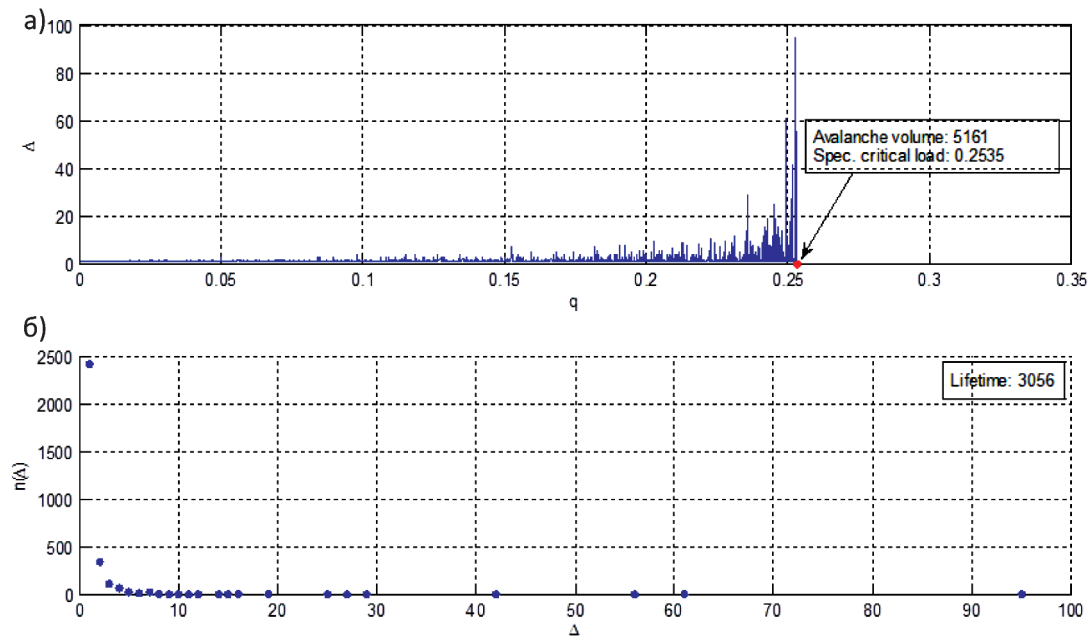


Fig. 1. Results of numerical modeling of destruction of one bundle: volumes of consecutive packages (a), amount of recorded packages of the given volume (b)

3. If in a bundle, there are not destroyed fibers; values of their strength are ordered according to their increase. Current value of full load on a bundle is increased abruptly up to  $v \cdot \sigma_m$ , where  $v$  is the current number of not destroyed fibers,  $\sigma_m$  is the minimal of strength values from not destroyed fibers. If not destroyed bundle fibers are not present, process of destruction modeling is considered to be over.

4. While not destroyed fibers are available among overstressed ones, the latter are removed from a bundle (i.e. they are joined to the set of destroyed fibers) with simultaneous recalculation of current specific load on other fibers. Full load on a bundle within the limits of this cycle remains constant. When there are no overstressed fibers, you should come back to the step 3.

On results of modeling the information on critical specific stress, consecutive volumes of the packages formed on step 4, and values of specific load corresponding to packages are saved.

Let us represent graphically a trajectory of arising random process, setting aside on a course of bundle destruction the value of packages' volumes along Y-axis, and corresponding values of specific load along abscissa axis.

As an example, the typical trajectory of arising point random process for a bundle of the first type (along abscissa axis – current specific stress, and along Y-axis – volumes of registered packages) is shown in Fig. 1, a. In this case the value of critical specific load has appeared equal to 0,2535 and the avalanche volume has made 5161 fibers at bundle volume equal to  $N=10\,000$  fibers,. The frequency diagram for volumes of packages recorded during destruction is presented in Fig. 1, b; their total number in the given experiment has made  $K_b=3056$ .

It should be noted that relation  $K_b N$  in all fulfilled experiments has appeared with rather small variability close to the certain value. For example, for bundles of the first type this value has made approximately 31%. If the subsequent researches of model with various other types of strength distributions of fibers lead to similar results, then corresponding empirical estimations of total amount of packages can be used for forecasting of an avalanche affinity in the problem with known function of strength distribution. The author of this paper could not find the description of corresponding analytical or numerical result in the available literature.

Representation of the frequency diagram (Fig. 1, b) in logarithmic coordinates shows good conformity with known asymptotic relation [15]

$$n(\Delta) N \propto \Delta^{-5/2},$$

where  $n(\Delta)$  is the total number of recorded packages of volume  $\Delta$  on a course of destruction.

The following approach to forecasting time of an avalanche occurrence is offered in the investigation [16]. Authors mark that at approach to collapse (i.e. on the so-called prior to avalanche segment) the above-stated asymptotic relation is transformed into the following expression

$$n(\Delta) N \propto \Delta^{-3/2},$$

where  $n(\Delta)$  is the total number of recorded packages of volume  $\Delta$  recorded on prior to avalanche segment. They suggest to consider change of exponent estimation in expression  $\Delta^\alpha$  from values close to  $\alpha_1 = -5/2$ , onto the values close to  $\alpha_2 = -3/2$  as the indication of avalanche approach.

It is necessary to note, however, that strict definition of a prior to avalanche segment in the specified in the mentioned above work is absent, and in the numerical calculations authors take as this segment such a segment in the beginning of which specific load made 90 % from its critical value. As the concept of specific load is not defined in conditions when the bundle volume is unknown, the given approach cannot be directly used for a quantitative forecasting of the moment of an avalanche approach in any problem with unknown amount of elements.

Let us try to modify this approach, using the estimation  $\alpha$  on sliding time window (i.e. according to last packages  $s$ , where  $s$  is some number set beforehand). Fig. 2 presents the results of numerical modeling of bundle destruction of the second type. The bundle consists of fibers equal to  $N=100\,000$ , the width of a supervision window makes  $s=1\,000$  packages.

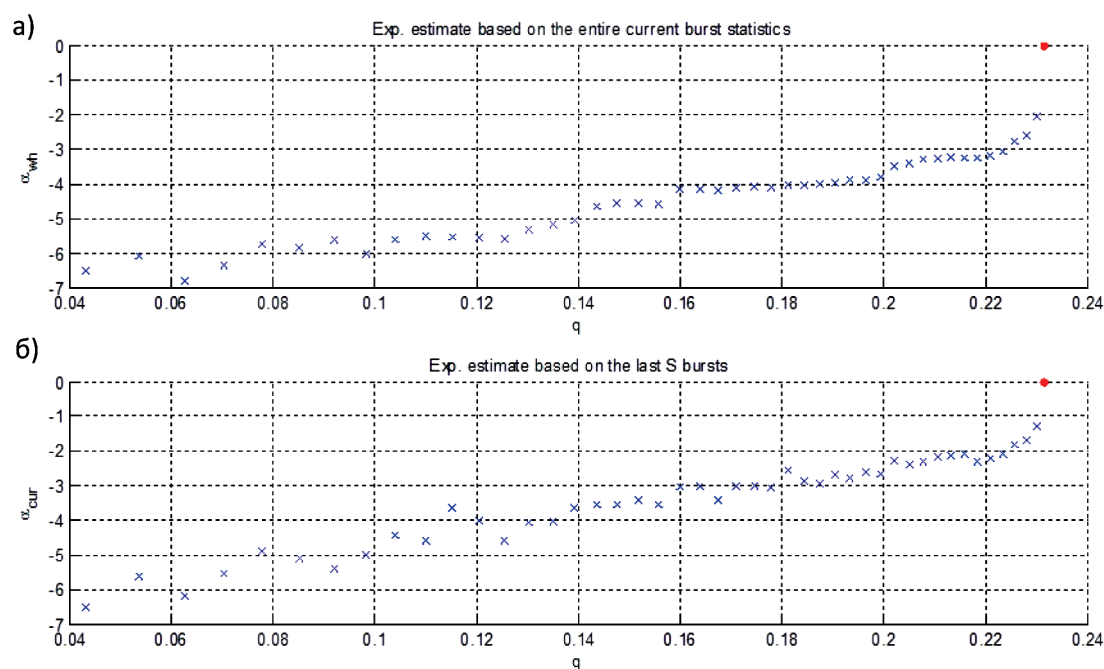


Fig. 2. Estimation of an exponent in the law of distribution of volumes of packages in one experiment: on all fixed{recorded} to a present situation of time to packages (), on the last  $s$  to the fixed{recorded} packages ()

At the same time the estimation of an exponent shown in Fig. 2,a is received in view of total amount of the packages recorded from the very beginning of destruction process, and in Fig. 2,b – in view of amount of recorded packages within the limits of current window. It is obvious, that stabilization of estimations near to the value  $\alpha_1$  practically are absent, and in the first case the situation is essentially worse. Results of numerical experiments show, that at larger values of a bundle volume the stabilization is going on slowly if at all. Besides, transition to exponent values close to  $\alpha_2$ , occurs without characteristic step jump which would allow to localize the moment of the beginning of prior to avalanche segment. It is important, that the described picture does not depend on the size  $s$  of a used window. For example, corresponding diagrams for the same realization of destruction process are shown in Fig. 3 which are presented in Fig. 2, but at other value of the window size:  $s=10\,000$ .

### Offered technique of an avalanche forecasting

The following approach to the statistical analysis of destruction process appears more effective and simultaneously simpler. Let us set some sufficiently great value of width  $s$  for a sliding window. Beginning with package under number  $s$  through every  $s/2$  packages we shall calculate portions of packages of volume 1, 2 and 3, registered in the current window. In parallel, we shall trace an estimation of above-mentioned exponent according to the same last  $s$  packages.

The numerical analysis shows, that obtained diagrams (the role of time as it was mentioned above, plays the current value of specific load on a bundle) possess feature of universality in the following sense. Their statistical averaging, i.e. according to results of independently carried out numerical experiments, (at the fixed bundle type) is a trajectory, not dependent neither from bundle volume nor from the size of used sliding window. Results of calculations according to outcomes of five numerical experiments for each bundle of volume  $N=20\,000$ ,  $50\,000$  and  $100\,000$  accordingly are shown on fig. 4, 5 and 6. Diagrams of change of the exponent  $\alpha$  are shown on corresponding fig. (a). Diagrams of change of packages' portions for individual volume concerning the total number of packages recorded in the current window are shown in corresponding Fig. (b). Diagrams of change of packages' portions for unit volume packages in

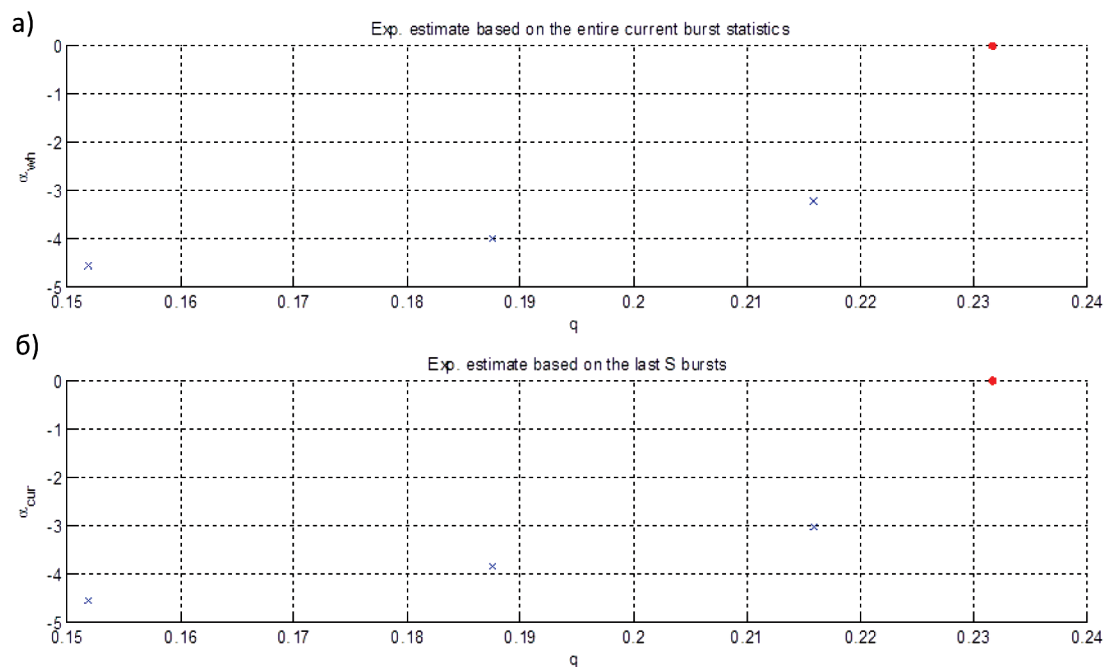


Fig. 3. Estimation of an exponent in the law of distribution of volumes of packages in one experiment: on all fixed {recorded} to a present situation of time to packages ( $\times$ ), on the last  $s$  to the fixed {recorded} packages ( $\bullet$ )

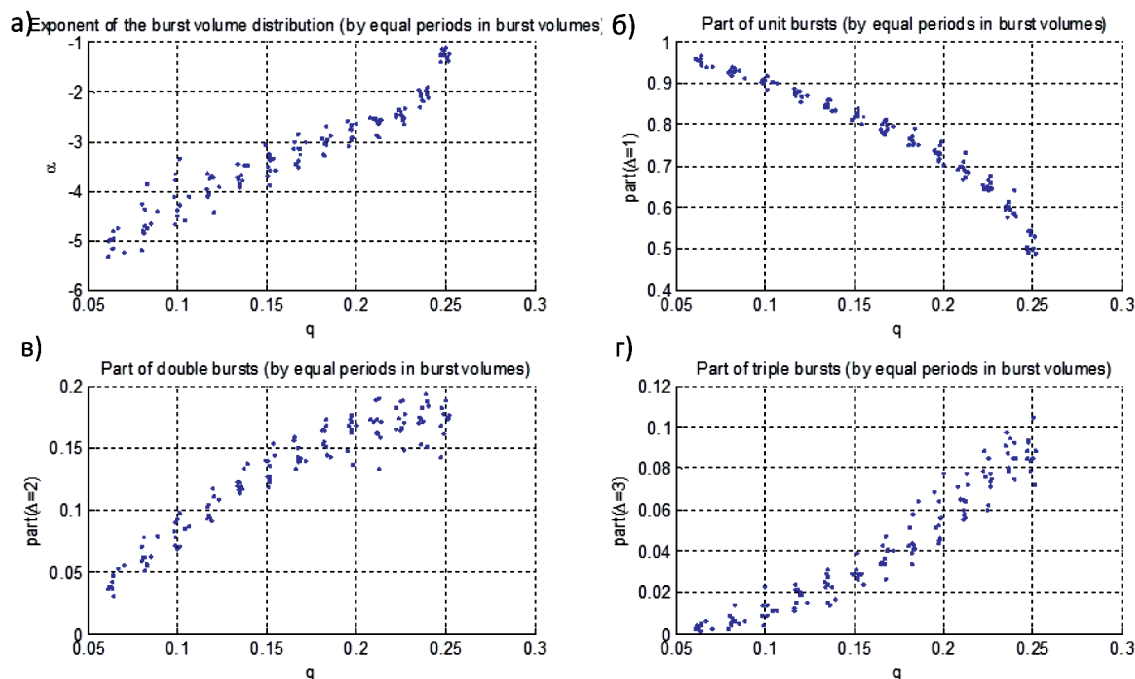


Fig. 4. Results of numerical modelling of destruction of 10 bundlees {beams} with uniform distribution of durability of fibres:  
 Estimation of an exponent in distribution of packages ( $\alpha$ ),  
 Share of packages of volume 1 ( $\text{part}(\lambda=1)$ ), a share of packages of volume 2 ( $\text{part}(\lambda=2)$ ), a share of packages of volume 3 ( $\text{part}(\lambda=3)$ )

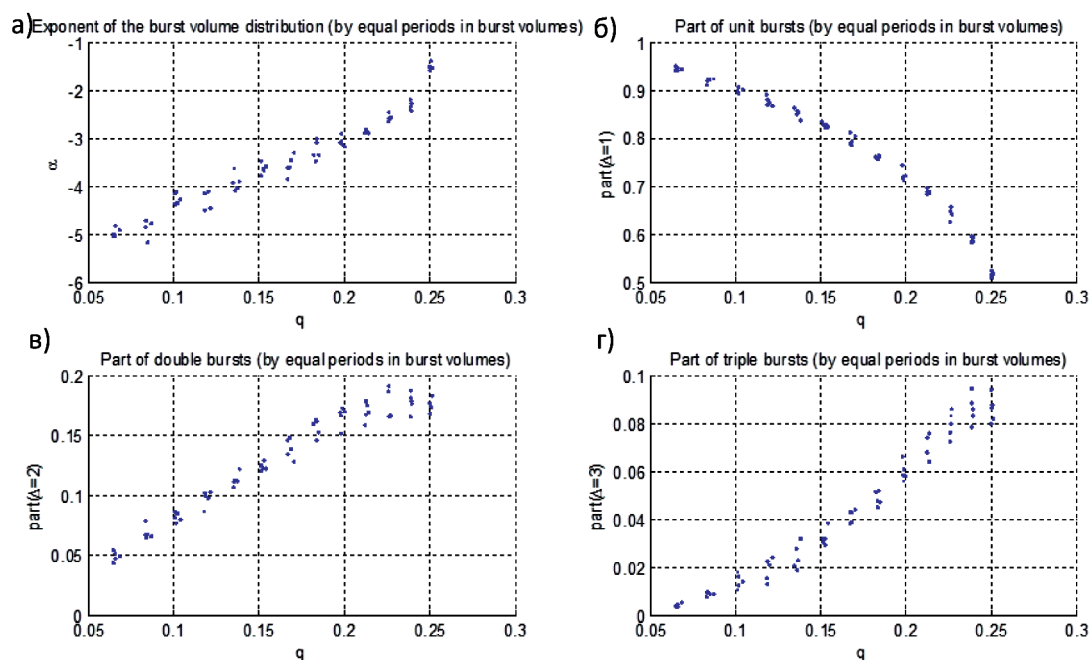


Fig. 5. Results of numerical modelling of destruction of 5 bundlees {beams} with uniform distribution of durability of fibres:  
 Estimation of an exponent in distribution of packages ( $\alpha$ ),  
 Share of packages of volume 1 ( $\text{part}(\lambda=1)$ ), a share of packages of volume 2 ( $\text{part}(\lambda=2)$ ), a share of packages of volume 3 ( $\text{part}(\lambda=3)$ )

relation of volume  $\Delta=2$  are shown in corresponding Fig. (c). Diagrams of change of packages' portions for individual volume packages in relation of volume  $\Delta=3$  are shown in corresponding Fig. (d). Each point in Fig. 4 – 6 has been obtained by results of recording in “observation window” from  $s=1000, 2000$  and  $3000$  consecutive packages accordingly, thus shift between windows makes  $s/2$  packages. Values of load corresponding to the last packages in the current window are put on X-axis.

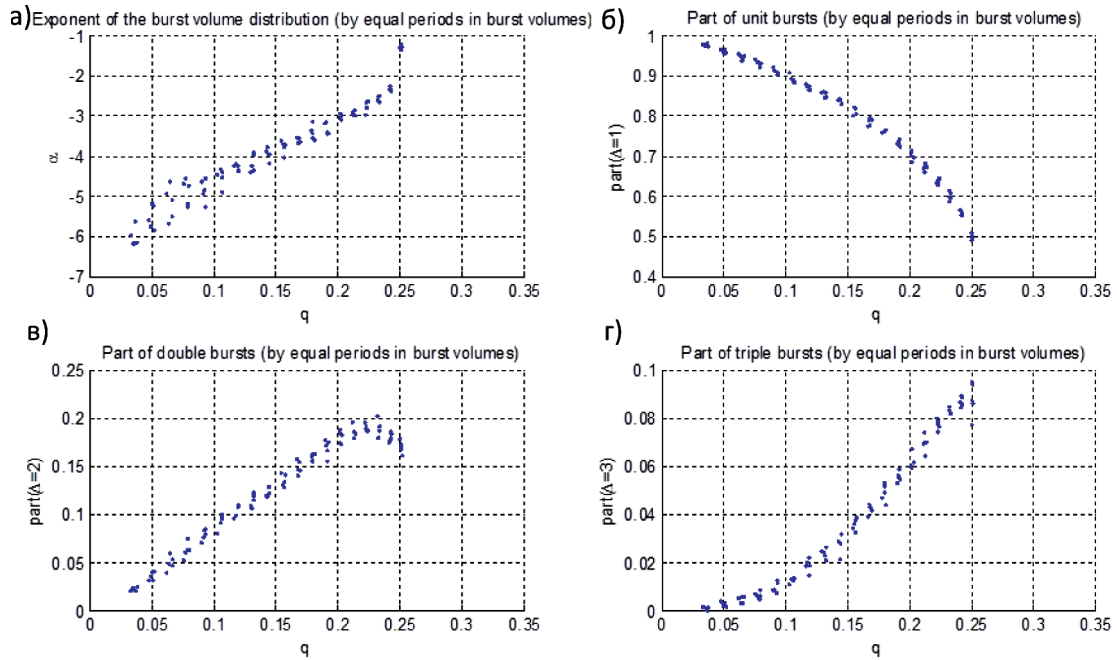


Fig. 6. Results of numerical modelling of destruction of 5 bundlees {beams} with uniform distribution of durability of fibres:  
 Estimation of an exponent in distribution of packages ( $\alpha$ ),  
 Share of packages of volume 1 ( $\text{part}(\lambda=1)$ ), a share of packages of volume 2 ( $\text{part}(\lambda=2)$ ), a share of packages of volume 3 ( $\text{part}(\lambda=3)$ )

It is visible, that portion of unit volume packages significantly decreases in due course while portion of packages with volume 2 and 3 increase in process of system approach to the total collapse. The form of diagrams for  $\Delta=2$  (Fig. (b)) is especially characteristic. One can observe steady presence of the marked maximum of double packages' portion shortly before an avalanche. Time from passage of this maximum before an avalanche occurs makes on the average 10 % from full duration of destruction process for fiber bundles of the first type.

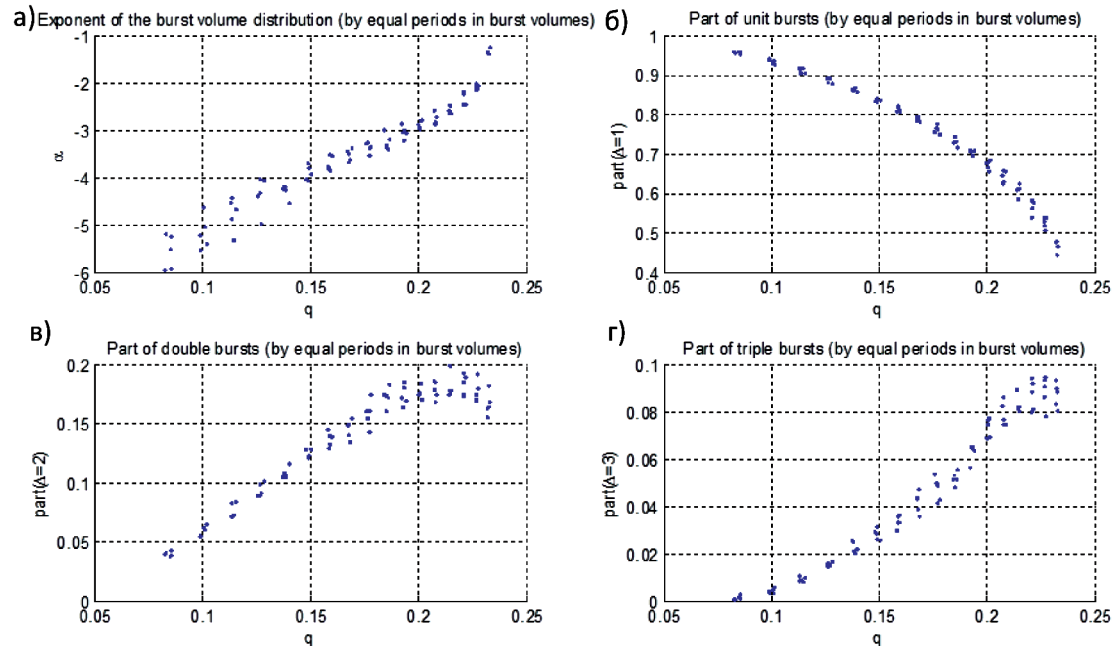


Fig. 7. Results of numerical modelling of destruction of 5 bundlees {beams} with weibull distribution of durability of fibres: an estimation of a parameter  
 Degrees in distribution of packages ( $\alpha$ ), a share of packages of volume 1 ( $\text{part}(\lambda=1)$ ),  
 Share of packages of volume 2 ( $\text{part}(\lambda=2)$ ), a share of packages of volume 3 ( $\text{part}(\lambda=3)$ )

It is important to note, that characteristic forms of corresponding trajectories are also typical for fiber bundles of the second type. Similar dependences for the case of Weibull distribution are presented in Fig. 7. Properties of trajectories' monotony and relative size of time pause between passage of maximum of double packages' portion and the moment of system collapse are held true for fiber bundles of the second type.

Under the described universality, the given empirical observation can serve as one of criteria of an avalanche forecasting in considered bundle model. At receiving in real time (on a course of destruction) points of discrete trajectory for  $\Delta=2$ , it is offered to initiate warning about avalanche approach immediately after passage of a local maximum of double packages' portion. In addition to that, absolute size of time which has remained up to an avalanche, is offered to estimate (in conditions when  $N$  is not known, and estimation of destruction process duration a priori is impossible) by comparison of the form of trajectories for  $\Delta=1, 3$ , received in real time, with the form of trajectories obtained from modeling examples. Based on the comparison it is necessary to make scaling of X-axis on discussed diagrams.

As to sharp jump of estimated value  $\alpha$ , which is really observed (Fig. 4,a; 5,a; 6,a), it occurs directly ahead of an avalanche and cannot help to forecast the moment of system collapse approach with reserve of time.

## The conclusion

The investigation based on statistical processing of numerical experiments' results on modeling process of Daniels fiber bundle destruction some regularities relating change in time (in process of load increase) of destruction packages' portion of small volume in total of registered packages have been revealed. It is empirically shown, that at sufficiently big size of a bundle, change diagrams in packages' portion of volume  $\Delta=2$  in relation to the total number of packages recorded in the current observation window, have the marked maximum shortly before an avalanche. Preliminary estimations show, that the section from a point of maximum till the moment of avalanche beginning makes about 10 % of the total destruction process duration. In addition to that there are bases to assume universality of the given criterion of an avalanche forecasting in fiber bundle model as this value has appeared identical to both types of considered strength distributions of fibers – uniform and Weibull distributions, and it is realized for bundles of various volume and at use of observation windows of various length.

An interesting problem consists in check of hypothesis that at unlimited growth of a bundle volume, maxima will arise also on diagrams of packages' portion of volume  $\Delta>2$ , and the bigger the value  $\Delta$  is, the closer we are to the moment of an avalanche. Confirmation of this hypothesis would allow building similarity of the hierarchical plan for system collapse forecasting.

Among other possible directions of further work, it is possible to single out checking of similar regularities in more complex models, in particular, bundle models with other types of load redistribution, models of non-uniform bundle (i.e. containing fibers with various statistical properties) [17], hierarchical models of tree type.

## References

1. Statistical Models for the Fracture of Disordered Media // Ed. H. J. Herrmann and R. Roux. Amsterdam: North-Holland. 1990.368 p.
2. Zapperi S., Ray P., Stanley H.E., Vespignani A. Avalanches in breakdown and fracture processes // Phys. Rev. E. 1999. V. 59, No. 5. P. 5049-5057.

3. **Gabrielov A., Zaliapin I., Newman W.I., Keilis-Borok V.I.** Colliding cascades model for earthquake prediction // *Geophys. J. Int.* 2000. V. 143. P. 427-437.
4. **Newman W.I., Turcotte D.L., Gabrielov A.M.** Log-periodic behavior of a hierarchical failure model with applications to precursory seismic activation // *Phys. Rev. E.* 1995. V. 52. No. 5. P. 4827-4835.
5. **Moreno Y., Gomez J.B., Pacheco A.F.** Instability of scale-free networks under node-breaking avalanches // *Eur. Phys. Lett.* 2002. V. 58. P. 630.
6. **Bolotin V.V.** Resource forecasting of machinery and engineering designs. -M.: Mechanical engineering, 1984. – 312 p.
7. **Bogdanoff J., Kozin F.** Probabilistic models of damages' accumulation: Tr. from English – M.: the World, 1989. – 344 p.
8. **Braginsky A.P.** About forecasting structural reorganizations in materials according to features of collective behavior of acoustical emission sources // *Physical aspects of forecasting of destruction and deformation of heterogeneous materials: collection of publications*, 1987. p. 55-75.
9. **Erenkov O.Y., Mazin R.S., Khalin A.A., Sushkov P.S.** Experimental research of kinetics process of polymeric materials' destruction by acoustical emission method. // *Proceedings of USGU*, # 1 (2011). p. 7-15.
10. **Onischenko D.A.** Probabilistic modeling of multiscale destruction. // *Mechanics of rigid bodies*, # 5 (1999). p. 27-48.
11. **Hemmer P.C., Hansen A., Pradhan S.** Rupture processes in fiberbundle model // *Lect. Notes Phys.* 2007. V. 705. P. 27-55.
12. **Kun F., Raischel F., Hidalgo R.C., Herrmann H.J.** Extensions of FiberBundle Models // *Lect. Notes Phys.* 2007. V. 705. P. 57-92.
13. **Hidalgo R.C., Kun F., Herrmann H.J.** Bursts in a fiber model with continuous damage. / *Phys. Rev. E* 2001. V. 64. No. 6 (pt. 2).
14. **Daniels H.E.** The Statistical Theory of the Strength of Bundles of Threads. I. // *Proc. Roy. Soc. London* 1945 V. A183. P. 405.
15. **Kloster M., Hansen A., Hemmer P.C.** Burst avalanches in solvable models of fibrous materials <[http://pre.aps.org/abstract/PRE/v56/i3/p2615\\_1](http://pre.aps.org/abstract/PRE/v56/i3/p2615_1)> // *Phys. Rev. E* 1997. V. 56. P. 2615.
16. **Pradhan S., Hansen A., Hemmer P.C.** Burst Statistics as a Criterion for Imminent Failure // in F.M. Borodich (ed.) *IUTAM Bookseries*, 1, vol. 10, *IUTAM Symposium on Scaling in Solid Mechanics*, Springer, 2009.
17. **Herrmann H.J., Kun F., Raischel F.** Some New Results on FiberModels // *Scaling in Solid Mechanics* // Ed. F.M. Borodich. Springer Science, 2009. P. 263-272.



**Ахрамович И.Л., Когут С.А., Терещенко Ф.В.**

## **МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОЖИДАЕМОЙ СТОИМОСТИ ГАРАНТИЙНЫХ ОБЯЗАТЕЛЬСТВ ПРЕДПРИЯТИЯ-ИЗГОТОВИТЕЛЯ**

*Разработана методика определения ожидаемых издержек предприятия-изготовителя на гарантийное обслуживание изделий. Показано, как рассчитать затраты на гарантийный ремонт с учётом интенсивности отказов радиоэлектронной аппаратуры изделия на этапе проектирования и заложить их в структуру цены изделия, исходя из продолжительности гарантийных обязательств. Оценив ожидаемую стоимость ремонтов изделия за период гарантийных обязательств, можно сократить затраты предприятия-изготовителя, создав резерв средств на гарантийное обслуживание, позволяющий сэкономить на налоге на прибыль.*

**Ключевые слова:** гарантийные обязательства, стоимость ремонта, отказ, интенсивность отказов, радиоэлектронная аппаратура, резерв средств, налог.

### **Введение**

Как известно, на выпускаемую предприятиями отечественной промышленности радиоэлектронную аппаратуру (РЭА) устанавливаются определенные гарантийные обязательства, то есть за установленный этими обязательствами период предприятие-изготовитель должно быть готово устранить за свой счёт недостатки в результатах выполненных ранее работ.

В соответствии с ГОСТ РВ 15.306-2003 гарантийные обязательства – это обязательства поставщика, подрядчика гарантировать заказчику (потребителю) соответствие качества поставляемых изделий, выполняемых работ (услуг) нормам, установленным техническими условиями, стандартами и (или) условиями контракта в течение определенного времени (гарантийного срока, гарантийной наработки) и безвозмездно и в установленные гарантийными обязательствами сроки устранять дефекты изделий (работ), выявленные в гарантийный период посредством ремонта или замены дефектных изделий (составных частей) при соблюдении потребителем оговариваемых условий эксплуатации (использования), хранения, транспортирования [1].

Однако стоимость этих гарантийных обязательств зачастую отсутствует в структуре цены изготавливаемых предприятиями изделий. В этом случае денежные средства на гарантийное обслуживание изготовленных ранее изделий и составных частей берутся из прибыли предприятия либо

из средств, выделенных на другие заказы, при этом нередко случаи, когда на однотипные изделия устанавливаются различные гарантийные сроки, причём эти сроки могут меняться в разы.

Из-за отсутствия единой методики оценки стоимости гарантийных обязательств никто заранее не подсчитывал затраты предприятий-изготовителей на гарантийное обслуживание.

В настоящей работе сделана попытка оценить стоимость гарантийных обязательств с учетом интенсивности отказов составных частей изготавливаемых изделий и продолжительности этих обязательств, а также рассмотрены варианты создания на предприятиях резервов средств на гарантийные ремонты, причем средства, находящиеся в этих резервах, в соответствии с Налоговым Кодексом Российской Федерации, не облагаются налогом на прибыль.

## 1. Оценка стоимости гарантийных обязательств при единых гарантийных сроках составных частей изделия

Изделия, выпускаемые предприятиями, состоят, как правило, из покупных составных частей (СЧ) и СЧ собственного изготовления, при этом гарантийные сроки, установленные на эти СЧ, могут как совпадать, так и быть различными.

Рассмотрим первый вариант, когда гарантийный срок выпускаемого изделия ( $T_{Г\text{ изд}}$ ) совпадает с гарантийным сроком покупных СЧ ( $T_{Г\text{ СЧ пок}}$ ), входящих в изделие.

В этом случае ожидаемая стоимость ремонтов изделия (издержек предприятия) за время гарантийных обязательств ( $C_{ГР\text{ изд}}$ ) определяется по формуле (1):

$$C_{ГР\text{ изд}} = \left[ \sum_{i=1}^m C_{ГРi} \cdot (r_{РАБi} + r_{ХРi}) \right] \cdot T_{Г\text{ изд}} \quad (1)$$

где  $C_{ГРi}$  (руб.) – средняя стоимость одного гарантийного ремонта (замены) СЧ собственного изготовления  $i$ -го типа, определяется экспертным методом по результатам эксплуатации аналогичных СЧ (исходя из практики, значение  $C_{ГРi}$  обычно составляет 30 – 50% стоимости СЧ  $i$ -го типа);

$T_{Г\text{ изд}}$  (лет) – гарантийный срок (гарантийный срок службы) изделия, заданный в технических условиях (ТУ);

$r_{РАБi}$  и  $r_{ХРi}$  – ожидаемое за один год гарантийных обязательств суммарное количество отказов СЧ собственного изготовления  $i$ -го типа в период работы изделия и его хранения соответственно.

Значения  $r_{РАБi}$  и  $r_{ХРi}$  соответственно определяются по формулам (2) и (3):

$$r_{РАБi} = A \cdot N_i \cdot \lambda_i \cdot Q, \quad (2)$$

$$r_{ХРi} = 0,02 \cdot A \cdot N_i \cdot \lambda_i (1 - Q), \quad (3)$$

где  $Q$  – коэффициент технического использования изделия. В соответствии с ГОСТ Р 27.002-2009 это доля нахождения изделия в работоспособном состоянии относительно общей продолжительности эксплуатации в заданном интервале времени, включая все виды технического обслуживания [2]. Значение  $Q$  определяется из заданных в ТТЗ требований на изделие, либо по результатам эксплуатации аналогов;

$\lambda_i$  (1/ч) – интенсивность отказов СЧ собственного изготовления  $i$ -го типа. Определяется расчётным методом на этапах технического проектирования или рабочей КД и приведена в расчётах надёжности (может также определяться по техническим условиям на СЧ);

$N_i$  – количество СЧ собственного изготовления  $i$ -го типа;

$A$  – количество часов в году, равное 8760 ч.

Примечание: коэффициент 0,02 в формуле (3) получен в результате сравнения базовой ( $\lambda_0$ ) интенсивности отказов РЭА и интенсивности отказов хранения ( $\lambda_{xp}$ ), приведённых в справочнике 22 ЦНИИ МО РФ 2006 г., и является отношением интенсивности отказов выключенной РЭА к включенной.

Выражение, приведённое в формуле (1), можно значительно упростить, если при расчетах принять допущение, что средняя стоимость одного гарантийного ремонта СЧ собственного изготовления одинакова для всех типов СЧ.

В таком случае величину  $C_{ГР\ изд}$  можно определить по формуле (4):

$$C_{ГР\ изд} = C_{ГР} \cdot (r_{РАБ} + r_{ХР}) \cdot T_{Г\ изд}, \quad (4)$$

где  $C_{ГР}$  – средняя стоимость одного гарантийного ремонта СЧ собственного изготовления;

$r_{раб}$  и  $r_{хр}$  – ожидаемое за один год гарантийных обязательств суммарное количество отказов всех СЧ собственного изготовления в период работы и хранения соответственно.

Значения  $r_{раб}$  и  $r_{хр}$  определяются по формулам (5) и (6):

$$r_{раб} = A \cdot \lambda_{\Sigma} \cdot Q, \quad (5)$$

$$r_{хр} = 0,02 \cdot A \cdot \lambda_{\Sigma} (1 - Q), \quad (6)$$

$\lambda_{\Sigma}$  – суммарная интенсивность отказов всех СЧ собственного изготовления, определяется по формуле (7):

$$\lambda_{\Sigma} = \sum_{i=1}^m \lambda_i \cdot N_i. \quad (7)$$

## 2. Оценка стоимости гарантийных обязательств при различии в гарантийных сроках составных частей изделия

Теперь рассмотрим второй вариант – когда гарантийный срок выпускаемого изделия ( $T_{Г\ изд}$ ) больше гарантийного срока покупных СЧ ( $T_{Г\ СЧ\ пок}$ ), входящих в состав изделия. В этом случае ожидаемая стоимость ремонтов изделия (издержек предприятия) за время гарантийных обязательств определяется по формуле (8):

$$C_{ГР\ изд} = \left[ \sum_{i=1}^m C_{ГРi} \cdot (r_{РАБi} + r_{ХРi}) \right] \cdot T_{Г\ изд} + \left[ \sum_{j=1}^k C_{ГРj} \cdot (r_{РАБj} + r_{ХРj}) \right] \cdot (T_{Г\ изд} - T_{Г\ СЧ\ пок}), \quad (8)$$

где  $C_{ГРj}$  (руб.) – средняя стоимость одного гарантийного ремонта (замены) покупной СЧ  $j$ -го типа, определяется экспертным методом по результатам эксплуатации аналогичных СЧ;

$T_{Г\ СЧ\ пок}$  (лет) – гарантийный срок (гарантийный срок службы), заданный на покупную СЧ;  
 $r_{раб\ j}$  и  $r_{хр\ j}$  – ожидаемое за один год гарантийных обязательств суммарное количество отказов покупных СЧ  $j$ -го типа в период работы и хранения соответственно.

Значения  $r_{раб\ j}$  и  $r_{хр\ j}$  определяются по формулам (9) и (10):

$$r_{раб\ j} = A \cdot N_j \cdot \lambda_j \cdot Q, \quad (9)$$

$$r_{хр\ j} = 0,02 \cdot A \cdot N_j \cdot \lambda_j (1 - Q), \quad (10)$$

где  $\lambda_j$  – интенсивность отказов покупной СЧ  $j$ -го типа, определяется из технических условий (ТУ);  
 $N_j$  – количество покупных СЧ  $j$ -го типа.

Процентное соотношение величины  $C_{ГР\ изд}$  к стоимости изготовления изделия ( $C_{ИЗГ\ изд}$ ) определяется по формуле (11):

$$\Delta(\%) = \frac{C_{ГР\ изд}}{C_{ИЗГ\ изд}} \cdot 100\%. \quad (11)$$

### Пример расчёта ожидаемой стоимости гарантийного обслуживания изделия

#### Задача:

Определить значения ожидаемой стоимости гарантийных ремонтов изделия ( $C_{ГР\ изд}$  (руб.)) и процентное соотношение этой стоимости к стоимости изготовления изделия ( $\Delta(\%)$ ) изделия при требуемом заказчиком сроке гарантийного обслуживания, равном  $T_{Г\ изд} = 1, 2, 3, 4$  и 5 лет.

#### Исходные данные:

Коэффициент технического использования изделия  $Q = 0,47$  по требованиям ТТЗ;

Средняя стоимость изготовления изделия  $C_{ИЗГ\ изд} = 8632678$  руб.;

Средняя стоимость изготовления одной СЧ изделия равна 24317 руб.;

Все СЧ, входящие в состав изделия – собственного изготовления.

#### Расчёт:

По формуле (7) определяется  $\lambda_{\Sigma} = \sum_{i=1}^m \lambda_i \cdot N_i = 2458,3864 \cdot 10^{-6}$ , при расчёте  $\lambda_{\Sigma}$  значения  $\lambda_i$  и  $N_i$  получены из расчёта надёжности на изделие.

По формулам (5) и (6) определяются значения

$$r_{раб.} = A \cdot \lambda_{\Sigma} \cdot Q = 8760 \cdot 2458,3864 \cdot 10^{-6} \cdot 0,47 \approx 11$$

$$r_{хр} = 0,02 \cdot A \cdot \lambda_{\Sigma} \cdot (1 - Q) = 0,02 \cdot 8760 \cdot 2458,3864 \cdot 10^{-6} \cdot (1 - 0,47) \approx 1.$$

Значение  $C_{ГР}$  определяется экспертным методом как половина средней стоимости изготовления одной СЧ изделия:

$$C_{ГР} = 24317 \text{ руб.} \cdot 0,5 \approx 12160 \text{ руб.}$$

Значения  $C_{ГР\ изд}$  и  $\Delta(\%)$  определяются соответственно по формулам (4) и (11)

$$C_{ГР\ изд} = C_{ГР} \cdot (r_{РАБ} + r_{ХР}) \cdot T_{Г\ изд} = 12160 \cdot T_{Г} \cdot (11 + 1) = 145920 T_{Г}$$

$$\Delta(\%) = \frac{C_{ГР\ изд}}{C_{ИЗГ\ изд}} \cdot 100\% = \frac{145920 \cdot T_{Г}}{8632678} \cdot 100\%.$$

Полученные значения величин  $C_{ГР\ изд}$  и  $\Delta(\%)$  для  $T_{Г\ изд} = 1, 2, 3, 4$  и  $5$  лет приведены в таблице 1.

Таблица 1

| Заданные значения $T_{Г\ изд}$ | Полученные значения  |              |
|--------------------------------|----------------------|--------------|
|                                | $C_{ГР\ изд}$ (руб.) | $\Delta(\%)$ |
| 1 год                          | 145920               | 1,69         |
| 2 года                         | 291840               | 3,38         |
| 3 года                         | 437760               | 5,07         |
| 4 года                         | 583680               | 6,76         |
| 5 лет                          | 729600               | 8,45         |

### 3. Гарантийное обслуживание с точки зрения налогового законодательства

Оценив ожидаемую стоимость ремонтов изделия за время гарантийных обязательств, можно сделать вывод о том, что исполнение этих обязательств после сдачи изделия заказчику повлечёт значительные материальные расходы.

Чтобы сократить затраты на гарантийное обслуживание, сэкономив на налоге на прибыль, предприятие-изготовитель вправе создать резерв средств на гарантийный ремонт [3]. Данное право закреплено в пункте 1 статьи 267 «Расходы на формирование резерва по гарантийному ремонту и гарантийному обслуживанию» Налогового Кодекса Российской Федерации (НК РФ), а также в соответствии с подпунктом 13 пункта 2 статьи 149 «Операции, не подлежащие налогообложению (освобождаемые от налогообложения)» НК РФ не подлежит налогообложению реализация на территории РФ услуг, оказываемых без взимания дополнительной платы по ремонту и техническому обслуживанию продукции в период гарантийного срока её эксплуатации, включая стоимость запасных частей для неё и деталей к ней.

Правила формирования резерва устанавливаются согласно пункту 3 статьи 267 НК РФ. Расходами на гарантийное обслуживание признаются суммы отчислений в резерв на дату реализации продукции предприятия-изготовителя. Размер созданного резерва не может превышать предельного размера, определяемого как доля фактически осуществлённых налогоплательщиком расходов по гарантийному ремонту и обслуживанию в объёме выручки от реализации продукции за предыдущие три года, умноженная на сумму выручки от реализации продукции за отчётный (налоговый) период.

В случае, если налогоплательщик менее трёх лет осуществляет реализацию изготовленной им продукции с условием осуществления гарантийного ремонта и обслуживания, для расчёта предельного размера создаваемого резерва учитывается объём выручки от реализации этой продукции за фактический период такой реализации.

Налогоплательщик, ранее не осуществлявший реализацию своей продукции с условием гарантийного ремонта и обслуживания, вправе создавать резерв по гарантийному ремонту и обслуживанию в размере, не превышающем ожидаемых расходов на указанные затраты.

Кроме того, сумма резерва по гарантийному ремонту и обслуживанию, не полностью использованная налогоплательщиком в налоговом периоде на осуществление ремонта изготовленной им продукции, реализованной с условием предоставления гарантии, может быть перенесена им на следующий налоговый год [4].

## Заключение

Методика позволяет:

- определить ожидаемую стоимость ремонтов (издержек предприятия) за время гарантийных обязательств и процентное соотношение этой стоимости к стоимости изготовления изделия;
- аргументированно закладывать в структуру цены изделия денежные средства на гарантийное обслуживание, а главное, закладывать эти средства исходя из продолжительности срока гарантийных обязательств;
- оценив ожидаемые издержки на ремонт по гарантиям, помогает создать на предприятии не облагаемый налогом на прибыль резерв средств на гарантийное обслуживание изделий.

## Литература

1. ГОСТ РВ 15.306–2003 Система разработки и постановки продукции на производство. Военная техника. Обязательства гарантийные. Основные положения.
2. ГОСТ Р 27.002–2009 Надёжность. Термины и определения.
3. **Васильев Ю.А.** Создание и использование резерва на проведение гарантийного ремонта. – Консалтинговая группа «АЮДАР»: Журнал «Строительство: Бухгалтерский учёт и налогообложение» – 2009, №10.– 80 с.
4. Налоговый Кодекс Российской Федерации (с изменениями на 21 апреля 2011).

**Akhramovich I.L., Kogut S.A., Tereschenko F.V.**

## **METHODS FOR DEFINING OF A MANUFACTURER'S WARRANTY EXPECTED COSTS**

*The paper presents the methods for defining a manufacturer's expected costs for warranty maintenance of products. It is shown how to calculate the cost of warranty repairs, with the failure rate of radio-electronic equipment at the design phase taken into account, and put them into the structure of a product's price, with the duration of warranty borne in mind. Having estimated the expected cost of warranty, a manufacturer can reduce costs by making a reserve fund for warranty service that allows saving money on profit tax.*

**Keywords:** warranty, repair cost, failure, failure rate, radio-electronic equipment, reserve fund, profit tax.

### **Introduction**

It is known that some warranty has to cover radio-electronic equipment produced by the Russian industry, so a manufacturer shall be obliged to eliminate drawbacks in previous services for the defined term.

According to GOST RB 15.306-2003, warranty is a supplier's (contractor's) obligation to guarantee to the customer (consumer) that the quality of products (services) supplied is in compliance with the standards, specified technical conditions and (or) contract's provisions during the defined term (warranty period), and the obligation to eliminate, gratis and within the term specified by the warranty, the defects of products (services) revealed during the warranty period by repairing or replacing defective products (components), provided that the consumer follows the specified conditions of operation (use), keeping and transporting [1].

However, the cost of warranty obligations is often not included into the structure of the price of products produced by manufacturers. In this case the funds required for warranty repairs are taken from a company's profit or the funds allocated to other orders. On top of that, warranty periods can vary quite significantly – sometimes radically – for products of the same type.

Since there are no common methods for estimating warranty expected costs, none has calculated a manufacturer's costs for warranty maintenance beforehand.

In this paper we have attempted to estimate costs of warranty obligations, with the failure rate of components of manufactured products and the duration of these obligations taken into account. We have also studied models for making reserve funds by manufacturers for warranty maintenance, referring to the fact that according to the Russian Tax Code, funds put in these reserves are not taxable.

## 1. Estimation of warranty obligations cost in case of common warranty periods of a product's components

Products generally consist of commercially available off-the-shelf (COT) items and locally produced items, and their warranty periods can be either similar or different.

Let us study the first case when the warranty periods are similar.

In this case the warranty repair expected cost (a manufacturer's expenditures) over the warranty period ( $C_{ГР\ изд}$ ) is defined by the following formula (1):

$$C_{ГР\ изд} = \left[ \sum_{i=1}^m C_{ГРi} \cdot (r_{ПАБi} + r_{ХРi}) \right] \cdot T_{Г\ изд}, \quad (1)$$

where  $C_{ГРi}$  (rubles) is the average cost of single warranty repair of the  $i$ -th locally produced item and defined by the expert method upon results of operation of identical items (as practice shows, the value  $C_{ГРi}$  usually makes up about 30-50% of the cost of the  $i$ -th item);

$T_{Г\ изд}$  (years) is the warranty period (warranty service period) of a product specified by Technical Conditions;

$r_{ПАБi}$  and  $r_{ХРi}$  is the total number of the  $i$ -th locally produced item's failures expected for one year of warranty obligations during the operation and keeping of the item respectively.

Values of  $r_{ПАБi}$  и  $r_{ХРi}$  are defined by formulas (2) and (3) respectively:

$$r_{ПАБi} = A \cdot N_i \cdot \lambda_i \cdot Q, \quad (2)$$

$$r_{ХРi} = 0,02 \cdot A \cdot N_i \cdot \lambda_i (1 - Q), \quad (3)$$

$Q$  is the coefficient of the technical use of the product. According to GOST R 27.002-2009, it is the proportion of a product's availability in relation to the total operation period within the specified time interval, including all types of technical maintenance [2]. The value of  $Q$  is defined by the technical requirements for a product fixed in the technical specification or upon results of testing analogous products;

$\lambda_i$  (1/time) is the failure rate of the  $i$ -th locally produced item. It is defined by the calculation method at the stage of technical design or technical specifications and specified in reliability calculations (can be also defined by the technical conditions for items);

$N_i$  is the total number of the  $i$ -th locally produced item;

$A$  is the number of hours in a year (equals to 8760);

Note: The coefficient 0.02 in the formula (3) is a result of comparison of the basic failure rate ( $\lambda_0$ ) of radio-electronic equipment and the failure rate of storage ( $\lambda_{xp}$ ), specified in Guide 22 TSNII MO RF dated 2006, and equals to the correlation between the failure rates of radio-electronic equipment in off and on modes.

The expression in formula (1) can be significantly simplified if we assume for calculations that the average cost of single warranty repair is similar for all types of locally produced items.



In this case the value of  $C_{\Gamma \text{ изд}}$  can be defined by the following formula (4):

$$C_{\Gamma \text{ изд}} = C_{\Gamma \text{ п}} \cdot (r_{\text{паб}} + r_{\text{xp}}) \cdot T_{\Gamma \text{ изд}}, \quad (4)$$

where  $C_{\Gamma \text{ п}}$  is the average cost of the warranty repair of a single locally produced item;  
 $r_{\text{паб}}$  и  $r_{\text{xp}}$  is the total number of a locally produced item's failures expected for one year of warranty obligations during the operation and keeping of the item respectively.

The values of  $r_{\text{паб}}$  и  $r_{\text{xp}}$  are defined by formulas (5) and (6):

$$r_{\text{паб}} = A \cdot \lambda_{\Sigma} \cdot Q, \quad (5)$$

$$r_{\text{xp}} = 0,02 \cdot A \cdot \lambda_{\Sigma} (1 - Q), \quad (6)$$

$\lambda_{\Sigma}$  is the total number of a locally produced item's failure rate which is defined by formula (7):

$$\lambda_{\Sigma} = \sum_{i=1}^m \lambda_i \cdot N_i. \quad (7)$$

## 2. Estimation of warranty obligations cost in case of differences in warranty periods of a product's components

Now let us consider the second variant when the warranty period of a final product is longer than the warranty period of its component parts. In this case the expected cost of repairs during the warranty period is defined by formula (8):

$$C_{\Gamma \text{ изд}} = \left[ \sum_{i=1}^m C_{\Gamma \text{ п} i} \cdot (r_{\text{паб} i} + r_{\text{xp} i}) \right] \cdot T_{\Gamma \text{ изд}} + \left[ \sum_{j=1}^k C_{\Gamma \text{ п} j} \cdot (r_{\text{паб} j} + r_{\text{xp} j}) \right] \cdot (T_{\Gamma \text{ изд}} - T_{\Gamma \text{ ЧЧ пок}}), \quad (8)$$

where  $C_{\Gamma \text{ п} j}$  (rubles) is the average cost of a single warranty repair (replacement) of the  $j$ -th purchased component part, which is defined by the expert method upon results of the operation of analogous items;

$T_{\Gamma \text{ ЧЧ пок}}$  (years) is the warranty period (warranty service period) specified for a purchased component part;

$r_{\text{паб} j}$  и  $r_{\text{xp} j}$  is the total number of the  $j$ -th locally produced item's failures expected for one year of warranty obligations during the operation and keeping of the item respectively.

The values of  $r_{\text{паб} j}$  и  $r_{\text{xp} j}$  are defined by formulas (9) и (10):

$$r_{\text{паб} j} = A \cdot N_j \cdot \lambda_j \cdot Q, \quad (9)$$

$$r_{\text{xp} j} = 0,02 \cdot A \cdot N_j \cdot \lambda_j (1 - Q), \quad (10)$$

where  $\lambda_j$  is the failure rate of the  $j$ -th locally produced item, which is defined by the technical conditions;  
 $N_j$  is the number of purchased  $j$ -th component parts.

The percent correlation of  $C_{ГП изд}$  to  $C_{ИЗГ изд}$  is defined by formula (11):

$$\Delta(\%) = \frac{C_{ГП изд}}{C_{ИЗГ изд}} \cdot 100\%. \quad (11)$$

### The example of calculation of the expected cost of the warranty service of an item

#### Task

To define the value of the expected cost of warranty repairs ( $C_{ГП изд}$  (rubles)) and the percent correlation between this cost and the production cost ( $\Delta(\%)$ ), with the warranty period required by a customer being equal  $T_{Г изд} = 1, 2, 3, 4$  and 5 years.

#### Source data

The technical use coefficient  $Q = 0.47$  (according to specification requirements);

The average production cost  $C_{ИЗГ изд} = 8632678$  rubles;

The average production cost of a locally produced component part equals to 24317 rubles;

All the components of the item are locally produced.

#### Calculation

Using formula (7), we define  $\lambda_{\Sigma} = \sum_{i=1}^m \lambda_i \cdot N_i = 2458.3864 \cdot 10^{-6}$ , where the values  $\lambda_i$  and  $N_i$  are defined by calculation of the reliability of an item.

Using formulas (5) and (6), we calculate

$$r_{\text{паб.}} = A \cdot \lambda_{\Sigma} \cdot Q = 8760 \cdot 2458.3864 \cdot 10^{-6} \cdot 0.47 \approx 11$$

$$r_{\text{xp}} = 0.02 \cdot A \cdot \lambda_{\Sigma} \cdot (1-Q) = 0.02 \cdot 8760 \cdot 2458.3864 \cdot 10^{-6} \cdot (1 - 0.47) \approx 1$$

The value of  $C_{ГП}$  is defined by the expert method as the half of the average production cost of an item's single locally produced component part:

$$C_{ГП} = 24317 \text{ rubles} \cdot 0.5 \approx 12160 \text{ rubles}.$$

The values of  $C_{ГП изд}$  and  $\Delta(\%)$  are defined by formulas (4) and (11) respectively

$$C_{ГП изд} = C_{ГП} \cdot (r_{\text{ПАБ}} + r_{\text{XP}}) \cdot T_{Г изд} = 12160 \cdot T_{Г} \cdot (11 + 1) = 145920 T_{Г}$$

$$\Delta(\%) = \frac{C_{ГП изд}}{C_{ИЗГ изд}} \cdot 100\% = \frac{145920 \cdot T_{Г}}{8632678} \cdot 100\%.$$

The values  $C_{ГП изд}$  and  $\Delta(\%)$  calculated for  $T_{Г изд} = 1, 2, 3, 4$  and 5 years are shown in Table 1:

Table 1

| Given values of $T_{Г\text{ изд}}$ | Calculated values            |              |
|------------------------------------|------------------------------|--------------|
|                                    | $C_{ГР\text{ изд}}$ (rubles) | $\Delta(\%)$ |
| 1 year                             | 145920                       | 1,69         |
| 2 years                            | 291840                       | 3,38         |
| 3 years                            | 437760                       | 5,07         |
| 4 years                            | 583680                       | 6,76         |
| 5 years                            | 729600                       | 8,45         |

### 3. Warranty service in terms of tax legislation

After having estimated the expected cost of warranty repairs, we can summarize that the fulfilment of these obligations upon delivery of a product to the customer can cause significant material costs.

In order to decrease these costs and to save money on profit tax, the producer is in his right to establish a money reserve fund for warranty repairs. This right is stipulated by Item 1 of Article 267 "Costs of establishment of reserves for warranty maintenance and repairs" of the Russian Federation Tax Code, as well as, according to Item 2.13 of Article 149 "Free-of-tax operations", no taxes are imposed on warranty services realized without extra payment related to maintenance and repairs of products during their warranty period, including the cost of spare parts and components for them.

The rules of establishment of a reserve fund are specified by Item 3 of Article of the Russian Federation Tax Code. Warranty costs are defined as allowances for reserve at the date of the sale of products by a manufacturer. The size of allowances cannot exceed the limit defined as the percentage of expenditures actually made by a taxpayer for warranty repairs and maintenance in the amount of revenues over the previous three years multiplied by the total sales revenue for the reporting (tax) period.

In case the taxpayer sells his products for less than three years with warranty provisions, the amount of revenues over the period of actual sales should be taken into account to estimate the limit of the reserve.

The taxpayer who has not previously sold his products with warranty repair services included is free to establish a warranty reserve fund in the amount not exceeding the expected costs for warranty maintenance and repairs.

Also, the warranty reserve fund which is not fully used by the taxpayer during the tax period for warranty maintenance and repairs of a product manufactured by him with the provision of warranty can be transferred to the following tax year. [4].

### Conclusion

The method offered provides the possibility:

- To determine the expected cost of repairs (company's costs) during the warranty period and the correlation between this number and the manufacturing cost;
- To reasonably build funds for warranty service in the structure of the price and, in the first place, to do it according to the duration of the warranty period;

- After estimating the expected cost of warranty repair, to help to establish the reserve fund for warranty maintenance free from tax on profit.

## References

1. GOST RB 15.306-2003. The system of development and putting products into production. Military equipment. Warranty obligations. Basic guidelines.
2. GOST R 27.002-2009 Reliability. Terms and definitions.
3. **Vasilyev Y.A.** Development and use of reserve fund for warranty repair. AJUDAR consulting group: Journal Construction: Bookkeeping and taxation. 2009, No.10.
4. Russian Federation Tax Code (with amendments as of 21 April, 2011).

**Карманов А.В., Телюк А.С.**

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРИЕМЛЕМЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ БЕЗОПАСНОСТИ ДЛЯ МНОГОКАНАЛЬНЫХ СИСТЕМ ПРОТИВОАВАРИЙНОЙ ЗАЩИТЫ

*В статье предлагается структура стоимостного критерия, на основе которого может быть осуществлен расчет приемлемых частот и приемлемых коэффициентов снижения риска для многоканальной системы противоаварийной защиты, обслуживающей группу опасных технологических объектов. Приводится пример расчета указанных приемлемых показателей безопасности для технологических объектов процесса подготовки продукции нефтегазовых скважин.*

**Ключевые слова:** безопасность, риск, система противоаварийной защиты, коэффициент снижения риска.

### Введение

Система противоаварийной защиты (ПАЗ) используется для обеспечения безопасного функционирования технологических объектов на опасных производствах. Как правило, ПАЗ входит в состав автоматизированной системы управления технологическим процессом (АСУ ТП) и служит для автоматического перевода опасного технологического объекта (ТО) при возникновении на нем инцидента, в безопасное состояние, именуемое «остановом». Обычно инциденты на ТО возникают в том случае, когда некоторые его технологические параметры попадают в так называемые критические области (КО). При этом дальнейшая эксплуатация объекта недопустима, т.к. это может привести к различным нежелательным последствиям, например, к потерям продукции, авариям и т.п. Параметры, для которых определены критические области, в дальнейшем будут именоваться «критическими» параметрами.

Рассмотрим многоканальную ПАЗ [1], имеющую структурную схему, приведенную на рис. 1.

В общем случае многоканальная ПАЗ обслуживает  $n$  технологических объектов, где  $n \geq 1$ . Каждый  $j$ -ый ТО имеет  $m(j)$  критических областей (КО), при попадании в каждую из которых соответствующего «критического» параметра происходит инцидент, где  $m(j) \geq 1$ ,  $j=1, \dots, n$ . Каждую  $s$ -ую КО, где  $s = 1, \dots, m(j)$ , на  $j$ -ом ТО обслуживает один  $(j,s)$ -канал ПАЗ, представляющий собой совокупность подсистем:  $(D_{j,s}, \text{ПЛК}, \text{ИУ}_j)$ .  $D_{j,s}$  – подсистема датчиков  $(j,s)$ -канала. ПЛК – программируемый логический контроллер, имеющий число входов не меньше  $m = m(1) + \dots + m(n)$ ;

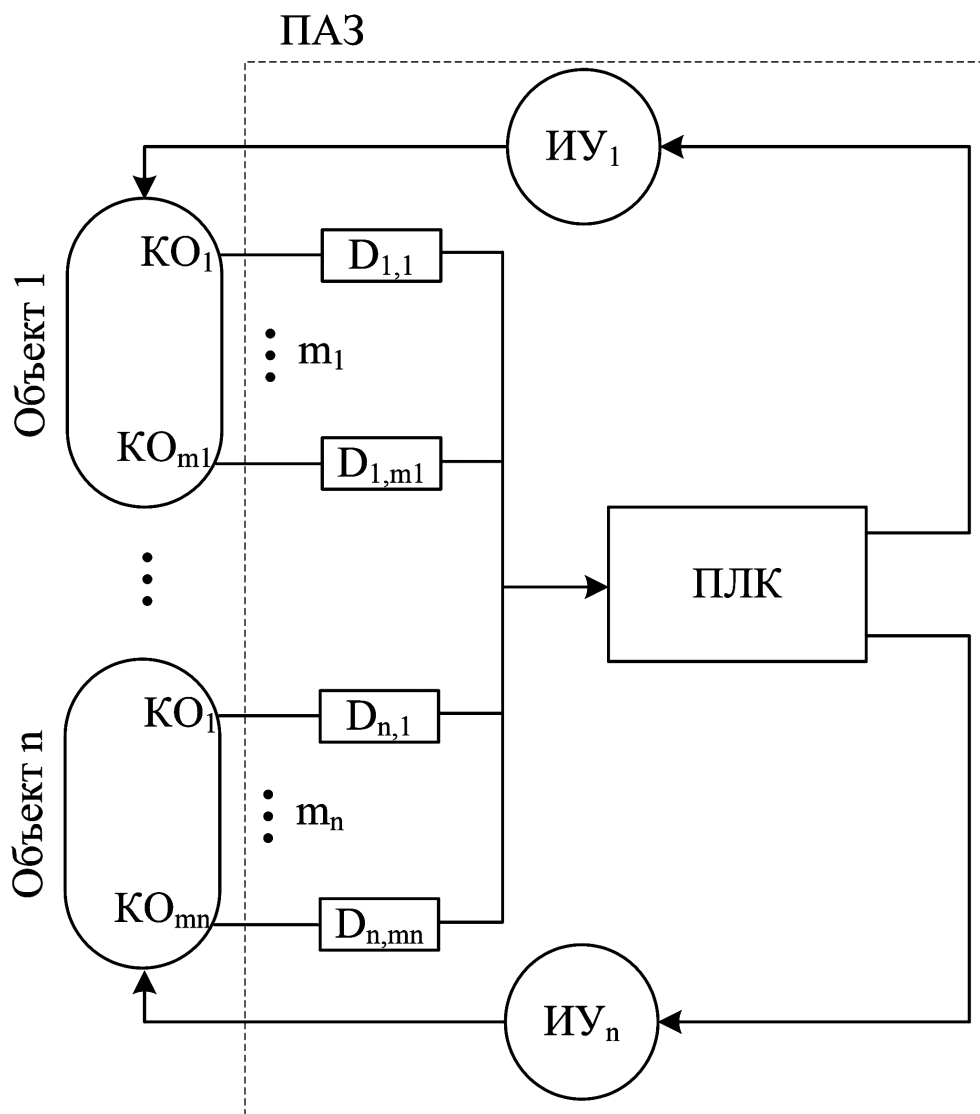


Рис. 1. Структура многоканальной ПАЗ

он осуществляет циклическую обработку входных данных, с целью определения попадания «критических» параметров в соответствующие КО. В том случае, если на  $j$ -ом объекте параметр попал в  $s$ -ую критическую область, то ПЛК выдает сигнал (команду) на подсистему исполнительных устройств – ИУ $_j$ , которая осуществляет «останов»  $j$ -ого объекта.

Отметим, что каждая подсистема, входящая в состав  $(j,s)$ -канала ПАЗ, может иметь достаточно сложную архитектуру [2], непосредственно влияющую на надежность канала. Например, подсистема датчиков  $D_{j,s}$ , в общем случае, как и любая иная подсистема, может иметь архитектуру  $MooN$ , где  $N$  – общее количество параллельно работающих датчиков (каналов подсистемы),  $M$  – количество датчиков (каналов подсистемы), которые должны быть в работоспособном состоянии для того, чтобы подсистема датчиков качественно выполнила функцию измерения значения опасного параметра,  $M \leq N$ . Таким образом, отказ подсистемы наступает, если отказали  $(N-M+1)$  параллельно работающих каналов подсистемы. Понятно, что подсистема с простейшей архитектурой  $1oo1$  имеет надежность «ниже», чем подсистема с любой иной архитектурой, однако ее стоимость будет наименьшей при прочих равных условиях.

Качество работы многоканальной ПАЗ оценивается различными показателями безопасности. Одним из важнейших показателей является КСР( $j,s$ ) – коэффициент снижения риска  $(j,s)$ -канала, где  $j = 1, \dots, n$ ,  $s = 1, \dots, m(j)$ . КСР( $j,s$ ) является отношением  $F_{np}(j,s)$  к  $F_p(j,s)$ , где  $F_{np}(j,s)$  – частота

(интенсивность) возникновения инцидентов на  $j$ -ом ТО при попадании соответствующего опасного параметра в  $s$ -ую КО, а  $F_p(j,s)$  – частота (интенсивность) так называемых «не отработанных» инцидентов. «Не отработанный» инцидент возникает в том случае, когда произошел инцидент и ПАЗ не осуществила «останов» ТО, например, по причине отказа одной из подсистем, входящих в состав соответствующего  $(j,s)$ -канала ПАЗ. Таким образом, каждый инцидент, возникший на  $j$ -ом ТО по  $s$ -ой КО, является либо «отработанным» инцидентом, т.е. при этом ПАЗ перевела ТО в «останов», либо «не отработанным» инцидентом, т.е. ПАЗ не осуществила «останов» ТО.

Укажем следующие свойства, присущие каждому  $(j,s)$ -каналу ПАЗ:

1. Величина  $F_{np}(j,s)$  не зависит от наличия ПАЗ, а зависит от физических свойств ТО.
2. Чем выше надежность  $(j,s)$ -канала как восстанавливаемой системы, тем меньше величина  $F_p(j,s)$  и, следовательно, тем больше  $KCP(j,s)$ . У «абсолютно надежного»  $(j,s)$ -канала величина  $F_p(j,s)$  близка к нулю, однако при этом стоимость технических средств «абсолютно надежного»  $(j,s)$ -канала будет весьма высока.
3.  $KCP(j,s) \geq 1$ . Если  $KCP(j,s)$  равен единице, то выполняется равенство

$$F_p(j,s) = F_{np}(j,s). \quad (1)$$

Справедливо и обратное утверждение. Отметим, что, если выполняется равенство (1), то можно считать, что ПАЗ не обслуживает  $s$ -ую КО на  $j$ -ом ТО.

Коэффициент снижения риска  $KCP(j,s)$  можно рассматривать как отношение интенсивности  $F_{np}(j,s)$  простейшего потока инцидентов, возникающих по  $s$ -ой КО на  $j$ -ом ТО, к интенсивности  $F_p(j,s)$  потока «не отработанных» инцидентов. При этом поток «не отработанных» инцидентов представляется некоторым простейшим потоком, полученным операцией разрежения потока инцидентов [3, с.251]. Обычно интенсивностью  $F_p(j,s)$  оценивается интенсивность  $F_a(j,s)$  потока аварий на  $j$ -ом ТО, возникающих от «не отработанных» инцидентов по  $s$ -ой КО, т.к. выполняется неравенство

$$F_a(j,s) \leq F_p(j,s). \quad (2)$$

ПАЗ считается корректно спроектированной, если каждый ее  $(j,s)$ -канал имеет такой коэффициент снижения риска  $KCP(j,s)$ , который обеспечивает значение частоты  $F_p(j,s)$  не больше, чем некоторое приемлемое значение  $F_t(j,s)$ . Обоснованный выбор приемлемой частоты  $F_t(j,s)$  и соответственно  $KCP(j,s)$  является отдельной задачей, решение которой может осуществляться на основе различных критериев [4]. Ниже излагается постановка и решение задачи определения частот  $F_t(j,s)$  и коэффициентов снижения риска  $KCP(j,s)$ ,  $j=1, \dots, n$ ,  $s=1, \dots, m(j)$  для многоканальной ПАЗ на основе минимизации стоимостного критерия, учитывающего затраты на создание и эксплуатацию ПАЗ, а также ожидаемый ущерб от аварий.

## Постановка и решение задачи

Пусть предполагается эксплуатировать ПАЗ в течение  $T$  лет, тогда затраты  $C(A,T)$  на создание, эксплуатацию ПАЗ и ликвидацию аварий за время эксплуатации можно представить соответственно следующими тремя слагаемыми:

$$C(A,T) = C_1(A) + C_2(A) \cdot T + C_3(A, T). \quad (3)$$

Рассмотрим компоненты выражения (3).

$A$  – совокупность данных о ПАЗ, имеющая вид:

$$A = \{[A_{j,s}, j = 1, \dots, n, s = 1, \dots, m(j)], \tau\}, \quad (4)$$

где  $A_{j,s} = (A_{j,s}^{(1)} A_{j,s}^{(2)} A_{j,s}^{(3)})$ ,  $A_{j,s}^{(v)} = [(M_{j,s}^{(v)} \text{oo} N_{j,s}^{(v)}), \xi_{j,s}^{(v)}]$ ,  $v = 1, 2, 3$ ,  $\tau$  – период контрольных проверок работоспособности ПАЗ. При этом если  $v=1$ , то данные соответствуют подсистеме датчиков (j,s)-канала ПАЗ;  $v=2$  – подсистеме ПЛК;  $v=3$  – подсистеме исполнительных механизмов (j,s)-канала. Совокупность  $A_{j,s}^{(v)}$ , где  $v=1,2,3$ , определяет для  $v$ -ой подсистемы (j,s)-канала ПАЗ следующие сведения:

1.1.  $(M_{j,s}^{(v)} \text{oo} N_{j,s}^{(v)})$  – архитектура  $v$ -ой подсистемы, для которой в соответствии со структурой ПАЗ, представленной на рис. 1, выполняются соотношения:

$$M_{j,s}^{(2)} \text{oo} N_{j,s}^{(2)} = M^{(2)} \text{oo} N^{(2)}, M_{j,s}^{(3)} \text{oo} N_{j,s}^{(3)} = M_j^{(3)} \text{oo} N_j^{(3)}. \quad (5)$$

1.2.  $\xi_{j,s}^{(v)} = (\lambda_{j,s}^{(v)}, \alpha_{j,s}^{(v)}, \beta_{j,s}^{(v)})$ , где  $\lambda_{j,s}^{(v)}$ ,  $\alpha_{j,s}^{(v)}$ ,  $\beta_{j,s}^{(v)}$  – соответственно интенсивность отказа, уровень самодиагностики,  $\beta$ -фактор одного канала  $v$ -ой подсистемы [5]. При этом с учетом структуры ПАЗ имеют место равенства:

$$\xi_{j,s}^{(2)} = \xi^{(2)}, \xi_{j,s}^{(3)} = \xi_j^{(3)}. \quad (6)$$

Характеристики  $\lambda_{j,s}^{(v)}$ ,  $\alpha_{j,s}^{(v)}$ , указываются обычно заводом-изготовителем в паспорте на технические средства и существенно влияют на его стоимость.  $\beta$ -фактор, как правило [5], удовлетворяет соотношению:

$$0 < \beta_{j,s}^{(v)} < 0,3, v = 1, 2, 3, j = 1, \dots, n, s = 1, \dots, m(j). \quad (7)$$

С учетом соотношений (5) и (6) совокупность  $A$  можно представить следующим образом:  $A = \{[(A_{j,s}^{(1)} A_{j,s}^{(2)} A_{j,s}^{(3)})], j = 1, \dots, n, s = 1, \dots, m(j)], \tau\}$ . Отметим, что целью проверок, осуществляемых с периодичностью  $\tau$ , является контроль работоспособности всех подсистем ПАЗ. При этом в случае выявления отказа какой-либо подсистемы производится восстановление её работоспособности.

2.  $C_1(A)$  – инвентарная стоимость ПАЗ, т.е. затраты на создание и ввод в эксплуатацию ПАЗ. Эти затраты можно представить в виде следующей суммы:

$$C_1(A) = C_{11}(A) + C_{12}(A) + C_{13}(A) + Q(A), \quad (8)$$

где  $C_{11}(A)$  – суммарная стоимость всех датчиков ПАЗ,  $C_{12}(A)$  – стоимость подсистемы ПЛК,  $C_{13}(A)$  – суммарная стоимость всех исполнительных устройств ПАЗ,  $Q(A)$  – суммарные затраты на проектирование и ввод в эксплуатацию ПАЗ. В частности:

$$C_{11}(A) = \sum_{j=1}^n \sum_{s=1}^{m(j)} a(\xi_{j,s}^{(1)}) \cdot N_{j,s}^{(1)}, \quad (9)$$

где  $a(\xi_{j,s}^{(1)})$  – стоимость одного датчика (j,s)-канала,  $N_{j,s}^{(1)}$  – число датчиков в первой подсистеме (j,s)-канала;



$$C_{12}(A) = b(M^{(2)} \circ N^{(2)}, \xi^{(2)}), \quad (10)$$

где  $b(M^{(2)} \circ N^{(2)}, \xi^{(2)})$  – стоимость ПЛК, имеющего архитектуру  $M^{(2)} \circ N^{(2)}$  и характеристику  $\xi^{(2)} = (\lambda^{(2)}, \alpha^{(2)}, \beta^{(2)})$ ;

$$C_{13}(A) = \sum_{j=1}^n d(\xi_j^{(3)}) \cdot N_j^{(3)}, \quad (11)$$

где  $d(\xi_j^{(3)})$  – стоимость одного исполнительного устройства в третьей подсистеме (j,s)-канала,  $N_j^{(3)}$  – число исполнительных устройств.

Отметим, что стоимости  $a(\xi_{j,s}^{(1)})$ ,  $b(M^{(2)} \circ N^{(2)}, \xi^{(2)})$ ,  $d(\xi_j^{(3)})$  существенно зависят от показателей надежности и уровня самодиагностики, которые могут отличаться у различных заводоизготовителей.

3.  $C_2(A)$  – годовые затраты на эксплуатацию ПАЗ. Основная стоимость эксплуатационных работ приходится на проведение контрольных проверок работоспособности ПАЗ, которые проводятся с периодичностью  $\tau$ , где  $\tau$  – интервал времени, как правило, кратный одному месяцу. При этом контрольные проверки обычно осуществляются специализированной инженерной организацией. Годовая стоимость таких контрольных проверок зависит от объема работ и частоты их проведения. Эта величина  $C_2(A)$  может определяться выражением:

$$C_2(A) = \left( w_2(M^{(2)} \circ N^{(2)}) + \sum_{j=1}^n \left[ w(M_j^{(3)} \circ N_j^{(3)}) + \sum_{s=1}^{m(j)} w(M_{j,s}^{(1)} \circ N_{j,s}^{(1)}) \right] \right) \cdot \frac{12}{\tau}, \quad (12)$$

где  $w_v(M_{j,s}^{(v)} \circ N_{j,s}^{(v)})$  – стоимость одной проверки v-ой подсистемы, имеющей архитектуру  $(M_{j,s}^{(v)} \circ N_{j,s}^{(v)})$ ,  $v = 1, 2, 3$ ;  $\tau$  – интервал, исчисляемый в месяцах;  $12 \cdot \tau^{-1}$  – число контрольных проверок в год.

4.  $C_3(A, T)$  – ожидаемый ущерб от аварий на интервале времени  $[0, T]$ , который, с учетом неравенства (2), можно оценить следующим образом:

$$C_1(A) = \sum_{j=1}^n Y_j \cdot \sum_{s=1}^{m(j)} F_p(A_{j,s}, \tau) \cdot T, \quad (13)$$

где  $Y_j$  – средний ущерб от одной аварии на j-ом ТО,  $F_p(A_{j,s}, \tau) \cdot T$  – среднее число «не отработанных» (j,s)-каналом инцидентов на интервале времени  $[0; T]$ . Отметим, что величина  $Y_j$  среднего ущерба от аварий на каждом технологическом объекте рассчитывается по стандартным методикам, например [6]. Также отметим, что соотношение (13) является следствием того, что ПЛК, входящий в состав ПАЗ, работает в режиме «реального времени», т.е. время необходимое для обнаружения и реагирования (j,s)-канала на инцидент меньше времени до появления опасного последствия (аварии) [1].

Прежде чем сформулировать задачу нахождения приемлемых величин  $F_t(j, s)$  и соответственно коэффициентов снижения риска  $KCP_t(j, s)$ ,  $j = 1, \dots, n$ ,  $s = 1, \dots, m(j)$  укажем, что при любой фикс-

рованной совокупности  $A$  существует [1] алгоритм  $G$  для расчета величин  $F_p(A_{j,s}, \tau)$ , т.е.  $F_p(A_{j,s}, \tau) = G(A_{j,s}, \tau, \omega)$ , где  $A_{j,s}$  компонента совокупности  $A$ ,  $\omega$  – совокупность показателей, влияющих на величину  $F_p(A_{j,s})$  и оцениваемых константами. Такими показателями могут являться: 1) предельное время восстановления отказавших элементов АСУ ТП, включая ПАЗ; 2) интенсивность  $F_{np}(j)$  возникновения инцидентов на  $j$ -ом ТО и т.п. Например, в ОАО «Газпром» предельное время восстановления не должно превышать 4 часа;  $F_{np}(j) \leq 1$  [1/год],  $j = 1, \dots, n$ . В этих условиях задача нахождения приемлемых интенсивностей  $F_t(j,s)$  и соответственно коэффициентов снижения риска  $KSP_t(j,s)$ , минимизирующих затраты  $C(A,T)$ , можно сформулировать следующим образом:

найти такие величины  $F_t(j,s) = G(A_{j,s}^t, \omega)$  и  $KSP_t(j,s) = F_{np}(j,s) \cdot F_t^{-1}(j,s)$ ,  $j = 1, \dots, n$ ,  $s = 1, \dots, m(j)$ , для которых выполняется равенство:

$$C_3(A^t, T) = \min \{C_3(A, T) \mid A \in \Xi\}, \quad (14)$$

где  $C_3(A, T) = C(A, T) \cdot T^{-1}$  – затраты в год на создание, эксплуатацию и ликвидацию аварий за  $T$  лет эксплуатации ПАЗ,  $\Xi$  – множество возможных совокупностей вида  $A$ .

В частности в прикладных расчетах  $\Xi$  можно представить конечным множеством вида:

$$\Xi = \{A = \{[(A_{j,s}^{(1)} A_{j,s}^{(2)} A_{j,s}^{(3)}), j = 1, \dots, n, s = 1, \dots, m(j)], \tau\} \mid A_{j,s}^{(v)} \in \Xi_{j,s}^{(v)}, v = 1, 2, 3, \tau \in \Theta\}, \quad (15)$$

где  $A_{j,s}^{(v)} = [(M_{j,s}^{(v)} \circ N_{j,s}^{(v)}), \xi_{j,s}^{(v)}]$ ,  $\xi_{j,s}^{(v)} = (\lambda_{j,s}^{(v)}, \alpha_{j,s}^{(v)}, \beta_{j,s}^{(v)})$ ;

$$\Xi_{j,s}^{(v)} = \{A_{j,s}^{(v)} \mid M_{j,s}^{(v)} = 1, \dots, k_1, N_{j,s}^{(v)} = 1, \dots, k_2, k_1 \leq k_2,$$

$$\xi_{j,s}^{(v)} = \xi_{j,s}^{(v)}(1), \dots, \xi_{j,s}^{(v)}(r_{j,s}^{(v)})\}, \quad (16)$$

где  $k_1, k_2$  – целые числа, определяемые множеством используемых архитектур для всех подсистем каждого канала ПАЗ,  $r_{j,s}^{(v)}$  – количество различных типов технических средств, которые могут быть использованы проектировщиками для построения  $v$ -ой подсистемы  $(j,s)$ -канала ПАЗ,  $\Theta = \{1, \dots, 12\}$  [мес.] или  $\{3, 6, 9, 12\}$  [мес.].

Задача (14) на множестве  $\Xi$  может быть решена на ПЭВМ методом полного перебора.

## Пример расчета приемлемых показателей безопасности

Рассмотрим часть технологического процесса абсорбционной осушки попутного нефтяного газа, которая реализуется на 2-х технологических блоках: абсорбера, дегазатора. «Критические»

Табл. 1. Перечень технологических блоков и критических областей на них

| Ж | Технологические блоки    | s | Критические области параметров             |
|---|--------------------------|---|--------------------------------------------|
| 1 | Блок абсорбера (колонна) | 1 | Перепад давления. $\Delta P=0.02$ [МПа]    |
|   |                          | 2 | Уровень жидкости (нижний). $L_L=300$ [мм]  |
|   |                          | 3 | Уровень жидкости (верхний). $L_H=800$ [мм] |
| 2 | Блок дегазатора          | 1 | Уровень ТЭГ (нижний). $L_L=300$ [мм]       |
|   |                          | 2 | Уровень ТЭГ (верхний). $L_H=750$ [мм]      |

параметры этих блоков имеют критические области, приведенные в таблице 1. Предполагается, что блоки будет обслуживать многоканальная ПАЗ в течение времени  $T = 10$  лет.

Средний ущерб от аварий: 1) для блока абсорбера –  $Y_1 = 3\,000$  тыс. р.; 2) для блока дегазатора –  $Y_2 = 1\,800$  тыс. р.

ПАЗ будет иметь структурную схему, приведенную на рис.1, где  $n = 2$ ,  $m(1) = 3$ ,  $m(2) = 2$ ,  $m = 3 + 2 = 5$ . Каждое множество  $\Xi_{j,s}^{(v)}$ , определяемое для  $v$ -ой подсистемы  $(j,s)$ -канала ПАЗ, где  $v = 1, 2, 3$ ,  $j = 1, 2$ ,  $s = 1, \dots, m(j)$  задается следующими параметрами:

$$k_1 = 2, k_2 = 3, \xi_{1,1}^{(1)}(1) = (8.3 \cdot 10^{-6} [1/\text{ч}], 0.6, 0.1),$$

$$\xi_{1,1}^{(1)}(2) = (6.7 \cdot 10^{-6} [1/\text{ч}], 0.7, 0.1), \xi_{1,2}^{(1)}(1) = \xi_{1,3}^{(1)}(1) = \xi_{2,1}^{(1)}(1) = \xi_{2,2}^{(1)}(1) = (10^{-5} [1/\text{ч}], 0.7, 0.1),$$

$$\xi_{1,2}^{(1)}(2) = \xi_{1,3}^{(1)}(2) = \xi_{2,1}^{(1)}(2) = \xi_{2,2}^{(1)}(2) = (1.25 \cdot 10^{-5} [1/\text{ч}], 0.6, 0.1),$$

$$\xi_{1,2}^{(1)}(3) = \xi_{1,3}^{(1)}(3) = \xi_{2,1}^{(1)}(3) = \xi_{2,2}^{(1)}(3) = (10^{-5} [1/\text{ч}], 0.4, 0.1),$$

$$\xi^{(2)}(1) = (2 \cdot 10^{-6} [1/\text{ч}], 0.8, 0.05), \xi^{(2)}(2) = (2.5 \cdot 10^{-6} [1/\text{ч}], 0.8, 0.05),$$

$$\xi_1^{(3)}(1) = \xi_2^{(3)}(1) = (1.42 \cdot 10^{-5} [1/\text{ч}], 0.15, 0.1),$$

$$\xi_1^{(3)}(2) = \xi_2^{(3)}(2) = (1.1 \cdot 10^{-5} [1/\text{ч}], 0.2, 0.1), \xi_1^{(3)}(3) = \xi_2^{(3)}(3) = (8.3 \cdot 10^{-6} [1/\text{ч}], 0.1, 0.1).$$

Значения затрат, используемых при формировании функционала (3), имеют следующие значения:

$$\xi_{1,1}^{(1)}(1) = 17 \text{ тыс. р.}, a(\xi_{1,1}^{(1)}(1)) = 20 \text{ тыс. р.},$$

$$a(\xi_{1,2}^{(1)}(1)) = a(\xi_{1,3}^{(1)}(1)) = a(\xi_{2,1}^{(1)}(1)) = a(\xi_{2,2}^{(1)}(1)) = 37.5 \text{ тыс. р.},$$

$$a(\xi_{1,2}^{(1)}(2)) = a(\xi_{1,3}^{(1)}(2)) = a(\xi_{2,1}^{(1)}(2)) = a(\xi_{2,2}^{(1)}(2)) = 24.6 \text{ тыс. р.},$$

$$a(\xi_{1,2}^{(1)}(3)) = a(\xi_{1,3}^{(1)}(3)) = a(\xi_{2,1}^{(1)}(3)) = a(\xi_{2,2}^{(1)}(3)) = 24 \text{ тыс. р.},$$

$$b(\xi^{(2)}(1)) = 96 \text{ тыс. р.}, b(\xi^{(2)}(2)) = 90 \text{ тыс. р.}, b(M^{(2)} \circ N^{(2)}, \xi^{(2)}) = b(\xi^{(2)}) \cdot N^{(2)},$$

$$d(\xi_1^{(3)}(1)) = d(\xi_2^{(3)}(1)) = 24 \text{ тыс. р.}, d(\xi_1^{(3)}(2)) = d(\xi_2^{(3)}(2)) = 33 \text{ тыс. р.},$$

$$d(\xi_1^{(3)}(3)) = d(\xi_2^{(3)}(3)) = 30 \text{ тыс. р.}$$

Множество  $\Theta = \{3, 6, 9, 12\} [\text{мес.}]$ ,  $\omega = \{ F_{np}(1,1) = F_{np}(1,2) = F_{np}(1,3) = 1/3 [1/\text{год}], F_{np}(2,1) = F_{np}(2,2) = 1/2 [1/\text{год}], \text{MTTR} = 4 [\text{час}] \}$ , где MTTR – среднее время восстановления любой подсистемы ПАЗ.

Стоимость проверки каждой подсистемы:  $w_1(M_{j,s}^{(1)} \circ N_{j,s}^{(1)}) = w \cdot N_{j,s}^{(1)}$ ,  $w_2(M^{(2)} \circ N^{(2)}) = w \cdot N^{(2)}$ ,  $w_3(M_j^{(3)} \circ N_j^{(3)}) = w \cdot N_j^{(3)}$ , где  $w = 1$  тыс. руб.

Проведенный расчет дает следующее решение задачи (14):

$$A^t = \{[A^{(1)}_{j,s} A^{(2)} A^{(3)}_j, j = 1,2, s(1) = 1,2,3, s(2) = 1,2], \tau\}, \tau = 9 \text{ [мес.]},$$

$$A^{(1)}_{1,1} = [(1002), \xi^{(1)}_{1,1}], \xi^{(1)}_{1,1} = (8.3 \cdot 10^{-6} [1/\text{ч}], 0.6, 0.1),$$

$$A^{(1)}_{1,2} = [(1002), \xi^{(1)}_{1,2}], \xi^{(1)}_{1,2} = (10^{-5} [1/\text{ч}], 0.4, 0.1),$$

$$A^{(1)}_{1,3} = [(1002), \xi^{(1)}_{1,3}], \xi^{(1)}_{1,3} = (10^{-5} [1/\text{ч}], 0.4, 0.1),$$

$$A^{(1)}_{2,1} = [(1002), \xi^{(1)}_{2,1}], \xi^{(1)}_{2,1} = (10^{-5} [1/\text{ч}], 0.4, 0.1),$$

$$A^{(1)}_{2,2} = [(1002), \xi^{(1)}_{2,2}], \xi^{(1)}_{2,2} = (10^{-5} [1/\text{ч}], 0.4, 0.1),$$

$$A^{(2)} = [(1001), \xi^{(2)}], \xi^{(2)} = (2 \cdot 10^{-6} [1/\text{ч}], 0.8, 0.05),$$

$$A^{(3)}_1 = [(1002), \xi^{(3)}_1], \xi^{(3)}_1 = (8.3 \cdot 10^{-6} [1/\text{ч}], 0.1, 0.1),$$

$$A^{(3)}_2 = [(1002), \xi^{(3)}_2], \xi^{(3)}_2 = (8.3 \cdot 10^{-6} [1/\text{ч}], 0.1, 0.1).$$

При этом поток «не отработанных» инцидентов по каждому каналу ПАЗ имеет следующие интенсивности:

$$F_t(1,1) = 9 \cdot 10^{-4} [1/\text{год}]; F_t(1,2) = F_t(1,3) = 10^{-3} [1/\text{год}]; F_t(2,1) = F_t(2,2) = 1.5 \cdot 10^{-3} [1/\text{год}].$$

Каналы ПАЗ имеют следующие коэффициенты снижения риска:

$$КСР_t(1,1) = 390; КСР_t(1,2) = 332; КСР_t(1,3) = 332; КСР_t(2,1) = 332; КСР_t(2,2) = 332.$$

$$\text{Затраты } C_j(A^t, T) = 72.7 \text{ тыс. руб./год.}$$

## Литература

1. Карманов А.В., Телюк А.С., Модель и алгоритм расчета основных показателей многоканальной системы противоаварийной защиты. М.: Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности, 2013, № 2.
2. Федоров Ю. Н., Справочник инженера АСУ ТП: проектирование и разработка, Москва: Инфра-Инженерия, 2008.
3. Кокс Д.Р., Смит В.Л. Теория восстановления. М.: Советское радио, 1967.
4. Карманов А.В., Шершукова К.П., Телюк А.С. Метод определения проектных показателей безопасности системы противоаварийной защиты для процессов подготовки продукции нефтегазовых скважин. М.: Научно-технический журнал «Надёжность», 2012, № 3(42).
5. Макдональд Д. Промышленная безопасность, оценивание риска и системы аварийного останова. М.: ООО «Группа ИДТ», 2007.
6. РД 03-496-02. Методические рекомендации по оценке ущерба от аварий на опасных производственных объектах. Постановление Госгортехнадзора РФ от 29 октября 2002 № 63.

**Karmanov A.V., Telyuk A.S.**

## DEFINITION OF ACCEPTABLE SAFETY PERFORMANCE FOR MULTI-CHANNEL EMERGENCY PROTECTION SYSTEMS

*The paper offers the structure of a cost criterion that may be used as a basis for defining acceptable frequencies and acceptable risk reduction factors for a multi-channel emergency protection system, which maintains a group of hazardous technological objects. The paper also presents an example of defining acceptable safety performance for technological objects involved in the process of preparing products of oil-and-gas wells.*

**Keywords:** safety, risk, emergency protection system, risk reduction factor.

### Introduction

A system of emergency protection (EP) is used to ensure the safe operation of technological facilities in hazardous industries. Typically, EP is part of a computer-aided manufacturing (CAM) system, and it is intended for insuring automatic transition of a hazardous technological object (TO) into secure state, referred to as “stop”, in the event of an incident on it. Generally, incidents arise on TO in case when some of its process parameters fall within the so-called critical area (CA). In this case the further operation of an object is inadmissible, as this can lead to various undesirable consequences, such as loss of products, accidents, etc. Parameters, for which critical areas are defined, hereinafter will be called “critical” parameters.

Let us consider a multi-channel EP [1], with a block diagram shown in Fig. 1.

In general, a multi-channel EP maintains  $n$  technological objects, where  $n \geq 1$ . Each  $j$ -th TO has  $m(j)$  of critical areas (CA). In case when a corresponding “critical” parameter falls into any critical area, an incident occurs where  $m(j) \geq 1$ ,  $j = 1, \dots, n$ . Each  $s$ -th CA, where  $s = 1, \dots, m(j)$ , on the  $j$ -th TO is maintained by one  $(j,s)$ -channel of EP, which is a combination of subsystems:  $D_{j,s}$ , PLC and  $EU_j$ .  $D_{j,s}$  is a subsystem of sensors of  $(j,s)$ -channel. PLC is a programmable logic controller, which has the number of inputs not less than  $m = m(1) + \dots + m(n)$ ; it performs cyclic processing of input data to determine the fall of “critical” parameters into the corresponding CA. In case if a parameter fall into the  $s$ -th critical area on the  $j$ -th object, the PLC generates a signal (command) to the subsystem of execution units ( $EU_j$ ), which performs “stop” of the  $j$ -th object.

Note that each subsystem integrated into the  $(j, s)$ -channel of EP can have quite a complex architecture [2], directly affecting the channel reliability. For example, the subsystem of sensors  $D_{j,s}$ , in general, as

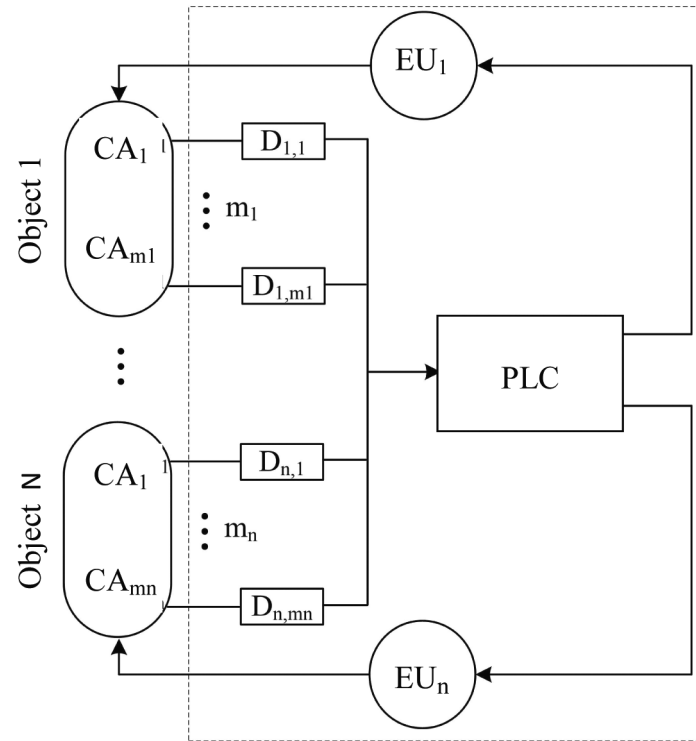


Fig. 1. The structure of multi-channel EP

well as any other subsystem that may have the MooN architecture, where  $N$  is the total number of parallel operating sensors (subsystem channels) and  $M$  is the number of sensors (subsystem channels) to be in upstate, so that the subsystem of sensors can successfully execute the function of measuring the value of hazardous parameter ( $M \leq N$ ). Thus, the failure of the subsystem occurs if  $(N-M+1)$  of parallel operating channels of the subsystem fail. It is clear that the subsystem with the simplest architecture 1oo1 has “lower” reliability than with any other subsystem architecture, but its cost will be lower, all other things being equal.

The performance quality of multi-channel EP is evaluated by various parameters of safety. One of the most important parameters is  $RRF(j,s)$ , a risk reduction factor of  $(j,s)$ -channel, where  $j = 1, \dots, n$ ,  $s = 1, \dots, m(j)$ .  $RRF(j,s)$  is the ratio of  $F_{np}(j,s)$  to  $F_p(j,s)$ , where  $F_{np}(j,s)$  is the frequency (rate) of incidents occurred on the  $j$ -th TO when a corresponding hazardous parameter falls into the  $s$ -th critical area, and  $F_p(j,s)$  is the frequency (rate) of the so-called “not worked-out” incidents. “Not worked-out” incident occurs when the incident took place but EP did not execute “stop” of TO, for example, due to the failure of one of the subsystems that is a part of the corresponding  $(j,s)$ -channel of EP. Thus, each incident caused on the  $j$ -th TO by the  $s$ -th CA is either a “worked out” incident, i.e. EP has brought TO to “stop” state, or a “not worked out” incident, i.e. EP has not executed “stop” of TO.

We shall point out the following properties specific to each  $(j,s)$ -channel of EP:

1. The value  $F_{np}(j,s)$  does not depend on the presence of EP but it depends on TO physical properties.
2. The higher the dependability of  $(j,s)$ -channel as a recoverable system is, the smaller the value  $F_p(j,s)$  and hence, the higher  $RRF(j,s)$  are. The “absolutely dependable”  $(j,s)$ -channel has the value  $F_p(j,s)$ , which is close to zero, however the cost of hardware of “absolutely dependable”  $(j,s)$ -channel is very high.

3.  $RRF(j,s) \geq 1$ . If the  $RRF(j,s)$  is equal to unity, then the following equation is satisfied

$$F_p(j,s) = F_{np}(j,s). \quad (1)$$

The inverse proposition is also true. Note if the equation (1) is met, we can assume that EP does not maintain the  $s$ -th CA on the  $j$ -th TO.

The risk reduction factor  $RRF(j, s)$  can be considered as the relation of the rate of  $F_{np}(j, s)$  simple stream of incidents that occur on the  $s$ -th CA on the  $j$ -th TO, to the rate of  $F_p(j, s)$  stream of “not worked-out” incidents. In this case, the stream of “not worked-out” incidents is represented by a simple stream obtained by operation of incident stream rarefaction [3, p.251]. Usually the rate of  $F_p(j, s)$  is used to estimate the rate of  $F_a(j, s)$  of the accident stream on the  $j$ -th TO arising from the “not worked-out” incidents over the  $s$ -th CA, as the following inequality holds true

$$F_a(j, s) \leq F_p(j, s). \quad (2)$$

EP is believed to be correctly designed if each of its  $(j, s)$ -channel has such a risk reduction factor  $RRF(j, s)$  that provides the frequency value  $F_p(j, s)$  not more than the acceptable value  $F_t(j, s)$ . Justified selection of the acceptable frequency  $F_t(j, s)$  and, accordingly,  $RRF(j, s)$  is a separate task that can be solved based on different criteria [4]. Below you can find the statement and solution of the problem of defining the frequency  $F_t(j, s)$  and risk reduction factors  $RRF_t(j, s)$ ,  $j = 1, \dots, n$ ,  $s = 1, \dots, m(j)$  for a multi-channel EP, based on minimizing the cost criterion that takes into account the costs of development and operation of EP, as well as the expected damage from accidents.

## Statement and solution of the problem

Let EP be supposed to be used for  $T$  years, then the cost  $C(A, T)$  for the development, operation of EP and accident elimination during operation can be represented respectively by the following three summands:

$$C(A, T) = C_1(A) + C_2(A) \cdot T + C_3(A, T), \quad (3)$$

Let us consider the components of the expression (3).

$A$  is a set of data about EP with the following form:

$$A = \{[A_{j,s}, j = 1, \dots, n, s = 1, \dots, m(j)], \tau\}, \quad (4)$$

where  $A_{j,s} = A_{j,s} = (A_{j,s}^{(1)}, A_{j,s}^{(2)}, A_{j,s}^{(3)})$ ,  $A_{j,s}^{(v)} = [(M_{j,s}^{(v)} \circ N_{j,s}^{(v)}), \xi_{j,s}^{(v)}]$ ,  $v = 1, 2, 3$ ,  $\tau$  is the time of EP availability control check. In this case, if  $v = 1$  then the data corresponds to a subsystem of sensors of EP  $(j, s)$ -channel; if  $v = 2$  then the data corresponds to PLC subsystem; if  $v = 3$  then the data corresponds to the subsystem of executing mechanism of the  $(j, s)$ -channel. The set  $A_{j,s}^{(v)}$ , where  $v = 1, 2, 3$ , defines the following information for the  $v$ -th subsystem of EP  $(j, s)$ -channel:

1.1.  $(M_{j,s}^{(v)} \circ N_{j,s}^{(v)})$  is the architecture of the  $v$ -th subsystem, for which, in accordance with the structure of the EP shown in Fig. 1, the following relations hold true:

$$M_{j,s}^{(2)} \circ N_{j,s}^{(2)} = M^{(2)} \circ N^{(2)}, M_{j,s}^{(3)} \circ N_{j,s}^{(3)} = M^{(3)} \circ N^{(3)}. \quad (5)$$

1.2.  $\xi_{j,s}^{(v)} = (\lambda_{j,s}^{(v)}, \alpha_{j,s}^{(v)}, \beta_{j,s}^{(v)})$ , where  $\lambda_{j,s}^{(v)}$ ,  $\alpha_{j,s}^{(v)}$ ,  $\beta_{j,s}^{(v)}$  are a failure rate, the level of self-diagnostics and the  $\beta$ -factor of one channel of the  $v$ -th subsystem respectively. [5] In this case, taking into account the structure of the EP, the following equations take place:

$$\xi_{j,s}^{(2)} = \xi^{(2)}, \xi_{j,s}^{(3)} = \xi_j^{(3)}. \quad (6)$$

Characteristics  $\lambda_{j,s}^{(v)}$ ,  $\alpha_{j,s}^{(v)}$  are usually provided by a manufacturer in the passport of facilities, and they significantly affect its cost. The  $\beta$ -factor, as a rule [5], satisfies the following relation:

$$0 < \beta_{j,s}^{(v)} < 0,3, v = 1, 2, 3, j = 1, \dots, n, s = 1, \dots, m(j). \quad (7)$$

In view of (5) and (6), the set  $A$  can be presented as follows:  $A = \{[(A_{j,s}^{(1)}, A_{j,s}^{(2)}, A_{j,s}^{(3)}), j = 1, \dots, n, s = 1, \dots, m(j)], \tau\}$ . It should be noted that the purpose of the checks carried out at intervals  $\tau$ , is the control of availability of all EP subsystems, thus, should any subsystem fail, the recovery of its availability is carried out.

2.  $C_1(A)$  is the inventory value, i.e. costs of EP production and commissioning. These costs can be represented in the following sum:

$$C_1(A) = C_{11}(A) + C_{12}(A) + C_{13}(A) + Q(A), \quad (8)$$

where  $C_{11}(A)$  is the total cost of all EP sensors,  $C_{12}(A)$  is the cost of the PLC subsystem,  $C_{13}(A)$  is the total cost of all EP actuators,  $Q(A)$  is the total cost of the EP design and commissioning. In particular:

$$C_{11}(A) = \sum_{j=1}^n \sum_{s=1}^{m(j)} a(\xi_{j,s}^{(1)}) \cdot N_{j,s}^{(1)}, \quad (9)$$

where  $a(\xi_{j,s}^{(1)})$  is the value of one sensor of the  $(j, s)$ -channel,  $N_{j,s}^{(1)}$  is the number of sensors in the first subsystem of  $(j, s)$ -channel;

$$C_{12}(A) = b(M^{(2)} \circ N^{(2)}, \xi^{(2)}), \quad (10)$$

where  $b(M^{(2)} \circ N^{(2)}, \xi^{(2)})$  is the cost of PLC with the architecture  $M^{(2)} \circ N^{(2)}$  and the characteristic  $\xi^{(2)} = (\lambda^{(2)}, \alpha^{(2)}, \beta^{(2)})$ ;

$$C_{13}(A) = \sum_{j=1}^n d(\xi_j^{(3)}) \cdot N_j^{(3)}, \quad (11)$$

where  $d(\xi_j^{(3)})$  is the cost of one actuator in the third subsystem of  $(j, s)$ -channel,  $N_j^{(3)}$  is the number of actuators.

Note that the costs of  $a(\xi_{j,s}^{(1)})$ ,  $b(M^{(2)} \circ N^{(2)}, \xi^{(2)})$ ,  $d(\xi_j^{(3)})$  strongly depend on the reliability parameters and the level of self-diagnostics, which may be different for various manufacturers.

3.  $C_2(A)$  are the annual operating costs of EP. The basic cost of field operations is due to carrying out EP availability control checks, which are held at intervals  $\tau$ , where  $\tau$  is the time interval, usually a multiple of one month. In this case, control checks are usually carried out by a specialized engineering organization. The annual cost of these control checks depends on the amount of work and the frequency of their implementation. This value  $C_2(A)$  may be defined by the following expression:

$$C_2(A) = \left( w_2(M^{(2)} \circ N^{(2)}) + \sum_{j=1}^n \left[ w(M_j^{(3)} \circ N_j^{(3)}) + \sum_{s=1}^{m(j)} w(M_{j,s}^{(1)} \circ N_{j,s}^{(1)}) \right] \right) \cdot \frac{12}{\tau}, \quad (12)$$



wherein  $w_v(M_{j,s}^{(v)} \text{oo} N_{j,s}^{(v)})$  is the cost of one check of the  $v$ -th subsystem with the architecture  $(M_{j,s}^{(v)} \text{oo} N_{j,s}^{(v)})$ ,  $v=1,2,3$ ;  $\tau$  is the interval calculated in months,  $12 \cdot \tau^{-1}$  is the number of control checks per year.

4.  $C_3(A, T)$  is the expected damage from accidents at the time interval  $[0, T]$ , which, in view of inequality (2), can be estimated as follows:

$$C_1(A) = \sum_{j=1}^n Y_j \cdot \sum_{s=1}^{m(j)} F_p(A_{j,s}, \tau) \cdot T, \quad (13)$$

where  $Y_j$  is the average damage due to one accident on the  $j$ -th TO,  $F_p(A_{j,s}, \tau) \cdot T$  is the average number of “not worked-out” incidents by  $(j, s)$ -channel at the time interval  $[0; T]$ . Note that the value  $Y_j$  of the average cost of an accident on each technological object is calculated according to standard methods; see for example [6]. Also note that the relation (13) is a consequence of the fact that PLC as a part of EP operates in real time mode, i.e. the time required for detection and response of  $(j,s)$ -channel to an incident is less than the time before occurrence of hazardous consequence (accident) [1].

Before stating the problem of finding acceptable values  $F_t(j, s)$  and correspondingly risk reduction factors  $RRF_t(j, s)$ ,  $j = 1, \dots, n$ ,  $s = 1, \dots, m(j)$ , we shall indicate that for any fixed aggregate  $A$  there is an algorithm  $G$  [1] for computing the values  $F_p(A_{j,s}, \tau)$ , i.e.  $F_p(A_{j,s}, \tau) = G(A_{j,s}, \tau, \omega)$ , where  $A_{j,s}$  of  $G$   $F_p(A_j, s, \tau)$ , i.e.  $F_p(A_j, s, \tau) = G(A_j, s, \tau, \omega)$ , where  $A_j$  is the component of the aggregate  $A$ ,  $\omega$  is a set of indices that affect the value  $F_p(A_{j,s})$  and the set is estimated by constants. These indices can be:

1) the time limit for recovery of CAM failed elements, including EP,

2) the rate  $F_{np}(j)$  of incident occurrence on the  $j$ -th TO etc. For example, in JSC Gazprom the limit recovery time should not exceed 4 hours;  $F_{np}(j) \leq 1$  [1/year],  $j = 1, \dots, n$ . In these circumstances, the task of finding acceptable rates  $F_t(j, s)$  and, accordingly, risk reduction factors  $RRF_t(j, s)$ , minimizing the cost  $C(A, T)$ , can be summarized as follows:

one shall find such values  $F_t(j, s) = G(A_{j,s}^t, \omega)$  and  $RRT_t(j, s) = F_{np}(j, s) \cdot F_t^{-1}(j, s)$ ,  $j = 1, \dots, n$ ,  $s = 1, \dots, m(j)$ , for which the following equation holds true:

$$C_3(A^t, T) = \min \{C_3(A, T) \mid A \in \Xi\}, \quad (14)$$

where  $C_3(A, T) = C(A, T) \cdot T^{-1}$  is the annual cost for EP system development and operation and elimination of accidents during  $T$  years of EP operation, is a set possible aggregates of  $A$  type.

In particular, in applied calculations the set  $\Xi$  can be represented as a finite set of the following form:

$$\Xi = \{A = \{[(A_{j,s}^{(1)} A_{j,s}^{(2)} A_{j,s}^{(3)})], j = 1, \dots, n, s = 1, \dots, m(j), \tau\} \mid A_{j,s}^{(v)} \in \Xi_{j,s}^{(v)}, v = 1, 2, 3, \tau \in \Theta\}, \quad (15)$$

where  $A_{j,s}^{(v)} = [(M_{j,s}^{(v)} \text{oo} N_{j,s}^{(v)}), \xi_{j,s}^{(v)}]$ ,  $\xi_{j,s}^{(v)} = (\lambda_{j,s}^{(v)}, \alpha_{j,s}^{(v)}, \beta_{j,s}^{(v)})$ ;

$\Xi_{j,s}^{(v)} = \{A_{j,s}^{(v)} \mid M_{j,s}^{(v)} = 1, \dots, k_1, N_{j,s}^{(v)} = 1, \dots, k_2, k_1 \leq k_2\}$ ,

$$\xi_{j,s}^{(v)} = \xi_{j,s}^{(v)}(1), \dots, \xi_{j,s}^{(v)}(r_{j,s}^{(v)})\}, \quad (16)$$

where  $k_1, k_2$  are integers defining a set of architectures used for all subsystems of each channel of EP,  $r_{j,s}^{(v)}$  is the number of different types of technology that can be used by designers for construction of the  $v$ -th subsystem of EP ( $j, s$ ) –channel,  $\Theta = \{1, \dots, 12\}$  [months] or  $\{3, 6, 9, 12\}$  [months].

The problem (14) for the set  $\Xi$  can be solved on PC by the method of exhaustion.

## An example of calculation of acceptable safety performance

Let us consider a part of the process of the absorption dehydration of associated petroleum gas, which is implemented on two processing units: an absorber and a degasser. “Critical” parameters of these units have the critical areas listed in Table 1. It is assumed that the units will be maintained by a multi-channel EP system over a period of  $T = 10$  years.

**Table 1. The list of processing units and their critical areas**

| J | Technological units    | s | Critical areas of parameters            |
|---|------------------------|---|-----------------------------------------|
| 1 | Absorber unit (column) | 1 | Gas pressure loss $\Delta P=0.02$ [MPa] |
|   |                        | 2 | Liquid level (lower) $L_L=300$ [mm]     |
|   |                        | 3 | Liquid level (upper) $L_H=800$ [mm]     |
| 2 | Degasser unit          | 1 | TEG level (lower) $L_L=300$ [mm]        |
|   |                        | 2 | TEG level (upper) $L_H=750$ [mm]        |

The average damage due to accidents: 1) for the absorber unit amounts to  $Y_1 = 3000$  thousand rubles, 2) for the degassing unit amounts to  $Y_2 = 1800$  thousand rubles.

EP will have the structural schematic shown in Fig. 1 where  $n = 2$ ,  $m(1) = 3$ ,  $m(2) = 2$ ,  $m = 3 + 2 = 5$ . Each set  $\Xi_{j,s}^{(v)}$  defined for the  $v$ -th subsystem of EP ( $j, s$ )-channel where  $v = 1, 2, 3$ ,  $j = 1, 2$ ,  $s = 1, \dots, m(j)$  is defined by the following parameters:

$$\begin{aligned}
 k_1 &= 2, k_2 = 3, \xi_{1,1}^{(1)}(1) = (8.3 \cdot 10^{-6} [1/h], 0.6, 0.1), \\
 \xi_{1,1}^{(1)}(2) &= (6.7 \cdot 10^{-6} [1/h], 0.7, 0.1), \xi_{1,2}^{(1)}(1) = \xi_{1,3}^{(1)}(1) = \xi_{2,1}^{(1)}(1) = \xi_{2,2}^{(1)}(1) = (10^{-5} [1/h], 0.7, 0.1), \\
 \xi_{1,2}^{(1)}(2) &= \xi_{1,3}^{(1)}(2) = \xi_{2,1}^{(1)}(2) = \xi_{2,2}^{(1)}(2) = (1.25 \cdot 10^{-5} [1/h], 0.6, 0.1), \\
 \xi_{1,2}^{(1)}(3) &= \xi_{1,3}^{(1)}(3) = \xi_{2,1}^{(1)}(3) = \xi_{2,2}^{(1)}(3) = (10^{-5} [1/h], 0.4, 0.1), \\
 \xi_{1,1}^{(2)}(1) &= (2 \cdot 10^{-6} [1/h], 0.8, 0.05), \xi_{1,2}^{(2)}(2) = (2.5 \cdot 10^{-6} [1/h], 0.8, 0.05), \\
 \xi_{1,1}^{(3)}(1) &= \xi_{1,2}^{(3)}(1) = (1.42 \cdot 10^{-5} [1/h], 0.15, 0.1), \\
 \xi_{1,1}^{(3)}(2) &= \xi_{1,2}^{(3)}(2) = (1.1 \cdot 10^{-5} [1/h], 0.2, 0.1), \xi_{1,1}^{(3)}(3) = \xi_{1,2}^{(3)}(3) = (8.3 \cdot 10^{-6} [1/h], 0.1, 0.1).
 \end{aligned}$$

Cost quantities used in the formation of functional (3) have the following values:

$$\begin{aligned}
 \xi_{1,1}^{(1)}(1) &= 17 \text{ thousand rubles, } a(\xi_{1,1}^{(1)}(1)) = 20 \text{ thousand rubles,} \\
 a(\xi_{1,2}^{(1)}(1)) &= a(\xi_{1,3}^{(1)}(1)) = a(\xi_{2,1}^{(1)}(1)) = a(\xi_{2,2}^{(1)}(1)) = 37.5 \text{ thousand rubles,} \\
 a(\xi_{1,2}^{(1)}(2)) &= a(\xi_{1,3}^{(1)}(2)) = a(\xi_{2,1}^{(1)}(2)) = a(\xi_{2,2}^{(1)}(2)) = 24.6 \text{ thousand rubles,} \\
 a(\xi_{1,2}^{(1)}(3)) &= a(\xi_{1,3}^{(1)}(3)) = a(\xi_{2,1}^{(1)}(3)) = a(\xi_{2,2}^{(1)}(3)) = 24 \text{ thousand rubles,} \\
 b(\xi_{1,1}^{(2)}(1)) &= 96 \text{ thousand rubles, } b(\xi_{1,2}^{(2)}(2)) = 90 \text{ thousand rubles, } b(M^{(2)} \circ N^{(2)}, \xi^{(2)}) = b(\xi^{(2)}) \cdot N^{(2)}, \\
 d(\xi_{1,1}^{(3)}(1)) &= d(\xi_{1,2}^{(3)}(1)) = 24 \text{ thousand rubles, } d(\xi_{1,1}^{(3)}(2)) = d(\xi_{1,2}^{(3)}(2)) = 33 \text{ thousand rubles,} \\
 d(\xi_{1,1}^{(3)}(3)) &= d(\xi_{1,2}^{(3)}(3)) = 30 \text{ thousand rubles.}
 \end{aligned}$$

The set  $\Theta = \{3, 6, 9, 12\}$  [months.],  $\omega = \{F_{np}(1,1) = F_{np}(1,2) = F_{np}(1,3) = 1/3$  [1/ year]  $F_{np}(2,1) = F_{np}(2,2) = 1/2$  [1/year],  $MTTR = 4$  [h] $\}$ , where MTTR is mean time to recovery of any EP subsystem.

The cost of each subsystem control check:  $w_1(M^{(1)}_{j,s} \text{oo} N^{(1)}_{j,s}) = w \cdot N^{(1)}_{j,s}$ ,  $w_2(M^{(2)} \text{oo} N^{(2)}) = w \cdot N^{(2)}$ ,  $w_3(M^{(3)}_{j,s} \text{oo} N^{(3)}_{j,s}) = w \cdot N^{(3)}_{j,s}$ , where  $w = 1$  thousand rubles.

The calculation gives the following solution of the problem (14):

$$A^t = \{[A^{(1)}_{j,s}, A^{(2)}_{j,s}, A^{(3)}_{j,s}], j = 1, 2, s(1) = 1, 2, 3, s(2) = 1, 2, \tau\}, \tau = 9 \text{ [months]},$$

$$A^{(1)}_{1,1} = [(1002), \xi^{(1)}_{1,1}], \xi^{(1)}_{1,1} = (8.3 \cdot 10^{-6} \text{ [1/h]}, 0.6, 0.1),$$

$$A^{(1)}_{1,2} = [(1002), \xi^{(1)}_{1,2}], \xi^{(1)}_{1,2} = (10^{-5} \text{ [1/h]}, 0.4, 0.1),$$

$$A^{(1)}_{1,3} = [(1002), \xi^{(1)}_{1,3}], \xi^{(1)}_{1,3} = (10^{-5} \text{ [1/h]}, 0.4, 0.1),$$

$$A^{(1)}_{2,1} = [(1002), \xi^{(1)}_{2,1}], \xi^{(1)}_{2,1} = (10^{-5} \text{ [1/h]}, 0.4, 0.1),$$

$$A^{(1)}_{2,2} = [(1002), \xi^{(1)}_{2,2}], \xi^{(1)}_{2,2} = (10^{-5} \text{ [1/h]}, 0.4, 0.1),$$

$$A^{(2)} = [(1001), \xi^{(2)}], \xi^{(2)} = (2 \cdot 10^{-6} \text{ [1/h]}, 0.8, 0.05),$$

$$A^{(3)}_1 = [(1002), \xi^{(3)}_1], \xi^{(3)}_1 = (8.3 \cdot 10^{-6} \text{ [1/h]}, 0.1, 0.1),$$

$$A^{(3)}_2 = [(1002), \xi^{(3)}_2], \xi^{(3)}_2 = (8.3 \cdot 10^{-6} \text{ [1/h]}, 0.1, 0.1).$$

In this case, the stream of “not worked-out” incidents per EP channel has the following rates:

$$F_t(1,1) = 9 \cdot 10^{-4} \text{ [1/year]};$$

$$F_t(1,2) = F_t(1,3) = 10^{-3} \text{ [1/year]};$$

$$F_t(2,1) = F_t(2,2) = 1.5 \cdot 10^{-3} \text{ [1/year]}.$$

EP channels have the following risk reduction factors:

$$RRF_t(1,1) = 390;$$

$$RRF_t(1,2) = 332;$$

$$RRF_t(1,3) = 332;$$

$$RRF_t(2,1) = 332;$$

$$RRF_t(2,2) = 332.$$

$$\text{Costs } C_j(A^t, T) = 72.7 = 72.7 \text{ thousand rubles / year.}$$

## References

1. **Karmanov A.V., Telyuk A.S.** Model and algorithm for calculating basic indicators of a multi-channel system of emergency protection. M.: Automation, telemechanics and communications in oil industry, 2013, No.2.
2. **Fedorov Y.N.** Handbook of CAM engineer: design and development. Moscow: Infra-Engineering, 2008.
3. **Cox D.R., Smith V.L.** The renewal theory. Moscow: Soviet Radio, 1967.
4. **Karmanov A.V., Shershukova K.P., Telyuk A.S.** Method for defining system safety rated parameters of emergency protection for processes of production preparation of oil-and-gas wells. Moscow: Scientific and technical journal “Dependability”, 2012, No. 3 (42).
5. **D. MacDonald**, Industrial security, risk assessment and emergency stop systems. M.: “IDT Group”, 2007.
6. RD 03-496-02. Guidelines for the assessment of damage from accidents at hazardous production facilities. RF GosGorTechNadzor order dated October 29, 2002 No. 63.

**Аксенов В.А., Раенок Д.Л., Завьялов А.М.**

## **СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ РИСКАМИ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ПО ОБЕСПЕЧЕНИЮ БЕЗОПАСНОСТИ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССОВ НА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОМ ТРАНСПОРТЕ**

*В статье рассматриваются вопросы формирования системы управления профессиональными рисками на железнодорожном транспорте. Показана возможность модернизации существующей системы управления охраной труда в тесной взаимосвязи с методологией управления ресурсами и рисками на всех этапах жизненного цикла объектов и техники на основе анализа надёжности (УРРАН).*

**Ключевые слова:** управление рисками, система управления охраной труда, УРРАН.

В настоящее время на сети железных дорог внедряется методология управления ресурсами и рисками на всех этапах жизненного цикла объектов и техники на основе анализа надёжности (УРРАН) [1,2,3,4,5], которая является базовым элементом управления эксплуатационной работой. Одной из задач внедряемой методологии является управление рисками объектов и техники железнодорожной инфраструктуры, решение которой позволит значительно эффективнее предупреждать наступление нежелательных событий.

Важной составляющей системы управления охраной труда (СУОТ) являются профессиональные риски. В 2011 году в статью 209 Трудового кодекса РФ было внесено понятие профессиональный риск – это вероятность причинения вреда здоровью в результате воздействия вредных или опасных производственных факторов при исполнении работником обязанностей по трудовому договору или в иных случаях, установленных ТК РФ и другими федеральными законами. С учетом вышесказанного, для решения задач по модернизации СУОТ правлением ОАО «РЖД» было принято решение по переходу от реактивной СУОТ к проактивной с учетом анализа и оценки профессиональных рисков.

В рамках практической реализации принятого направления модернизации СУОТ, ОАО «РЖД» осуществляет ряд пилотных проектов на полигонах Октябрьской и Горьковской железных дорог, в Октябрьской дирекции по ремонту пути, структурном подразделении Центральной дирекции по ремонту пути.

Анализ результатов реализации пилотных проектов показывает существенное отличие в подходах к оценке профессиональных рисков на уровне структурных подразделений. Как показывает в том числе и анализ зарубежной методологии, основой оценки профессиональных рисков применительно к рабочим местам являются в большей степени экспертные методы.

Последнее ставит задачу увязки методологических подходов, реализуемых УРРАН, с результатами мировых практик и наработок, используемых в рамках реализации пилотных проектов.

Методология УРРАН в оценке рисков предполагает определение показателей надежности для оцениваемого объекта на основе имеющихся статистических данных о произошедших нежелательных событиях [2]. Одной из базовых количественных характеристик надежности является интенсивность отказов, которая определяется как:

$$\tilde{\lambda}(t) = \frac{n(\Delta t)}{N_{cp}\Delta t}, \quad (1)$$

где  $N_{cp} = \frac{N_i + N_{i+1}}{2}$  – среднее число исправно работающих изделий в интервале  $\Delta t$ ;  $N_i$  – число изделий, исправно работающих в начале интервала  $\Delta t$ ;

$N_{i+1}$  – число изделий, исправно работающих в конце интервала  $\Delta t$ .

В случае оценки профессионального риска интенсивность возникновения несчастного случая будет находиться по формуле:

$$\lambda^{nc} = \frac{t}{N_{cp}\Delta T}, \quad (2)$$

где  $t$  – количество несчастных случаев,

$\Delta T$  – интервал наблюдения,

$N_{cp}$  – среднее количество работников за интервал наблюдения.

Так, для Октябрьской дирекции по ремонту пути интенсивность возникновения несчастных случаев по подразделениям за десятилетний период представлена в Таблице 1.

**Таблица 1. Интенсивность возникновения несчастных случаев  
по подразделениям дирекции**

| Подразделение | Всего несчастных случаев, $t$ | Смертельных несчастных случаев, $tc$ | Среднее количество работников, $N$ | Интенсивность возникновения несчастного случая по подразделению, $\lambda$ | Интенсивность возникновения смертельного несчастного случая по подразделению, $\lambda_c$ |
|---------------|-------------------------------|--------------------------------------|------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|
| ОПМС-1        | 0                             | 0                                    | 357                                | 0                                                                          | 0                                                                                         |
| ОПМС-8        | 0                             | 0                                    | 247                                | 0                                                                          | 0                                                                                         |
| ПМС-28        | 3                             | 2                                    | 235                                | 0,001160542                                                                | 0,000773694                                                                               |
| ПМС-29        | 0                             | 0                                    | 308                                | 0                                                                          | 0                                                                                         |
| ПМС-75        | 2                             | 1                                    | 314                                | 0,000579039                                                                | 0,000289519                                                                               |
| ПМС-77        | 9                             | 1                                    | 353                                | 0,002317796                                                                | 0,000257533                                                                               |
| ПМС-82        | 6                             | 0                                    | 273                                | 0,001998002                                                                | 0                                                                                         |
| ПМС-83        | 0                             | 0                                    | 218                                | 0                                                                          | 0                                                                                         |
| ПМС-88        | 8                             | 0                                    | 338                                | 0,002151694                                                                | 0                                                                                         |
| ПМС-199       | 1                             | 0                                    | 242                                | 0,000375657                                                                | 0                                                                                         |
| ПМС-263       | 4                             | 0                                    | 348                                | 0,001044932                                                                | 0                                                                                         |
| ПМС-283       | 0                             | 0                                    | 325                                | 0                                                                          | 0                                                                                         |
| ПМС-292       | 1                             | 1                                    | 157                                | 0,000579039                                                                | 0,000579039                                                                               |
| Всего:        | 34                            | 5                                    | 4346                               | 0,000711208                                                                | 0,000104589                                                                               |

При этом в последней строке представлена интенсивность возникновения несчастных случаев в общем по дирекции, а цвет ячеек последних двух столбцов говорит об уровне их значения относительно средней интенсивности возникновения несчастных случаев. На рис. 1 представлена графическая интерпретация результатов расчета.

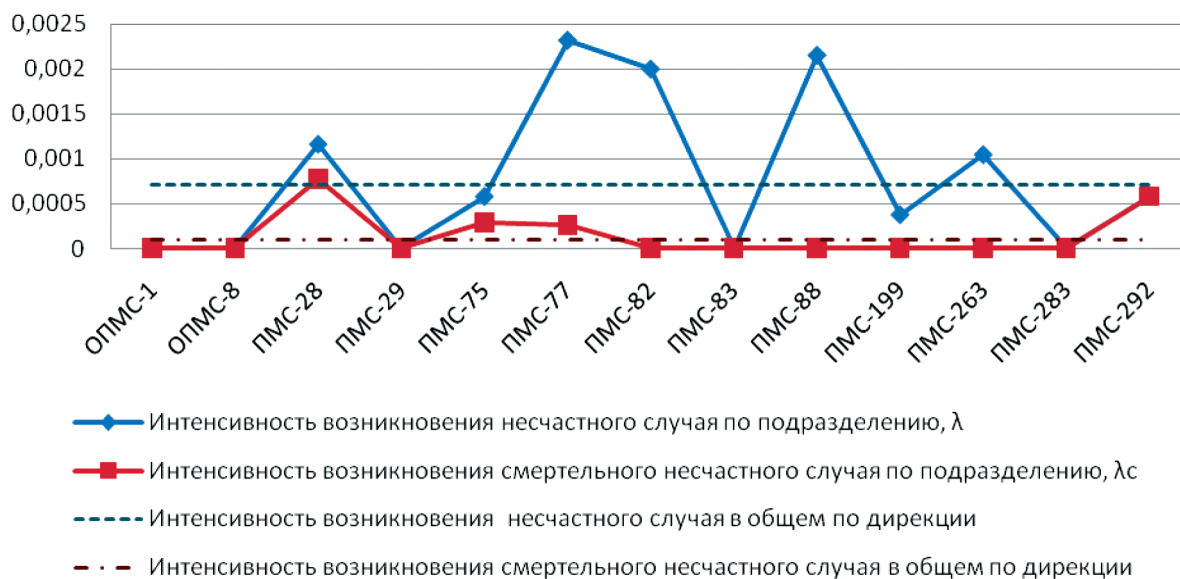


Рис. 1. Интенсивность возникновения несчастных случаев по подразделениям дирекции

Динамика изменения интенсивности возникновения несчастных случаев за одиннадцатилетний период по дирекции представлена в Таблице 2, а графическая интерпретация расчета на рис. 2.

Таблица 2. Динамика изменения интенсивности возникновения несчастных случаев

| Год    | Всего несчастных случаев, $r$ | Смертельных несчастных случаев, $r_c$ | Среднее количество работников, $N$ | Интенсивность возникновения несчастного случая по подразделению, $\lambda$ | Интенсивность возникновения смертельного несчастного случая по подразделению, $\lambda_c$ |
|--------|-------------------------------|---------------------------------------|------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|
| 2000   | 4                             | 1                                     | 4339                               | 0,000921871                                                                | 0,000230468                                                                               |
| 2001   | 5                             | 2                                     | 4111                               | 0,001216249                                                                | 0,0004865                                                                                 |
| 2002   | 0                             | 0                                     | 4318                               | 0                                                                          | 0                                                                                         |
| 2003   | 5                             | 1                                     | 4442                               | 0,001125619                                                                | 0,000225124                                                                               |
| 2004   | 5                             | 0                                     | 4395                               | 0,001137656                                                                | 0                                                                                         |
| 2005   | 5                             | 0                                     | 4471                               | 0,001118318                                                                | 0                                                                                         |
| 2006   | 1                             | 0                                     | 4463                               | 0,000224065                                                                | 0                                                                                         |
| 2007   | 2                             | 0                                     | 4512                               | 0,000443262                                                                | 0                                                                                         |
| 2008   | 4                             | 1                                     | 4670                               | 0,000856531                                                                | 0,000214133                                                                               |
| 2009   | 1                             | 0                                     | 4176                               | 0,000239464                                                                | 0                                                                                         |
| 2010   | 2                             | 0                                     | 3908                               | 0,000511771                                                                | 0                                                                                         |
| Всего: | 34                            | 5                                     | 4346                               | 0,000711208                                                                | 0,000104589                                                                               |

Как показала практика, результаты анализа травматизма обладают крайне низкой информативностью для выявления причинно-следственных связей на уровне структурного подразделения. Поэтому в рамках пилотного проекта во всех структурных подразделениях Центральной дирекции по ремонту пути был введен учет микротравм, частота появления которых на порядок выше. Ша-

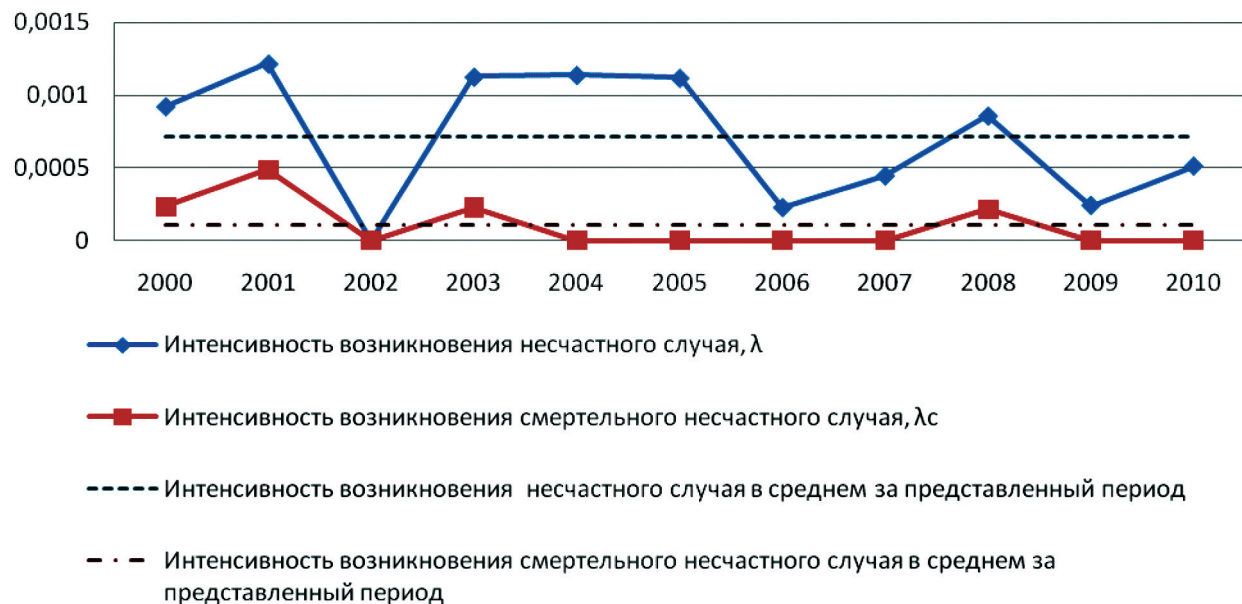


Рис. 2. Динамика изменения интенсивности возникновения несчастных случаев

блон журнала для учета микротравм представлен в Таблице 3. Расчет интенсивности получения микротравм производится по формуле:

$$\lambda^m = \frac{m}{N_{cp} \Delta T}, \quad (3)$$

где  $m$  – количество полученных микротравм.

Первые результаты анализа представлены в Таблице 4 и на рис. 3.

Таблица 3. Журнал учета микротравм

| №№<br>п/п | Должность | Дата и время получения микротравмы | Вид микротравмы (ушиб, порез, ожог, растяжение и т.д.) | Обстоятельства получения | Подробно<br>(в соответствии с классификатором) |                                      |                                     |                               |                      |         | Примечания | Время, потраченное на оказание медицинской помощи |
|-----------|-----------|------------------------------------|--------------------------------------------------------|--------------------------|------------------------------------------------|--------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------|----------------------|---------|------------|---------------------------------------------------|
|           |           |                                    |                                                        |                          | Время от начала производства работ             | Обращение в мед. учреждение (да/нет) | Источник (оборудование, инструмент) | Операция (этап) тех. процесса | Место (цех, перегон) | Причина |            |                                                   |
| 1         | 2         | 3                                  | 4                                                      | 5                        | 6                                              | 7                                    | 8                                   | 9                             | 10                   | 11      | 12         | 13                                                |
|           |           |                                    |                                                        |                          |                                                |                                      |                                     |                               |                      |         |            |                                                   |

Таблица 4. Интенсивность получения микротравм по профессиям

| Профессия   | Микротравм, $m$ | Интенсивность возникновения микротравм, $\lambda$ |
|-------------|-----------------|---------------------------------------------------|
| Монтер пути | 92              | 0,053625554                                       |
| Машинист    | 38              | 0,022149685                                       |
| Слесарь     | 10              | 0,005828865                                       |
| Мастер      | 7               | 0,004080205                                       |
| Инженер     | 7               | 0,004080205                                       |

|                    |   |             |
|--------------------|---|-------------|
| Водитель           | 6 | 0,003497319 |
| Наладчик           | 5 | 0,002914432 |
| Газоэлектросварщик | 3 | 0,001748659 |
| Кондуктор          | 3 | 0,001748659 |
| Бригадир           | 2 | 0,001165773 |

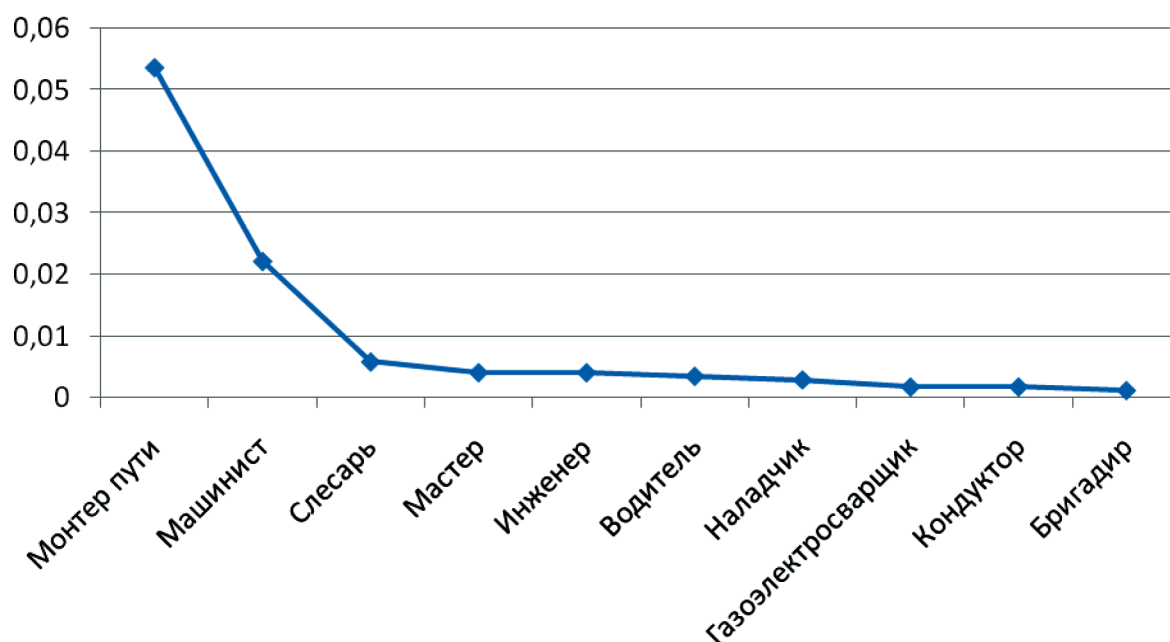


Рис. 3. Интенсивность получения микротравм по профессиям

При этом важно отметить наличие явной корреляционной связи между травмированием и микро-травмированием, что позволяет на основе большего на порядки объема данных по микро-травмированию прогнозировать, а, следовательно, предупреждать более тяжелые несчастные случаи.

Интенсивность возникновения профессиональных заболеваний рассчитывается по формуле:

$$\lambda^{nz} = \frac{d}{N_{cp} \Delta T}, \quad (4)$$

где  $d$  – количество профессиональных заболеваний.

В Таблице 5 и на рис. 4 представлены значения интенсивности возникновения профессиональных заболеваний по данным [6].

Таблица 5. Интенсивность возникновения профессиональных заболеваний по профессиям

| Профессия                        | Интенсивность возникновения профессионального заболевания, $\lambda$ |
|----------------------------------|----------------------------------------------------------------------|
| Машинисты путевых машин          | 0,0000326                                                            |
| Монтеры пути                     | 0,00000279                                                           |
| Дежурные по переезду             | 0,000000617                                                          |
| Операторы дефектоскопных тележек | 0,000000378                                                          |



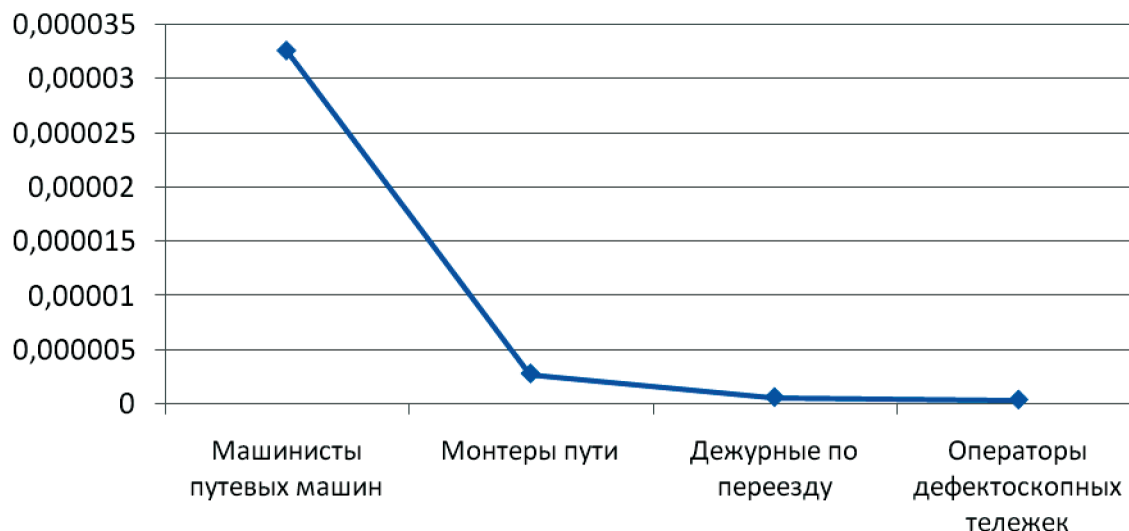


Рис. 4. Интенсивность возникновения профессиональных заболеваний

Ущерб, полученный в результате возникновения обозначенных выше нежелательных событий, может быть оценен по методике [7].

Полученные в результате расчета на базе методологии УРРАН данные используются на центральном и региональном уровне (рис. 5) для проведения анализа и оценки риска.



Рис. 5. Модель управления профессиональными рисками

Вместе с тем, задачи анализа условий труда на рабочем месте и адресного планирования мероприятий по их улучшению, учитывающих реально существующие опасности на рабочих местах, можно качественно выполнить, используя экспертные методы, которые позволяют идентифициро-

вать опасности для конкретных профессий работников в подразделении. При этом для получения более качественного результата в процесс анализа необходимо вовлекать и самих работников и специалистов предприятия.

Для проведения экспертного анализа в рамках структурного подразделения формируется рабочая группа экспертов, в которую входят главный инженер, инженер по охране труда, технолог и другие специалисты по усмотрению руководителя структурного подразделения[6]. Составляющими экспертного анализа являются анкетирование работников и протокол наблюдения рабочей группы. Анкетирование позволяет вовлечь в данные исследования и учесть мнения и особенности личностных характеристик работников. Опросные листы (анкеты) содержат следующие категории составляющих производственной деятельности:

- личностные характеристики;
- подверженность опасным и вредным производственным факторам;
- травмы, микротравмы, заболевания;
- организация трудового процесса, психологические условия;
- организация рабочего времени;
- исполнение работодателем работ, касающиеся охраны и безопасности труда;
- обучение.

Пример обработки результатов анкетирования представлен в Таблице 6.

**Таблица 6. Результаты анкетирования**

| Опасность                                                                      | Существует ли опасность (риск) – ? |        |              |           |
|--------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------|--------|--------------|-----------|
|                                                                                | Очень опасно                       | Опасно | Менее опасно | Не опасно |
| Отсутствие ограждения места производства работ                                 | 304                                | 210    | 40           | 11        |
| Неприменение спецодежды, спецобуви, средств индивидуальной защиты              | 100                                | 336    | 112          | 17        |
| Отсутствие предупреждающих, запрещающих, указательных знаков                   | 181                                | 316    | 59           | 9         |
| Состояние служебных проходов                                                   | 55                                 | 331    | 159          | 20        |
| Неисправность инструмента, оборудования                                        | 227                                | 264    | 63           | 11        |
| Метеорологические условия (снегопад, туман, дождь, жара, сильный ветер и т.п.) | 139                                | 322    | 93           | 11        |
| Шум, вибрация                                                                  | 90                                 | 338    | 119          | 18        |
| Недостаточность освещения места производства работ                             | 194                                | 291    | 77           | 3         |
| Отвлечение внимания при работе (плохое самочувствие, обида, стресс и т.д.)     | 149                                | 281    | 116          | 19        |
| Утомление организма                                                            | 128                                | 290    | 120          | 27        |
| Самовольное производство работ, которое не поручалось.                         | 177                                | 237    | 126          | 25        |
| Недостаточный опыт выполнения производственных операций                        | 154                                | 293    | 108          | 10        |
| Пожар                                                                          | 424                                | 72     | 56           | 13        |

Формирование протокола наблюдения помогает выявлять на основе экспертных заключений (работа рабочей группы) потенциальные опасности, подстерегающие работника на его рабочем месте.

На основе полученных результатов работы группа экспертов формирует реестр рисков, которые ранжируются по уровню (Таблица 7). Для рисков, являющихся недопустимыми, разрабатываются корректирующие и предупреждающие мероприятия.

Таблица 7. Пример реестра недопустимых рисков

УТВЕРЖДАЮ

РЕЕСТР НЕДОПУСТИМЫХ РИСКОВ

Должность: \_\_\_\_\_

Ф.И.О.: \_\_\_\_\_ / \_\_\_\_\_

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20 \_\_ г.

| Профес-сия  | Опасность                                                              | Действую-щий риск | Корректирующие мероприятия                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | Планируе-мый риск |
|-------------|------------------------------------------------------------------------|-------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------|
| Монтер пути | Наезд подвижного состава                                               | 25                | Приобретение и оборудование фронта работ на двухпутных и многопутных участках системами оповещения (типа Минимел) и новейшими системами ограждения (ЭЛОД-160). Приобретение защитных касок со встроенными в наушники переговорными радиостанциями. Приобретение мегафонов, радиостанций, автоматических оповестительных сигнализаций (в соответствии с технологией производства работ).<br>Оборудование фронта работ на двухпутных и многопутных участках временными ограждениями и автоматическими предупредительными устройствами.<br>Увеличение количества сигналистов в штатном расписании. Обучение сигналистов. | 16                |
|             | Пожар в разъездном (жилом) вагоне                                      | 20                | Ремонт вагонов. Включение в инвестиционную программу приобретения новых вагонов для проживания и сопровождения машин. Полная замена парка жилых вагонов и вагонов, предназначенных для «турной езды» (1973-1974 годы постройки). Приобретение газоанализаторов. Обработка противопожарным раствором. Оснащение вагонов системами объемного тушения.                                                                                                                                                                                                                                                                   | 12                |
|             | Придавливание рук или ног при выполнении погрузочно-разгрузочных работ | 16                | Приобретение необходимого объема грузозахватных приспособлений (траверсы, челночные приспособления, стропы и т.п.) для путеукладочных кранов в соответствии с требованиями к устройству и безопасной эксплуатации (РД 10-231-98)<br>Проведение совместных практических занятий (машинист УК, машинист козлового крана, монтер пути-стропальщик) по применению знаковой сигнализации.                                                                                                                                                                                                                                  | 10                |
|             | ...                                                                    |                   |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |                   |

Члены рабочей группы:

| Должность | Ф.И.О. | Подпись |
|-----------|--------|---------|
|           |        |         |
|           |        |         |
|           |        |         |
|           |        |         |

Следует отметить, что в рамках пилотных проектов традиционная технология проведения вводного, первичного и целевого инструктажей была дополнена картой рисков, сформированной на основе полученного реестра недопустимых рисков.

Подводя итоги результатов проведенных исследований можно сделать следующий вывод: методологию УРРАН целесообразно использовать как ядро системы управления профессиональными рисками. Она обеспечивает возможность эффективного решения задач анализа и оценки рисков для последующего формирования корректирующих мероприятий и мониторинга эффективности их реализации. При этом в сочетании с экспертными методами, которые позволяют выявлять опасности и оценивать риски, подстерегающие работников конкретного структурного подразделения на его рабочем месте, появляется возможность гораздо глубже исследовать причинно-следственные связи, обуславливающие те или иные риски для адресного планирования предупреждающих действий.

## Литература

1. СТО РЖД 02.037-2011 «Управление ресурсами, рисками и надежностью на этапах жизненного цикла (УРРАН). Управление стоимостью жизненного цикла систем, устройств и оборудования хозяйств ОАО «РЖД».
2. СТО РЖД 02.043-2011 «Управление ресурсами, рисками и надежностью на этапах жизненного цикла (УРРАН). Системы, устройства и оборудование хозяйства электрификации и электроснабжения. Требования надежности и функциональной безопасности».
3. Дополнение к методике анализа и оценки профессиональных рисков в ОАО «РЖД». РГУПС, 2008.
4. **Аксенов В.А., Раснок Д.Л., Завьялов А.М.** Ход реализации пилотного проекта по внедрению менеджмента рисков на полигоне Октябрьской дирекции по ремонту пути. Техносферная и экологическая безопасность на транспорте: материалы III Международной научно-практической конференции, Санкт-Петербург, 21-23 ноября 2012 г. – СПб. : Петербургский гос. ун-т путей сообщения, 2012. – 298 с. С. 208-212.

**Aksenov V.A., Raenok D.L., Zavyalov A.M.**

## **IMPROVING THE SYSTEM OF RISK MANAGEMENT TO ENSURE THE SAFETY OF PRODUCTION PROCESSES**

*The paper discusses the issues related to development of the system of professional risks management on railway transport. The possibility of modernizing the existing system of labour protection management has been demonstrated in close relationship with the methodology of resource and risk management at all stages of the life cycle of facilities and equipment on the basis of reliability analysis (URRAN).*

**Keywords:** risk management, labour protection management system, URRAN.

Currently, the railway network witnesses the implementation of methodology for managing resources and risk management at all stages of the life cycle of facilities and equipment on the basis of reliability analysis (URRAN) [1,2,3,4,5], which is a basic for the management of the company's operations. One of the objectives of the implemented methodology is risk management of facilities and equipment of railway infrastructure, and the realization of this objective will allow in a much more effective way to prevent the occurrence of adverse events.

An important component of the labour protection management system (LPMS) is professional risks. In 2011, Article 209 of the Labour Code of the Russian Federation adopted the concept of a professional risk, i.e. the probability of causing harm to health from exposure to harmful or hazardous factors in the performance of duties of the employee under an employment contract, or in other cases stipulated by the Labour Code and other federal laws. With this in mind, to meet the challenges of modernizing the system of labour protection management, the board of JSC "Russian Railways" has decided to move from a reactive system to a proactive labour protection management system based on the analysis and evaluation of professional risks.

As part of the practical implementation of this strategy of LPMS modernization, RZD is currently realizing a number of pilot projects on the sites of the Oktyabrskaya Railway and the Gorkovskaya Railway, the Central Directorate for Track Repair, the branch of JSC "Russian Railways" in the Oktyabrskaya Directorate for track repair.

Analysis of the results of the pilot projects shows a significant difference in the approaches to the assessment of professional risks at the level of business units. As the analysis of foreign methodology also shows, expert methods are to a greater extent the basis for assessment of professional risks in relation to employment.

The latter makes it important to coordinate the methodology implemented by URRAN with the results of worldwide practices and developments that are used as part of pilot projects.

For risk assessment, URRAN's methodology assumes defining the reliability parameters of the estimated object on the basis of available statistical data on the occurrence of adverse events [2]. One of the basic quantitative characteristics of the reliability is a failure rate defined as:

$$\tilde{\lambda}(t) = \frac{n(\Delta t)}{N_{cp} \Delta t}, \quad (1)$$

where  $N_{cp} = \frac{N_i + N_{i+1}}{2}$  is the average number of properly working products on the interval  $\Delta t$ ;  $N_i$  is the number of products in good working order at the beginning of the interval  $\Delta t$ ;  $N_{i+1}$  is the number of products in good working order at the end of the interval.

In the case of professional risk assessment, the rate of accidents will be calculated as follows:

$$\lambda^{uc} = \frac{t}{N_{cp} \Delta T}, \quad (2)$$

where  $t$  is the number of accidents,  $\Delta T$  is the observation interval,  $N_{cp}$  is the average number of employees during the observation interval.

So, as for the Otyabryaskaya Directorate for Track Repair, the rate of accidents per business units over ten years is shown in Table 1.

**Table 1. Rate of accidents per the Directorate's business units**

| Business unit | Total accidents, t | Fatal accidents, tc | Average number of employees, N | Rate of accidents per unit, $\lambda$ | Rate of fatal accidents per unit, $\lambda c$ |
|---------------|--------------------|---------------------|--------------------------------|---------------------------------------|-----------------------------------------------|
| OPMS-1        | 0                  | 0                   | 357                            | 0                                     | 0                                             |
| OPMS-8        | 0                  | 0                   | 247                            | 0                                     | 0                                             |
| PMS-28        | 3                  | 2                   | 235                            | 0,001160542                           | 0,000773694                                   |
| PMS-29        | 0                  | 0                   | 308                            | 0                                     | 0                                             |
| PMS-75        | 2                  | 1                   | 314                            | 0,000579039                           | 0,000289519                                   |
| PMS-77        | 9                  | 1                   | 353                            | 0,002317796                           | 0,000257533                                   |
| PMS-82        | 6                  | 0                   | 273                            | 0,001998002                           | 0                                             |
| PMS-83        | 0                  | 0                   | 218                            | 0                                     | 0                                             |
| PMS-88        | 8                  | 0                   | 338                            | 0,002151694                           | 0                                             |
| PMS-199       | 1                  | 0                   | 242                            | 0,000375657                           | 0                                             |
| PMS-263       | 4                  | 0                   | 348                            | 0,001044932                           | 0                                             |
| PMS-283       | 0                  | 0                   | 325                            | 0                                     | 0                                             |
| PMS-292       | 1                  | 1                   | 157                            | 0,000579039                           | 0,000579039                                   |
| Total:        | 34                 | 5                   | 4346                           | 0,000711208                           | 0,000104589                                   |

The last row shows the rate of accidents in general for the Directorate, and the colour of the cells of the last two columns says about the level of their values in relation to the average rate of accidents. Fig. 1 shows a graphical interpretation of the results of the calculation.

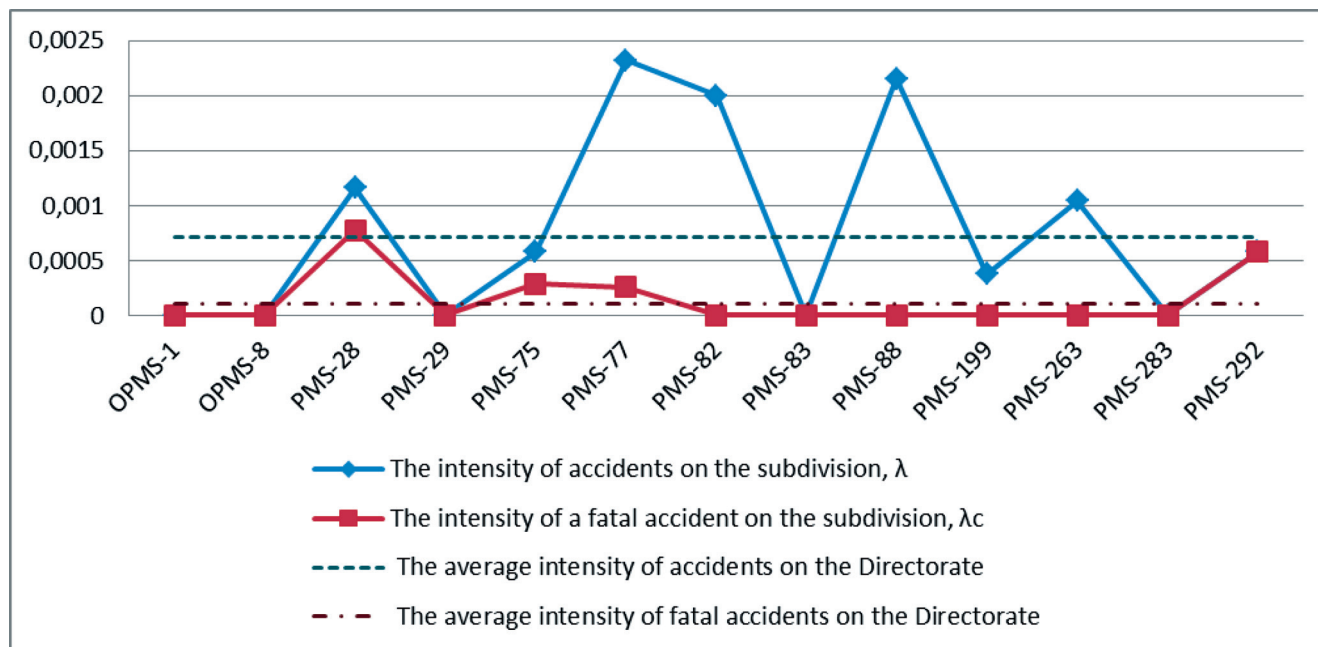


Fig. 1. The rate of accidents per the Directorate's units

The dynamics of changes in the rate of accidents per the Directorate for an eleven-year period is shown in Table 2, and the graphical interpretation of the calculation is shown in Fig. 2.

Table 2. Changes in the rate of accidents

| Year   | Total accidents, t | Fatal accidents, tc | Average number of employees, N | Rate of accidents per unit, λ | Rate of fatal accidents per unit, λc |
|--------|--------------------|---------------------|--------------------------------|-------------------------------|--------------------------------------|
| 2000   | 4                  | 1                   | 4339                           | 0,000921871                   | 0,000230468                          |
| 2001   | 5                  | 2                   | 4111                           | 0,001216249                   | 0,0004865                            |
| 2002   | 0                  | 0                   | 4318                           | 0                             | 0                                    |
| 2003   | 5                  | 1                   | 4442                           | 0,001125619                   | 0,000225124                          |
| 2004   | 5                  | 0                   | 4395                           | 0,001137656                   | 0                                    |
| 2005   | 5                  | 0                   | 4471                           | 0,001118318                   | 0                                    |
| 2006   | 1                  | 0                   | 4463                           | 0,000224065                   | 0                                    |
| 2007   | 2                  | 0                   | 4512                           | 0,000443262                   | 0                                    |
| 2008   | 4                  | 1                   | 4670                           | 0,000856531                   | 0,000214133                          |
| 2009   | 1                  | 0                   | 4176                           | 0,000239464                   | 0                                    |
| 2010   | 2                  | 0                   | 3908                           | 0,000511771                   | 0                                    |
| Total: | 34                 | 5                   | 4346                           | 0,000711208                   | 0,000104589                          |

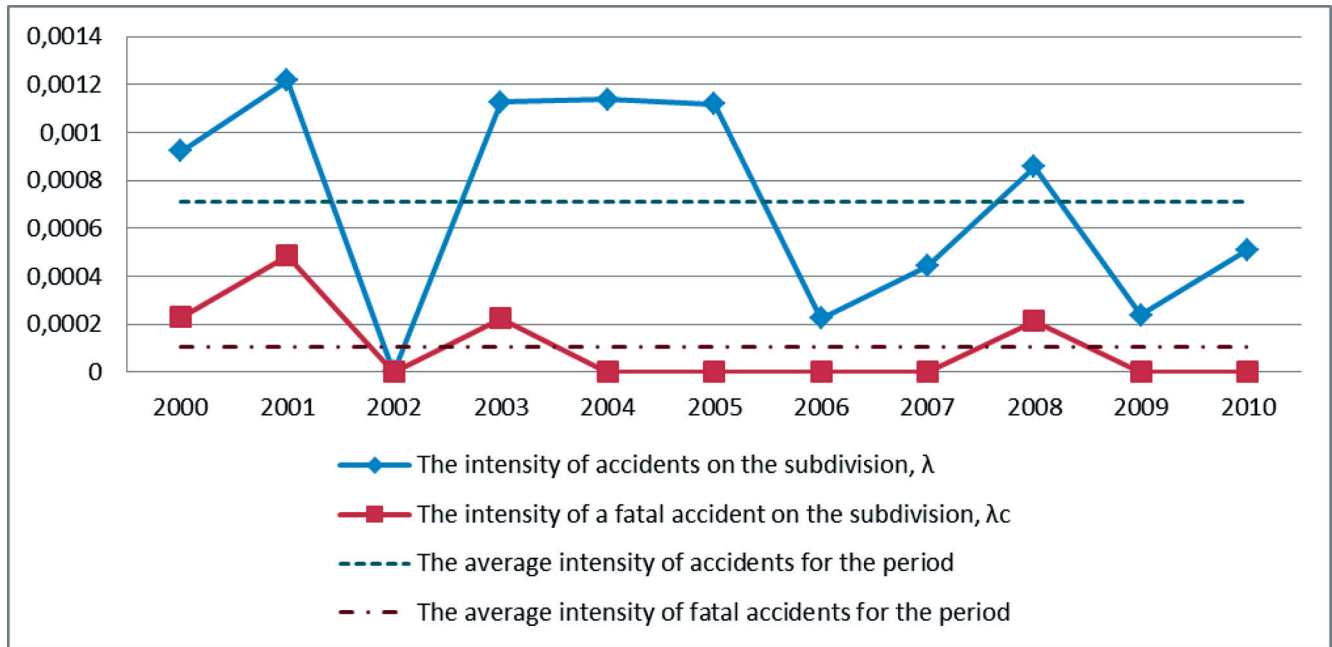


Fig. 2. Changes in the rate of accidents

As the practice has shown, the results of injury analysis are not much informative to identify cause-and-effect relationships at the level of structural units. Therefore, as part of a pilot project in all structural units of the Central Directorate for Track Repair, it was decided to take into account minor injuries which occur with a much higher frequency. The log template to register minor injuries is provided in Table 3. The rate of minor injuries is calculated by the formula:

$$\lambda^m = \frac{m}{N_{cp} \Delta T}, \quad (3)$$

where  $m$  is the number of suffered minor injuries.

The first results of the analysis are presented in Table 4 and Fig. 3.

Table 3. Log of minor injuries

| № | Position | Date and time of injury | Injury type (bruises, cuts, burns, stretch, etc.) | Circumstances of getting injured | Detail (according to the classifier) |                                         |                           |                                        |                    |       | Notes | Time spent on medical care |
|---|----------|-------------------------|---------------------------------------------------|----------------------------------|--------------------------------------|-----------------------------------------|---------------------------|----------------------------------------|--------------------|-------|-------|----------------------------|
|   |          |                         |                                                   |                                  | Time of commencement of work         | Appeal in honey. institution (yes / no) | Source (equipment, tools) | The operation (step) of those. process | Place (shop, haul) | cause |       |                            |
| 1 | 2        | 3                       | 4                                                 | 5                                | 6                                    | 7                                       | 8                         | 9                                      | 10                 | 11    | 12    | 13                         |
|   |          |                         |                                                   |                                  |                                      |                                         |                           |                                        |                    |       |       |                            |



**Table 4. The rate of microtraumas suffered per occupations**

| Occupation     | Microtrauma, $m$ | Rate of microtraumas, $\lambda$ |
|----------------|------------------|---------------------------------|
| railroad fixer | 92               | 0,053625554                     |
| motorman       | 38               | 0,022149685                     |
| locksmith      | 10               | 0,005828865                     |
| master         | 7                | 0,004080205                     |
| engineer       | 7                | 0,004080205                     |
| driver         | 6                | 0,003497319                     |
| serviceman     | 5                | 0,002914432                     |
| welder         | 3                | 0,001748659                     |
| conductor      | 3                | 0,001748659                     |
| foreman        | 2                | 0,001165773                     |

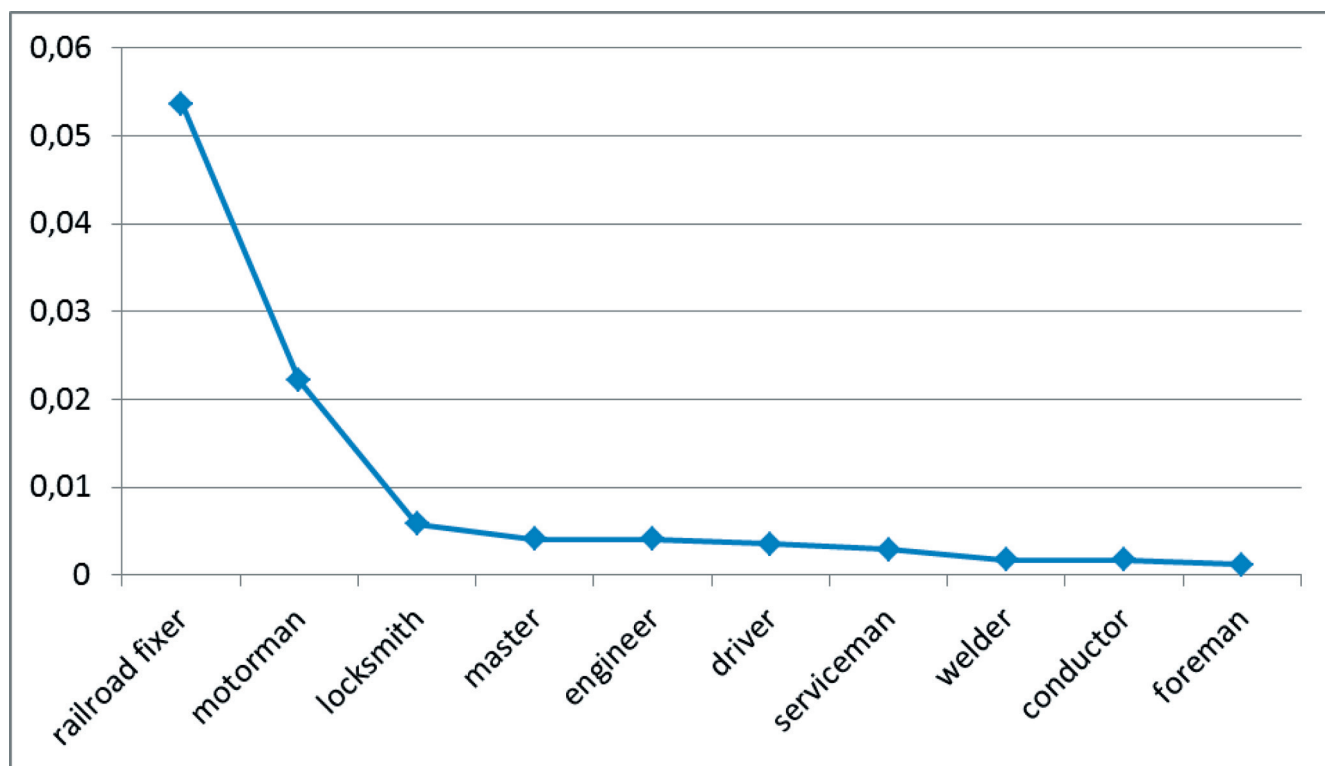


Fig. 3. The rate of microtraumas suffered per occupations

It is important to note that there is a clear correlation between injuries and minor injuries (microtraumas), which allows on the basis of much bigger amounts of data on minor injuries to predict and, therefore, prevent more serious accidents.

The rate of occurrence of occupational diseases is calculated by the formula:

$$\lambda^{n3} = \frac{d}{N_{cp} \Delta T}, \quad (4)$$

where  $d$  is the number of occupational diseases.

Table 5 and Fig. 4 show the rates of occupational diseases according to the data [6].

**Table 5. The rate of occurrence of occupational diseases per occupation**

| Profession                        | Rate of occurrence of occupational disease, $\lambda$ |
|-----------------------------------|-------------------------------------------------------|
| Machinists of track machines      | 0,0000326                                             |
| Railroad fixers                   | 0,00000279                                            |
| Operators of railway crossing     | 0,000000617                                           |
| Operators of trucks defectoscopic | 0,000000378                                           |

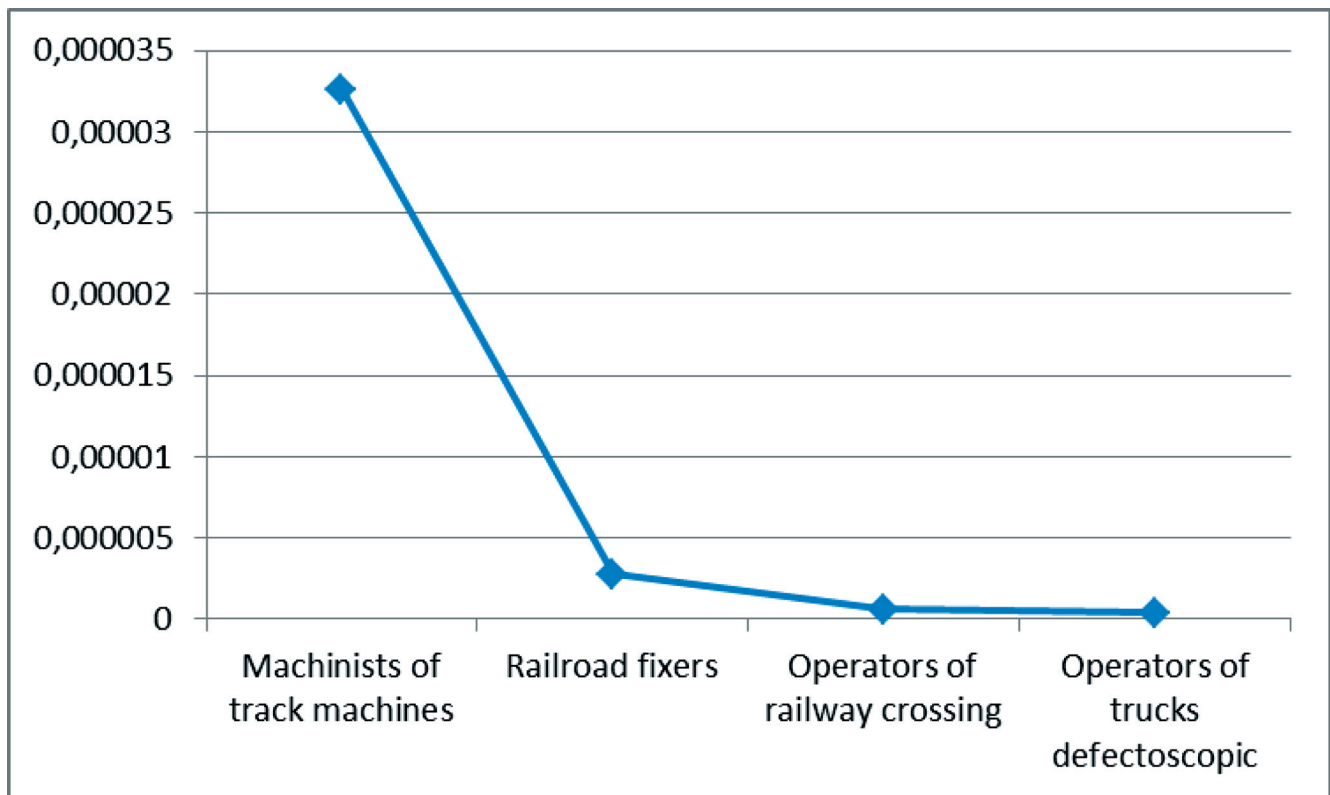


Fig. 4. The rate of occupational diseases

Damage resulting from the occurrence of undesirable events mentioned above may be evaluated as described in [7].

The data obtained as a result of calculation based on URRAN's methodology are used at central and regional levels (Fig. 5) for analysis and risk assessment.

However, the tasks related to analysis of working conditions at a workplace and addressed planning of activities for their improvement, which take into account real-world dangers existing at a workplace, can be qualitatively solved using expert methods that allow you to identify hazards for specific occupations of workers within a unit. In order to obtain a better result, workers and specialists of a unit should also be involved in the analysis process.

For expert analysis in the framework of a structural unit, one should form a working group of experts, including a chief engineer, labour engineer, production engineer and other specialists at the discretion of the head of a structural unit [6]. The elements of expert analysis are employee interviewing and sur-

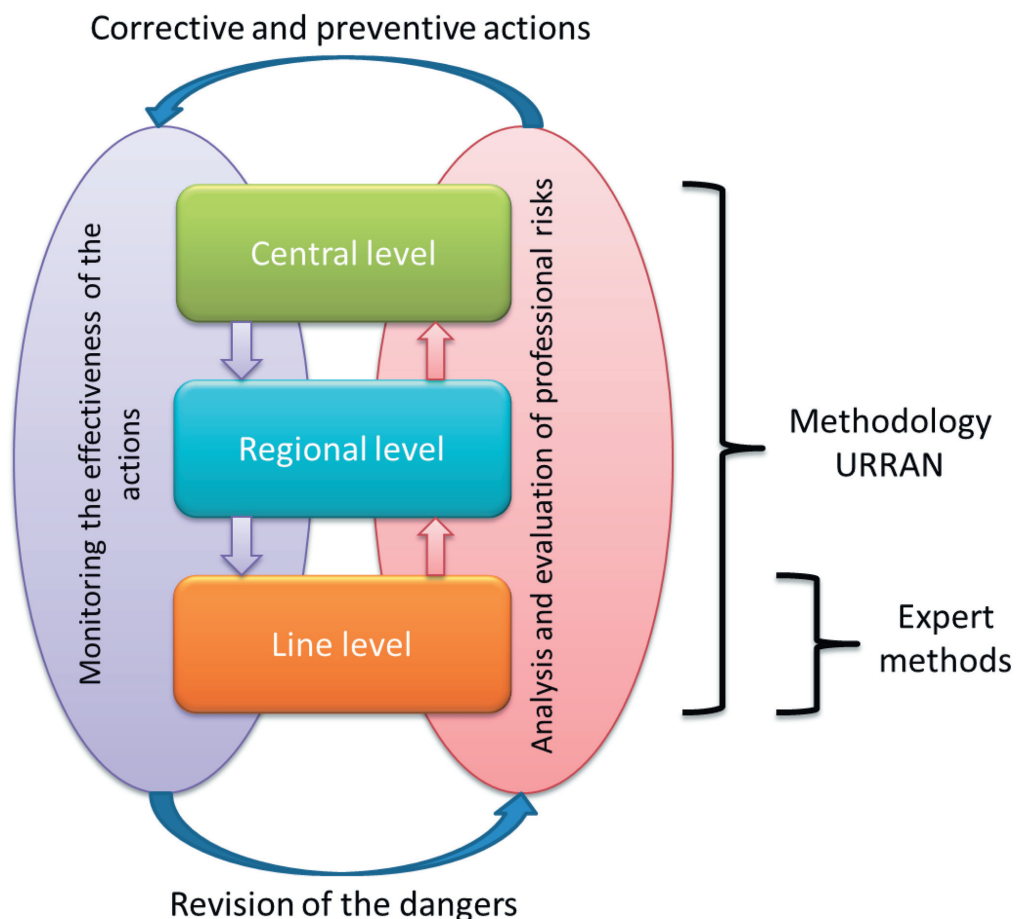


Fig. 5. Model of professional risk management

veillance protocols of a working group. Interviewing allows us to involve in these studies and consider the views and features of the personal characteristics of workers. Questionnaires contain the following categories of production activity components:

Table 6. Results of the survey

| Hazard                                                       | Is there some danger (risk) – ? |           |                |               |
|--------------------------------------------------------------|---------------------------------|-----------|----------------|---------------|
|                                                              | Very dangerous                  | Dangerous | Less dangerous | Not dangerous |
| Lack of work site protection                                 | 304                             | 210       | 40             | 11            |
| Non-use of uniforms, footwear, personal protective equipment | 100                             | 336       | 112            | 17            |
| Lack of warning, protection signs                            | 181                             | 316       | 59             | 9             |
| State of staff passes                                        | 55                              | 331       | 159            | 20            |
| Faulty tools, equipment                                      | 227                             | 264       | 63             | 11            |
| Weather conditions (snow, fog, rain, heat, high winds, etc.) | 139                             | 322       | 93             | 11            |
| Noise, vibration                                             | 90                              | 338       | 119            | 18            |
| Bad lighting of work sites                                   | 194                             | 291       | 77             | 3             |
| Distractions at work (feeling sick, hurt, stress, etc.)      | 149                             | 281       | 116            | 19            |
| Fatigue                                                      | 128                             | 290       | 120            | 27            |
| Unauthorized production work, which is not instructed        | 177                             | 237       | 126            | 25            |
| Not enough experience in manufacturing operations            | 154                             | 293       | 108            | 10            |
| Fire                                                         | 424                             | 72        | 56             | 13            |

- personal characteristics;
- exposure to dangerous and harmful production factors;
- injuries, minor injuries, diseases;
- organization of labour process, psychological conditions;
- organization of working time;
- realization of activities by the employer relating to labour protection and safety;
- training.

The example of processing the survey results is presented in Table 6.

**Table 7. The example of the inventory of unacceptable risks**

### INVENTORY OF UNACCEPTABLE RISKS

APPROVED BY

Position: \_\_\_\_\_

Name: \_\_\_\_\_ / \_\_\_\_\_

« \_\_\_\_\_ » 20\_\_.

| Occupation      | Hazard                                                       | Current risk | Corrective actions                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | Planned risk |
|-----------------|--------------------------------------------------------------|--------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------|
| Track repairman | Getting run over by rolling stock                            | 25           | Acquisition and installation of advanced warning systems (such as Minimet) and protection systems (ELOD-160) on work sites on double-track and multiple-track sections. Acquisition of safety helmets with voice stations built in headphones. Acquisition of megaphones, radio stations, automatic warning systems (in accordance with the technology of production works). Equipment work sites on double-track and sections and multiple-track sections with temporary protections and automatic warning devices. Increasing the number of signalmen in the unit. Training of signalmen. | 16           |
|                 | Fire in the traveling (residential) car                      | 20           | To repair of cars. To include acquisition of new cars for staff living and following vehicles into investment programs. Complete replacement of the fleet of residential cars and cars designed for "tour trips" (1973-1974 years of construction). Acquisition of gas analyzers. Treatment with fire-protection solutions. Equipping cars with total fire-extinguishing systems.                                                                                                                                                                                                           | 12           |
|                 | Crushing hands or feet when performing loading and unloading | 16           | Acquisition of necessary amounts of hoisting equipment (yokes, shuttle devices, slings and the like) for track-laying cranes in compliance with the requirements for safe operation of the devices (RD 10-231-98). Conduction of joint workshops (track-laying machine driver, gantry crane driver, sling operator) related to use of signs and signals.                                                                                                                                                                                                                                    | 10           |
|                 | ...                                                          |              |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |              |

Members of the working group:

| Position | Name | Signature |
|----------|------|-----------|
|          |      |           |
|          |      |           |
|          |      |           |
|          |      |           |

Preparation of a surveillance protocol helps to identify on the basis of expert opinions (the work of a working group) of the potential dangers lying in wait for the worker at a workplace.

Based on the results, the group of experts creates an inventory of risks, which are ranked by level (Table 7). For risks that are unacceptable, corrective and preventive actions shall be developed.

It should be noted that as part of the pilot projects, the traditional technology of introductory, primary and targeted briefings has been complemented with a map of risks formed on the basis of the obtained inventory of unacceptable risks.

To sum up the results of the researches made, we can conclude that the URRAN methodology should be used as the nucleus of the system for managing professional risks. It provides the possibility to effectively address the problems related to risk analysis and assessment, for subsequent development of corrective activities and monitoring of the effectiveness of their implementation. Also, combined with expert techniques that identify hazards and assess risks that await employees of a particular structural unit at their workplaces, it provides the opportunity to explore in a much deeper way cause-and-effect relationships stipulating some or other risks, in order to plan specific preventive activities.

## References

1. **Gapanovich V.A.** Versatile tool to support decision making. Rail transport. Moscow: Transport, 2012. No.10.
2. STO RZD 02.037-2011 "Management of resources, risks and reliability at stages of the life cycle (URRAN). Management of life cycle cost of RZD enterprises' systems, devices and equipment".
3. STO RZD 02.041-2011 "Management of resources, risks and reliability at stages of the life cycle (URRAN). Systems, devices and equipment of track enterprises. The requirements for reliability and functional safety".
4. STO RZD 02.043-2011 "Management of resources, risks and reliability at stages of the life cycle (URRAN). Systems, devices and equipment of electrification and power supply enterprises. The requirements for reliability and functional safety".
5. STO RZD 02.044-2011 "Management of resources, risks and reliability at stages of the life cycle (URRAN). Terms and definitions".
6. Supplement to the methods of analysis and evaluation of professional risks of JSC "Russian Railways". PGUPS, 2008.
7. Methods of assessing the extent of damage caused by accidents at hazardous production facilities of JSC "Russian Railways", accidents at work, occupational diseases suffered by the employees of the structural units of JSC "Russian Railways". Approved by RZD Vice President V.A.Popov, No. VP-14188 dated 26.11.2007.
8. **Aksenov V.A., Raenok D.L., Zavyalov A.M.** Progress of the pilot project to introduce risk management on the site of the Otyabrskaya Directorate for track repair. Technospheric and environmental safety on transport: Proceedings of the III International Scientific and Practical Conference, Saint-Petersburg, November 21-23, 2012. – St. Petersburg: Saint Petersburg State University of Railways, 2012. – 298 pp. Pp. 208-212.

## Предисловие Дзиркала Э.В. к статье Демидовича Н.О.

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). Классический последовательный метод А.Вальда не предполагает каких-либо ограничений по времени испытаний. Как только область неопределённости Вальда усекают – заметно возрастают риски поставщика и потребителя. И неизвестно, на каком уровне эту область усекать – тут полный произвол. Например, задаются риски по 0,1, а получаются 0,13 (а что получается – кое-кто может оценить, в т.ч. и Демидович Н.О. своим методом).

Демидович Н.О. разработал метод, позволяющий подобрать границы так, что последовательный контроль с их использованием обеспечит точные значения заданных рисков. Границы по методу Демидовича Н.О. могут образовывать область неопределённости любой формы, в т.ч. замкнутую, не требующую усечения (сам он принял при разработке треугольную). Метод признан специалистами ИСО/МЭК, узаконен в РФ стандартом ГОСТ Р 27.402-95 и вошёл во вторую редакцию проекта международного стандарта ИЕС 61124, подготавливаемую к выпуску.

Отметим, что ещё раньше Демидовича в СССР появились планы Ярлыкова Н.Е. с теми же преимуществами.

Ясно, что планы Демидовича заведомо лучше «классических» планов Вальда, и последние следует заменить во всех стандартах и учебниках. Ниже приводятся две первых статьи Демидовича Н.О. из журнала «Надёжность и контроль качества» за 1990 и 1991 гг.

### С. 26 ГОСТ 27.410—87

Т а б л и ц а 17

$$\alpha = \beta = 0,1; T_{\alpha}/T_{\beta} = 2; t'_{\Sigma\alpha}/T_{\alpha} = 5,91; t'_{\Sigma\beta}/T_{\alpha} = 5,00$$

| $r$ | $t_{\Sigma\alpha}/T_{\alpha}$ | $t_{\Sigma\beta}/T_{\alpha}$ | $r$ | $t_{\Sigma\alpha}/T_{\alpha}$ | $t_{\Sigma\beta}/T_{\alpha}$ | $r$ | $t_{\Sigma\alpha}/T_{\alpha}$ | $t_{\Sigma\beta}/T_{\alpha}$ |
|-----|-------------------------------|------------------------------|-----|-------------------------------|------------------------------|-----|-------------------------------|------------------------------|
| 0   | 1,907                         | —                            | 14  | 11,884                        | 7,140                        | 28  | 20,413                        | 17,766                       |
| 1   | 2,860                         | 0,015                        | 15  | 12,513                        | 7,854                        | 29  | 21,006                        | 18,563                       |
| 2   | 3,695                         | 0,183                        | 16  | 13,137                        | 8,577                        | 30  | 21,598                        | 19,363                       |
| 3   | 4,473                         | 0,507                        | 17  | 13,758                        | 9,309                        | 31  | 22,188                        | 20,166                       |
| 4   | 5,217                         | 0,929                        | 18  | 14,376                        | 10,049                       | 32  | 22,775                        | 20,973                       |
| 5   | 5,936                         | 1,417                        | 19  | 14,990                        | 10,796                       | 33  | 23,363                        | 21,781                       |
| 6   | 6,636                         | 1,953                        | 20  | 15,602                        | 11,549                       | 34  | 23,949                        | 22,594                       |
| 7   | 7,322                         | 2,525                        | 21  | 16,211                        | 12,309                       | 35  | 24,533                        | 23,408                       |
| 8   | 7,997                         | 3,128                        | 22  | 16,817                        | 13,074                       | 36  | 25,117                        | 24,227                       |
| 9   | 8,663                         | 3,755                        | 23  | 17,422                        | 13,846                       | 37  | 25,699                        | 25,045                       |
| 10  | 9,319                         | 4,401                        | 24  | 18,023                        | 14,621                       | 38  | —                             | 25,699                       |
| 11  | 9,969                         | 5,065                        | 25  | 18,624                        | 15,400                       |     |                               |                              |
| 12  | 10,612                        | 5,744                        | 26  | 19,223                        | 16,186                       |     |                               |                              |
| 13  | 11,251                        | 6,436                        | 27  | 19,818                        | 16,975                       |     |                               |                              |

1. М. Б. Фарберман, Р. Д. Берштин, С. С. Дмитриченко «Планирование объемов последовательных испытаний деталей машин на долговечность». Вестник машиностроения, № 8, 1987, С. 3—6.

2. Harter H. L., Moore A. H. An Evaluation of Exponential and Weibull Test Plans IEEE Transactions on Reliability, Vol R—25, N 2, June 1976, p. 100—104.

3. Надёжность технических систем: Спр. Ю. К. Беляев, В. А. Богатырев, В. В. Болотин и др. Под ред. И. А. Ушакова. М.: Радио и связь, 1985.

Т а б л и ц а 5

**Планы контроля средних показателей надежности по последовательному  
методу для экспоненциального распределения**

| $T_a/T_\beta$           | $a$  | $r_0$ | $r_{yc}$ | $t_0/T_a$ | $t'_\Sigma/T_a$ |
|-------------------------|------|-------|----------|-----------|-----------------|
| $\alpha = \beta = 0,10$ |      |       |          |           |                 |
| 21,70                   | 6,74 | 0,713 | 1        | 0,106     | 0,099           |
| 7,30                    | 3,17 | 1,110 | 2        | 0,349     | 0,408           |
| 5,00                    | 2,49 | 1,370 | 3        | 0,549     | 0,735           |
| 4,83                    | 2,43 | 1,400 | 3        | 0,574     | 0,780           |
| 4,00                    | 2,16 | 1,590 | 4        | 0,732     | 1,090           |
| 3,83                    | 2,11 | 1,640 | 4        | 0,776     | 1,180           |
| 3,50                    | 2,00 | 1,750 | 5        | 0,879     | 1,410           |
| 3,29                    | 1,92 | 1,850 | 5        | 0,960     | 1,600           |
| 3,00                    | 1,82 | 2,000 | 6        | 1,100     | 1,960           |
| 2,94                    | 1,80 | 2,040 | 6        | 1,130     | 2,040           |
| 2,70                    | 1,71 | 2,210 | 7        | 1,290     | 2,480           |
| 2,53                    | 1,65 | 2,380 | 8        | 1,440     | 2,940           |
| 2,50                    | 1,64 | 2,400 | 9        | 1,460     | 3,010           |
| 2,39                    | 1,60 | 2,520 | 9        | 1,580     | 3,380           |

Продолжение табл. 5

| $T_a/T_\beta$ | $a$  | $r_0$ | $r_{yc}$ | $t_0/T_a$ | $t_\Sigma/T_a$ |
|---------------|------|-------|----------|-----------|----------------|
| 2,28          | 1,55 | 2,660 | 10       | 1,710     | 3,840          |
| 2,19          | 1,52 | 2,810 | 11       | 1,840     | 4,310          |
| 2,12          | 1,49 | 2,930 | 12       | 1,970     | 4,780          |
| 2,06          | 1,47 | 3,050 | 13       | 2,080     | 5,240          |
| 2,00          | 1,44 | 3,160 | 15       | 2,190     | 5,690          |
| 1,96          | 1,42 | 3,280 | 15       | 2,310     | 6,200          |
| 1,79          | 1,36 | 3,770 | 20       | 2,770     | 8,420          |
| 1,67          | 1,31 | 4,270 | 25       | 3,270     | 11,100         |
| 1,60          | 1,28 | 4,660 | 30       | 3,650     | 13,400         |
| 1,50          | 1,23 | 5,420 | 40       | 4,390     | 18,600         |

2,0, 0,1=0,1, 1,44 и 3,16, приёмка 1,44к – 3,16 = 1,44\*10 – 3,16 = 11,24, браковка 17,56

**Демидович Н.О.**

## **КРИТЕРИИ КАЧЕСТВА ПЛАНОВ КОНТРОЛЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ БЕЗОТКАЗНОСТИ**

Для контроля таких показателей безотказности, как наработка на отказ восстанавливаемых или средняя наработка до отказа невосстанавливаемых изделий, в нормативной литературе [1,2] регламентированы два основных вида планов, применяемых обычно в предположении об экспоненциальном распределении соответствующих случайных величин – наработок между отказами или до отказа: планы ограниченной продолжительности или с ограниченным числом отказов (вида I) и усеченные последовательные планы Вальда (вида II).

Далее будут рассматриваться планы с заменой или восстановлением отказавших изделий, однако результаты могут быть отнесены и к планам без замены (восстановления).

В качестве критериев при выборе планов руководствуются максимальной продолжительностью испытаний (у планов вида I она является минимальной) или средней продолжительностью (у планов вида II она близка к минимальной «с точностью до усечения»).

При усечении последовательных планов возрастают значения риска сторон по сравнению с номинальными. Такое увеличение может быть существенным (до 30 % и более) и им не всегда следует пренебрегать.

Наряду с указанными рассмотрим также другие критерии качества планов испытаний, которые упускают из виду при теоретических исследованиях, но они значимы для практики. Предварительно отметим, что из сопоставления границ планов видов I и II (рис. 1), можно сделать вывод о наличии в планах вида I «пустых» областей, слабо влияющих на формирование ошибочных решений. Такие области (верхняя и нижняя) на рисунке заштрихованы. Они характеризуются тем, что ступенчатые линии реализации процесса отказов, попавшие в эти области, выходят на соответствующие границы плана вида I с вероятностью, близкой к единице, при любой из гипотез.

Наиболее существенное обстоятельство, требующее учета при построении планов испытаний, состоит в том, что практически все виды изделий, наработки между отказами или до отказа которых аппроксимируют экспоненциальным распределением, имеют период приработки. В стандартизованных планах это не учитывается. Период приработки может меняться как по продолжительности, так и по характеру в зависимости от состояния технологического процесса и пр. Наличие приработки приводит к тому, что моменты возникновения отказов распределяются неравномерно по продолжительности испытаний, как это должно быть в случае экспоненциального распределения, а в большей степени концентрируются на начальном этапе испытаний. При этом линии реализации



процесса отказов вместо прямолинейного характера приобретают тенденцию к изгибу, выпуклой частью направленному к границе несоответствия плана вида II, пересекают ее, а впоследствии выходят на границу соответствия планов видов I и II так, как это показано на рис. 1. В результате неконтролируемым образом увеличивается риск изготовителя, когда приемлемая по надежности продукция может быть забракована. Указанное обстоятельство препятствует широкому применению планов вида II на практике, несмотря на их экономическую выгоду.

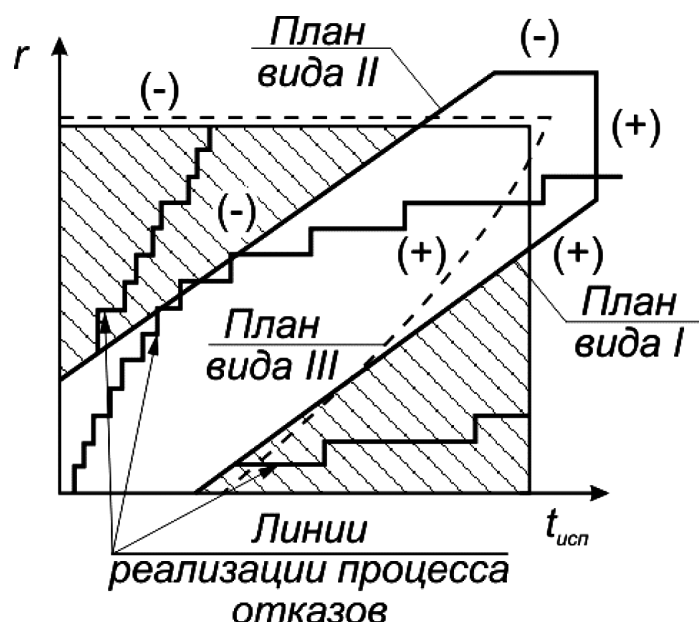


Рис. 1. Сопоставление границ планов испытаний различных видов. Заштрихованы области плана вида I, незначительно влияющие на значения риска сторон. Знаком (+) обозначены границы соответствия, границы несоответствия планов

Планы вида I являются нечувствительными к возможным приработкам, так как граница несоответствия в них представляет прямую, параллельную оси абсцисс. Другими словами можно сказать, что из двух заштрихованных на рис. 1 областей нижняя область всегда остается пустой, а верхняя в случае приработки таковой не является.

Приведенные рассуждения обосновывают целесообразность рассмотрения альтернативно планам вида II новых последовательных планов (вида III), которые получают не путем усечения вальдовских планов, а за счет исключения из соответствующих планов вида I нижней заштрихованной области. Общий характер границ таких планов показан на рис. 1 штриховой линией. Они, как будет показано дальше, сочетают в себе достоинства планов I и II и не имеют их недостатков.

Сохранение верхней области по существу означает задание одной из границ плана (несоответствия), что приводит к необходимости более детального осмысления такой характеристики, как средняя продолжительность испытаний. В этом отношении следует представлять реальное отношение сторон к продолжительности испытаний, имея в виду их возможное завершение с двумя противоположными итогами.

Изготовителю не свойственно стремление быстро завершать испытания с отрицательным итогом, в то время когда предусмотрена их большая продолжительность и можно ожидать улучшения результатов, т.е. он не склонен “преждевременно” принимать решение о несоответствии, несмотря на то, что несет расходы по проведению испытаний. Интересы потребителя в этом отношении оказываются чаще всего нейтральными, либо он также испытывает неудобства, связанные с принятием отрицательного решения, так как это может повлечь задержку поставки и т.п. Поэтому вместо средней продолжительности по всем (положительным и отрицательным) решениям следует

рассматривать также в качестве характеристики плана и среднюю продолжительность испытаний только по положительно принимаемым решениям (о соответствии). Такая характеристика плана в большей степени отражает реальные интересы сторон.

Применение ее вместо обычной средней продолжительности имеет еще и техническое преимущество, так как все сложности вычислительного характера при определении средней продолжительности плана связаны именно с отрицательно принимаемыми решениями. Функции распределения продолжительности испытаний до принятия отрицательного решения сложны, а приближенные формулы малоэффективны.

В случаях принятия положительного решения средняя продолжительность испытаний определяется просто

$$T_{cp} = \sum_{i=0}^{r_{np}} \frac{p_i}{\sum_{i=0}^{r_{np}} p_i} t_i,$$

где  $p_i$  – вероятность окончания испытаний с  $i$  отказами;

$t_i$  – продолжительность испытаний при  $i$  отказах;

$r_{np}$  – предельно допустимое число отказов, по достижении которого принимают решение о несоответствии.

Идея построения боковой границы плана вида III состоит в следующем. Любой произвольной ее форме (набору значений  $\{t_i\}$ ) соответствует свой набор вероятностей  $\{p_i\}$  и наоборот, совокупность численных значений вероятностей  $\{p_i\}$ , заданных при произвольном фиксированном значении наработки на отказ  $T_0$ , однозначно определяет боковую границу плана – совокупность значений  $\{t_i\}$ .

При справедливости основной гипотезы ( $T_0 = T_\alpha$ ) сумма вероятностей равна дополнению до единицы риска изготовителя:

$$\sum_{i=0}^{r_{np}-1} p_i(T_\alpha) = 1 - \alpha,$$

а при справедливости альтернативы ( $T_0 = T_\beta$ ) сумма этих вероятностей равна риску потребителя:

$$\sum_{i=0}^{r_{np}-1} p_i(T_\beta) = 1 - \beta.$$

Если положить значение наработки на отказ (средней наработки до отказа) равным браковочному уровню  $T_\beta$  и рассмотреть  $n$  наборов вероятностей  $\{p_i\}_k$ ,  $k = 1 \dots n$ , таких, что их сумма равна заданному значению риска потребителя  $\beta$ , то каждый набор определит боковую границу плана  $\{t_i\}_k$ . Все  $n$  планов с такими боковыми границами соответствия и одной и той же границей несоответствия  $r_{np}$  будут иметь один и тот же риск потребителя, но разные другие параметры: риски изготовителя, максимальные и средние продолжительности и др. Число таких планов является неограниченным и среди них находится также неограниченное число планов, имеющих одинаковые риски изготовителя, т.е. множество планов, отвечающих одному набору исходных данных  $T_\alpha/T_\beta$ ,  $\alpha$ ,  $\beta$ .

Изготовителю для выбора из этого множества конкретного плана, подходящего по совокупности качественных характеристик, необходимо располагать каким-либо способом их упорядоченного перебора. В основу перебора может быть положен некоторый принцип распределения (раздачи «квот») риска потребителя  $\beta$  по  $r_{np}$  возможным продолжительностям испытаний. Рациональный способ такого построения и алгоритм расчета планов требует отдельного самостоятельного изложения.

На рис. 2 и в таблице, с целью дальнейшего рассмотрения критериев качества планов, даны два примера планов вида III с исходными данными, соответствующими исходным данным наиболее часто применяемого стандартизованного плана вида II:  $T_a/T_b = 2$ ,  $\alpha = \beta = 0,128$  (риски плана вида II больше номинальных  $\alpha = \beta = 0,1$  вследствие усечения).

На рис. 3 приведены графики средней продолжительности испытаний до принятия положительного решения по сравниваемым планам. Из графиков видно, что в рабочем диапазоне возможных значений наработки на отказ (от браковочного  $T_b$  до приемочного  $T_a$  уровней) новые планы в среднем существенно менее продолжительны до принятия положительного решения, чем стандартизованный план – на 14-27%. В частности, вся боковая граница плана  $a$  расположена левее боковой границы стандартизованного плана.

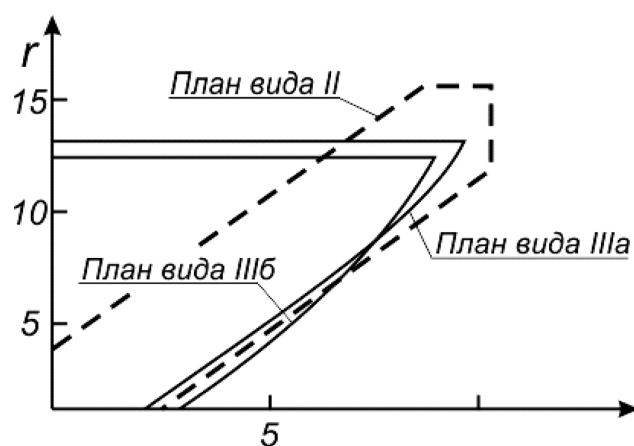


Рис. 2. Стандартный план вида II для исходных данных  $T_a/T_b=2$ ;  $\alpha = \beta = 0,128$  (штриховая линия) и два соответствующих ему плана вида IIIa и IIIб (сплошные линии)

| Число отказов | Границы планов видов II и III |                   |             |             |
|---------------|-------------------------------|-------------------|-------------|-------------|
|               | II (согласно [1])             |                   | IIIa        | IIIб        |
|               | (браковка)                    | (+, т.е. приёмка) | (+)         | (+)         |
| 0             | —                             | <b>2,20</b>       | <b>2,03</b> | <b>2,27</b> |
| 1             | —                             | <b>2,89</b>       | <b>2,78</b> | <b>3,03</b> |
| 2             | —                             | <b>3,59</b>       | <b>3,47</b> | 3,69        |
| 3             | 0,35                          | 4,25              | 4,13        | 4,31        |
| 4             | 1,04                          | 4,97              | 4,77        | 4,90        |
| 5             | 1,74                          | 5,67              | 5,40        | 5,47        |
| 6             | 2,43                          | 6,36              | 6,02        | 6,02        |
| 7             | 3,12                          | 7,05              | 6,64        | 6,56        |

| Число отказов | Границы планов видов II и III |                   |             |             |
|---------------|-------------------------------|-------------------|-------------|-------------|
|               | II (согласно [1])             |                   | IIIa        | IIIб        |
|               | (браковка)                    | (+, т.е. приёмка) | (+)         | (+)         |
| 8             | 3,82                          | 7,75              | 7,27        | 7,09        |
| 9             | 4,51                          | 8,44              | 7,89        | 7,62        |
| 10            | 5,20                          | 9,13              | 8,51        | <b>8,13</b> |
| <b>11</b>     | <b>5,90</b>                   | <b>9,83</b>       | <b>9,14</b> | <b>8,64</b> |
| <b>12</b>     | <b>6,59</b>                   | <b>10,30</b>      | <b>9,76</b> | —           |
| <b>13</b>     | <b>7,28</b>                   | <b>10,30</b>      | —           | —           |
| <b>14</b>     | <b>7,97</b>                   | <b>10,30</b>      | —           | —           |
| <b>15</b>     | <b>8,67</b>                   | <b>10,30</b>      | —           | —           |

При наличии периода приработки преимущество новых планов заключается также в том, что изменяются значения вероятностей окончания испытаний при  $i$  отказах (по сравнению со значениями вероятностей, соответствующих экспоненциальному распределению) таким образом, что возрастает доля испытаний, заканчивающихся при больших значениях отказавших изделий, когда линия реализации процесса отказов пересекает боковые границы планов в их верхней части. На рис. 2 эта область границ отмечена волнистой линией, и план, обеспечивающий более быстрое окончание испытаний именно в этой части боковой границы, может быть для изготовителя наиболее предпочтительным. На рис.2 таким планом является план б. Стандартизованный план вида II в этом отношении оказывается наихудшим – боковая граница его наиболее удалена вправо.

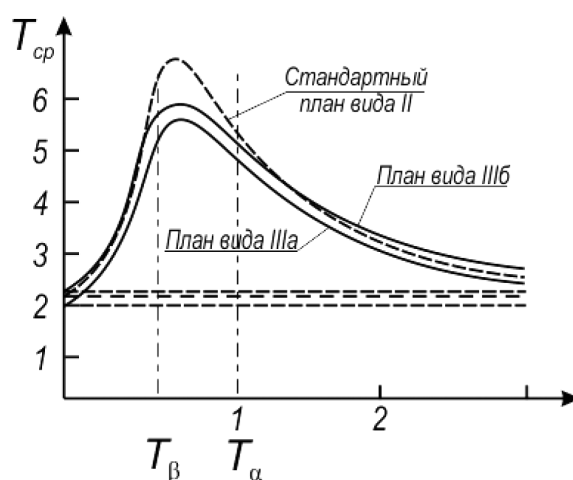


Рис. 3. Зависимость средней продолжительности испытаний до принятия положительного решения (о соответствии)  $T_{ср}$  от наработки на отказ испытуемых изделий  $T_0$  планов с исходными данными  $T_d/T_\beta = 2$ ;  $\alpha = \beta = 0,128$  в масштабе  $T_\alpha$

Аналогичные результаты получаются и при других исходных данных. Подводя итог рассмотрения критериев (характеристик) качества планов контроля показателей безотказности, необходимо сделать следующие выводы:

- изготовителя, учитывающего специфические особенности испытаний на безотказность, интересует ряд характеристик планов: максимальная продолжительность, устойчивость риска к

возможным приработкам, средняя продолжительность до принятия положительного решения, особенно в области больших значений допустимого числа отказов;

- средняя продолжительность испытаний до принятия отрицательного решения не представляет реального интереса для сторон, и как следствие, такая распространенная в теоретических исследованиях характеристика, как общая средняя продолжительность, для практики представляется наименее важной;

- задача выбора оптимального плана по совокупности указанных характеристик математически не формулируется, т.е. оптимального решения в данном случае не существует, в связи с чем эту задачу следует решать путем предоставления изготовителю возможности выбирать по своему усмотрению нужный ему план из множества планов вида III с одинаковыми исходными данными и варьируемыми, предположительно рациональными соотношениями качественных характеристик;

- планы вида III сочетают в себе преимущества стандартизованных планов видов I и II и лишены их недостатков;

- с позиций потребителя все планы вида III с одинаковыми исходными данными являются эквивалентными, обеспечивающими проверку заданных гипотез с заданными рисками сторон.

Изложенный подход с необходимыми изменениями может быть применен также и к планам без замены (восстановления) отказавших изделий или к видам распределений, отличных от экспоненциального, и (в несколько меньшей степени) к планам контроля показателей типа «вероятность».

## Литература

1. Публикация МЭК 605–7. Испытание аппаратуры на надежность. Ч.7. Планы контрольных испытаний для определения интенсивности отказов и средней наработки на отказ при допущении постоянной интенсивности отказов. – М.: Изд. ВНИИ-электронстандарт, 1980.

2. ГОСТ 27.410 – 87. Надежность в технике. Методы контроля показателей надежности и планы контрольных испытаний на надежность.

## FOREWORD BY DZIRKAL E.V.

Serial control of reliability (and other similar parameters) boils down to the comparison of some value at each moment of observation with two boundaries – acceptance and rejection. Between the boundaries there is a region of uncertainty (testing continues when in there). The classical Wald approach does not imply any restrictions for testing time. As soon as the region of the Wald uncertainty is truncated, risks for a supplier and a customer grow considerably. And it is unknown at which level this region should be truncated, with decisions made in a completely arbitrary way. For example, risks are set to 0.1, but the outcome is 0.13 (and this outcome can be evaluated by some experts, including Demidovich with his method).

Demidovich N.O. developed a method that makes it possible to set boundaries in such a way that serial control using these boundaries will provide precise values of specified risks. Boundaries as to the Demidovich method can create an uncertainty region of any form including a closed one that does not require truncation (Demidovich himself used a triangular form for development). The method was acknowledged by ISO/IEC experts, adopted in Russia as the GOST R 27.402-95 standard and became part of the second version of the IEC 61124 draft standard to be issued.

It is worth noting that plans of N.E. Yarlykov with the same advantages appeared in the USSR before Demidovich.

It is obvious that the Demidovich plans are definitely better than the “classical” Wald plans, and the latter should be replaced in all standards and textbooks. Below you can find two first papers of Demidovich N.O. published in the journal Reliability and Quality Control in 1990 and 1991.

### С. 26 ГОСТ 27.410—87

Т а б л и ц а 17

$$\alpha = \beta = 0,1; T_{\alpha}/T_{\beta} = 2; t'_{\Sigma\alpha}/T_{\alpha} = 5,91; t'_{\Sigma\beta}/T_{\alpha} = 5,00$$

| $r$ | $t_{\Sigma\alpha}/T_{\alpha}$ | $t_{\Sigma\beta}/T_{\alpha}$ | $r$ | $t_{\Sigma\alpha}/T_{\alpha}$ | $t_{\Sigma\beta}/T_{\alpha}$ | $r$ | $t_{\Sigma\alpha}/T_{\alpha}$ | $t_{\Sigma\beta}/T_{\alpha}$ |
|-----|-------------------------------|------------------------------|-----|-------------------------------|------------------------------|-----|-------------------------------|------------------------------|
| 0   | 1,907                         | —                            | 14  | 11,884                        | 7,140                        | 28  | 20,413                        | 17,766                       |
| 1   | 2,860                         | 0,015                        | 15  | 12,513                        | 7,854                        | 29  | 21,006                        | 18,563                       |
| 2   | 3,695                         | 0,183                        | 16  | 13,137                        | 8,577                        | 30  | 21,598                        | 19,363                       |
| 3   | 4,473                         | 0,507                        | 17  | 13,758                        | 9,309                        | 31  | 22,188                        | 20,166                       |
| 4   | 5,217                         | 0,929                        | 18  | 14,376                        | 10,049                       | 32  | 22,775                        | 20,973                       |
| 5   | 5,936                         | 1,417                        | 19  | 14,990                        | 10,796                       | 33  | 23,363                        | 21,781                       |
| 6   | 6,636                         | 1,953                        | 20  | 15,602                        | 11,549                       | 34  | 23,949                        | 22,594                       |
| 7   | 7,322                         | 2,525                        | 21  | 16,211                        | 12,309                       | 35  | 24,533                        | 23,408                       |
| 8   | 7,997                         | 3,128                        | 22  | 16,817                        | 13,074                       | 36  | 25,117                        | 24,227                       |
| 9   | 8,663                         | 3,755                        | 23  | 17,422                        | 13,846                       | 37  | 25,699                        | 25,045                       |
| 10  | 9,319                         | 4,401                        | 24  | 18,023                        | 14,621                       | 38  | —                             | 25,699                       |
| 11  | 9,969                         | 5,065                        | 25  | 18,624                        | 15,400                       |     |                               |                              |
| 12  | 10,612                        | 5,744                        | 26  | 19,223                        | 16,186                       |     |                               |                              |
| 13  | 11,251                        | 6,436                        | 27  | 19,818                        | 16,975                       |     |                               |                              |

1. М. Б. Фарберман, Р. Д. Берштин, С. С. Дмитриченко «Планирование объемов последовательных испытаний деталей машин на долговечность». Вестник машиностроения, № 8, 1987, С. 3—6.

2. Harter H. L., Moore A. H. An Evaluation of Exponential and Weibull Test Plans IEEE Transactions on Reliability, Vol R—25, N 2, June 1976, p. 100—104.

3. Надежность технических систем: Спр. Ю. К. Беляев, В. А. Богатырев, В. В. Болотин и др. Под ред. И. А. Ушакова. М.: Радио и связь, 1985.

Т а б л и ц а 5

**Планы контроля средних показателей надежности по последовательному  
методу для экспоненциального распределения**

| $T_a/T_\beta$           | $a$  | $r_0$ | $r_{yc}$ | $t_0/T_a$ | $t'_\Sigma/T_a$ |
|-------------------------|------|-------|----------|-----------|-----------------|
| $\alpha = \beta = 0,10$ |      |       |          |           |                 |
| 21,70                   | 6,74 | 0,713 | 1        | 0,106     | 0,099           |
| 7,30                    | 3,17 | 1,110 | 2        | 0,349     | 0,408           |
| 5,00                    | 2,49 | 1,370 | 3        | 0,549     | 0,735           |
| 4,83                    | 2,43 | 1,400 | 3        | 0,574     | 0,780           |
| 4,00                    | 2,16 | 1,590 | 4        | 0,732     | 1,090           |
| 3,83                    | 2,11 | 1,640 | 4        | 0,776     | 1,180           |
| 3,50                    | 2,00 | 1,750 | 5        | 0,879     | 1,410           |
| 3,29                    | 1,92 | 1,850 | 5        | 0,960     | 1,600           |
| 3,00                    | 1,82 | 2,000 | 6        | 1,100     | 1,960           |
| 2,94                    | 1,80 | 2,040 | 6        | 1,130     | 2,040           |
| 2,70                    | 1,71 | 2,210 | 7        | 1,290     | 2,480           |
| 2,53                    | 1,65 | 2,380 | 8        | 1,440     | 2,940           |
| 2,50                    | 1,64 | 2,400 | 9        | 1,460     | 3,010           |
| 2,39                    | 1,60 | 2,520 | 9        | 1,580     | 3,380           |

Продолжение табл. 5

| $T_a/T_\beta$ | $a$  | $r_0$ | $r_{yc}$ | $t_0/T_a$ | $t_\Sigma/T_a$ |
|---------------|------|-------|----------|-----------|----------------|
| 2,28          | 1,55 | 2,660 | 10       | 1,710     | 3,840          |
| 2,19          | 1,52 | 2,810 | 11       | 1,840     | 4,310          |
| 2,12          | 1,49 | 2,930 | 12       | 1,970     | 4,780          |
| 2,06          | 1,47 | 3,050 | 13       | 2,080     | 5,240          |
| 2,00          | 1,44 | 3,160 | 15       | 2,190     | 5,690          |
| 1,96          | 1,42 | 3,280 | 15       | 2,310     | 6,200          |
| 1,79          | 1,36 | 3,770 | 20       | 2,770     | 8,420          |
| 1,67          | 1,31 | 4,270 | 25       | 3,270     | 11,100         |
| 1,60          | 1,28 | 4,660 | 30       | 3,650     | 13,400         |
| 1,50          | 1,23 | 5,420 | 40       | 4,390     | 18,600         |

2.0,  $0.1=0.1$ , 1.44 and 3.16, acceptance is  $1.44\kappa - 3.16 = 1.44*10 - 3.16 = 11.24$ , rejection is 17.56

**Demidovich N.O.**

## **QUALITY CRITERIA FOR PLANS OF FAILURE-FREE PERFORMANCE CONTROL**

In order to control such parameters of failure-free performance as TTF of recoverable products and MTBF of non-recoverable products, the standards [1,2] specify two basic types of plans applied usually with the assumption of the exponential distribution of random values, i.e. times between failures and times to failures – plans with limited duration or with a limited number of failures (type I) and Wald's truncated serial plans (type II).

Further on we'll consider plans with replacement or recovery of failed products, although the results can refer to plans without replacement (recovery) as well.

As criteria for selecting plans, we use maximum duration of testing (for plans of type I, it is minimal) or average duration (for plans of type II, it is close to a minimal one "with precision up to truncation").

When truncating serial plans, values of parties' risks increase compared to the nominal values. This increase can be substantial (up to 30 per cent), and it should not be always neglected.

Besides the abovementioned criteria, we'll also consider other criteria of testing plans that are overlooked in theoretical researches but are still important for practice. Let us tentatively note that when comparing the boundaries of plans of types I and II (Fig. 1), we can conclude about some "empty" regions in plans of type I, which faintly influence generation of wrong decisions. Such regions (upper and lower ones) are lined in the figure. It is characteristic of them that stepwise lines of failure process realization occurred in these regions come out on the corresponding boundaries of type I plan with the probability close to unity for any of hypotheses.

The most important thing that should be taken into account while preparing plans of testing is that there is a break-in period practically for all types of products whose MTBF or TTF are approximated by an exponential distribution. The standardized plans do not take this into account. A break-in period can vary both in terms of duration and character depending on the state of technological process etc. A break-in factor results in that moments of failure occurrence are distributed not evenly as per duration of testing as it should be in case of exponential distribution but are more concentrated at the initial stage of testing. While the lines of failure process realization instead of a lineal character take on a tendency to a curve that by its convex part points to the boundary of non-conformity of type II plan, crosses it and then come beyond the boundary of conformity of plans of types I and II, as shown in Fig. 1. As a result, a manufacturer's risk increases uncontrollably when products acceptable in terms of reliability can be rejected. This circumstance prevents from wide application of type II plans in practice, in spite of their economical benefits.



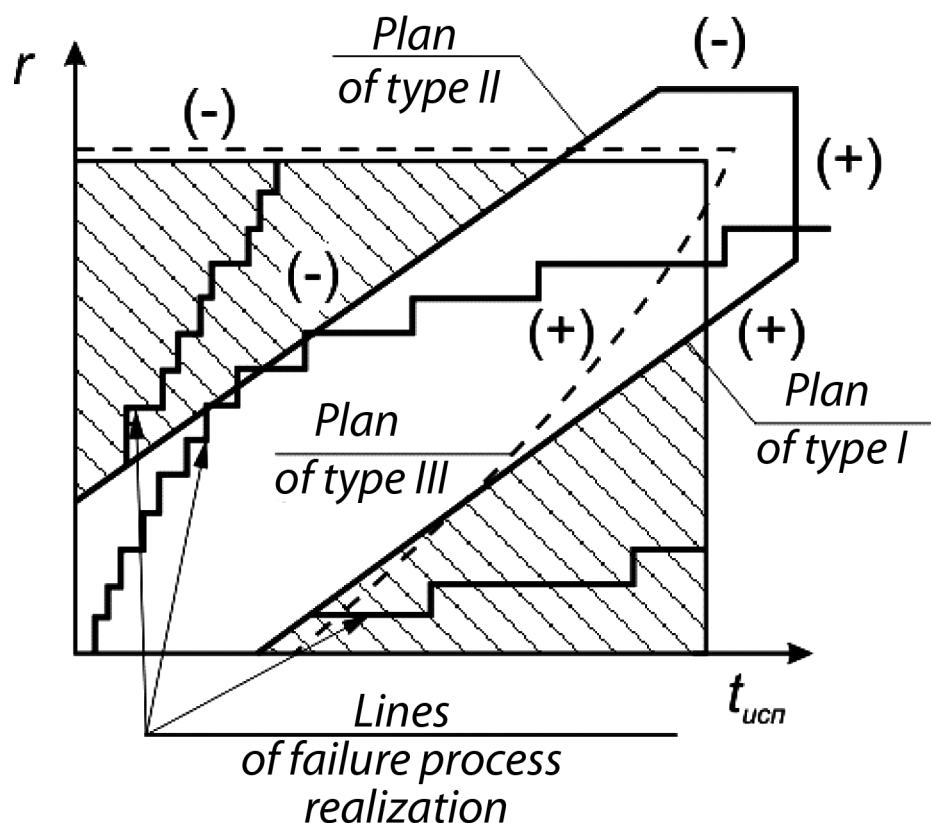


Fig. 1. Comparison of the boundaries of testing plans of various types. The regions of type I plan that feebly influence the values of risks are lined. The symbol (+) denotes the conformity boundaries, the non-conformity boundaries of plans

Type I plans are not sensitive to possible break-in factors, as the boundary of non-conformity there is a right line parallel to the X-axis. In other words, of two regions lined in Fig. 1 the lower region is always empty, and the upper one is not in case of break-in.

The above arguments justify the reasonability of considering, as an alternative to type II plans, new serial plans (of type III), which are obtained not by truncating Wald's plans but excluding a lower lined region from the respective plans of type I. The general character of the boundaries of such plans is shown in Fig. 1 as a dash line. As it will be shown further, they combine the advantages of plans of types I and II and are free from their disadvantages.

The retention of an upper region in fact means setting one of the plan boundaries (non-conformity), which leads to the necessity of more detailed consideration of such characteristics as an average duration of testing. In this respect we should present the actual attitude of the parties towards the duration of testing bearing in mind their possible completion with two contrary outcomes.

A manufacturer does not tend to quickly complete testing with a negative outcome, while there is a longer duration provided for and one can expect better results, i.e. he is not inclined to make a "pre-mature" decision about non-conformity, notwithstanding the costs that testing incurs. The interests of a consumer are more neutral in this respect, or he also suffers from some inconvenience related to making a negative decision, as it can lead to some delay of delivery etc. That's why instead of average duration as to all (positive and negative) decisions one should also consider average duration of testing only for positive decisions made (about conformity) as a plan characteristic. This parameter more reflects the real interests of the parties.

Its application instead of a traditional average duration also has some technical advantage, since all calculation difficulties in defining a plan's average duration are related to negative decisions. Functions of

distribution of testing duration till negative decision making are complicated, and approximated formula are not so efficient.

In cases when positive decisions are made, the average duration of testing is defined in a simple way

$$T_{cp} = \sum_{i=0}^{r_{np}} \frac{p_i}{\sum_{i=0}^{r_{np}} p_i} t_i,$$

where  $p_i$  is the probability of testing completion with  $i$  failures;  $t_i$  is the duration of testing with  $i$  failures;  $r_{np}$  is the ultimate acceptable number of failures when reaching this, a decision about non-conformity is made.

The idea of forming a side boundary of type III plan consists in the following. For any of its arbitrary forms (a set of values  $\{t_i\}$ ) there is its own set of probabilities  $\{p_i\}$ , and vice versa, a set of numerical values of probabilities  $\{p_i\}$  specified for an arbitrary fixed value of time to failure  $T_0$  unmistakably defines a side boundary of a plan, i.e. a set of values  $\{t_i\}$ .

If the main hypothesis ( $T_0 = T_\alpha$ ) is true, the sum of probabilities is equal to complement up to unity of a manufacturer's risk:

$$\sum_{i=0}^{r_{np}-1} p_i(T_\alpha) = 1 - \alpha,$$

and if the alternative ( $T_0 = T_\beta$ ) is true, the sum of these probabilities is equal to a consumer's risk:

$$\sum_{i=0}^{r_{np}-1} p_i(T_\beta) = 1 - \beta.$$

If we assume the value of time to failure (mean time to failure) equal to rejection level  $T_\beta$  and consider the  $n$  sets of probabilities  $\{p_i\}_k$ ,  $k = 1 \dots n$ , such that their sum is equal to the set value of a consumer's risk  $\beta$ , then each set will define a side boundary of the plan  $\{t_i\}_k$ . All  $n$  of plans with such side boundaries of conformity and one and the same boundary of non-conformity  $r_{np}$  will have the same consumer risk but different other parameters: a manufacturer's risks, maximum and average durations etc. The number of such plans is unlimited, and among them there is also an unlimited set of plans with the identical risks for a manufacturer, i.e. a set of plans corresponding to one set of initial data  $T_\alpha/T_\beta$ ,  $\alpha$ ,  $\beta$ .

To select among this set of plans a particular plan appropriate in terms of a set of quality characteristics, a manufacturer shall have some way of searching them in some order. The basis for this search can be some principle of distribution ("quota" allotment) of a consumer's risk  $\beta$  as to the  $r_{np}$  of possible testing durations. The rational way of such construction and the algorithm of calculation of plans require a separate exposition.

For further consideration of quality criteria of plans, Figure 2 and the Table provide two examples of type III plans with initial data complying with the initial data of the most widely used standardized plan of type II:  $T_\alpha/T_\beta = 2$ ,  $\alpha = \beta = 0.128$  (the risks of type II plan are higher than the nominal ones  $\alpha = \beta = 0.1$  due to truncation).

Fig. 3 shows graphs of average testing duration till making a positive decision as to the compared plans. The graphs show that within a working range of possible TTF values (from rejection level  $T_\beta$  up to acceptance level  $T_a$ ) new plans on the average are considerable less longer till making a positive decision than the standardized plan by 14-27%. In particular, the entire side boundary  $a$  is positioned to the left of the side boundary of the standardized plan.

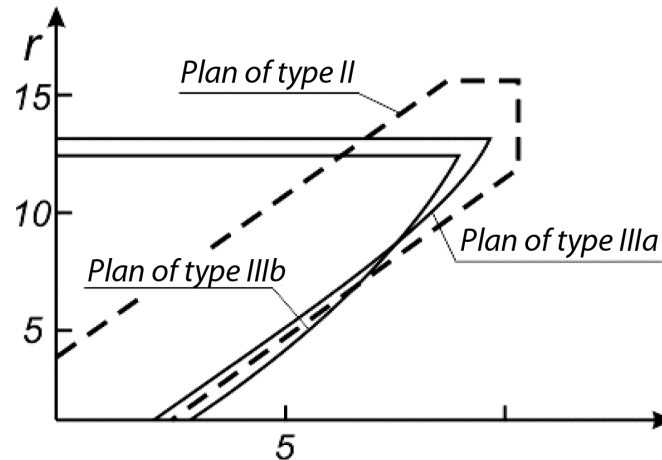


Fig. 2. The standard plan of type II for initial data  $T_a/T_\beta=2$ ;  $\alpha=\beta=0.128$  (dash line) and two corresponding plans of types IIIa and IIIb (continuous lines)

| No. of failures | Boundaries of plans of types II и III |                      |      |             |
|-----------------|---------------------------------------|----------------------|------|-------------|
|                 | II (accord. to [1])                   |                      | IIIa | IIIb        |
|                 | (rejection)                           | (+, i.e. acceptance) | (+)  | (+)         |
| <b>0</b>        | —                                     | 2,20                 | 2,03 | <b>2,27</b> |
| <b>1</b>        | —                                     | 2,89                 | 2,78 | <b>3,03</b> |
| <b>2</b>        | —                                     | 3,59                 | 3,47 | 3,69        |
| 3               | 0,35                                  | 4,25                 | 4,13 | 4,31        |
| 4               | 1,04                                  | 4,97                 | 4,77 | 4,90        |
| 5               | 1,74                                  | 5,67                 | 5,40 | 5,47        |
| 6               | 2,43                                  | 6,36                 | 6,02 | 6,02        |
| 7               | 3,12                                  | 7,05                 | 6,64 | 6,56        |
| 8               | 3,82                                  | 7,75                 | 7,27 | 7,09        |
| 9               | 4,51                                  | 8,44                 | 7,89 | 7,62        |
| 10              | 5,20                                  | 9,13                 | 8,51 | 8,13        |
| 11              | 5,90                                  | 9,83                 | 9,14 | 8,64        |
| 12              | 6,59                                  | 10,30                | 9,76 | —           |
| <b>13</b>       | <b>7,28</b>                           | 10,30                | —    | —           |
| <b>14</b>       | <b>7,97</b>                           | 10,30                | —    | —           |
| <b>15</b>       | <b>8,67</b>                           | 10,30                | —    | —           |

In case of break-in period, the advantage of new plans also consists in that the values of testing completion probabilities for  $i$  failures (compared to the values of probabilities corresponding to an exponential distribution) are changed such that there is an increase of a testing share coming to completion with high values of failed products when lines of failure process realization cross side boundaries of plans in their upper region. In Fig. 2 this region is marked by a wavy line, and the plan ensuring a quicker completion of testing in this particular part of the side boundary can be mostly preferred by a manufacturer. In Fig.2

such plan is plan *b*. The standardized plan of type II in this respect seems the worst one, since its side boundary is away to the right to the maximum.

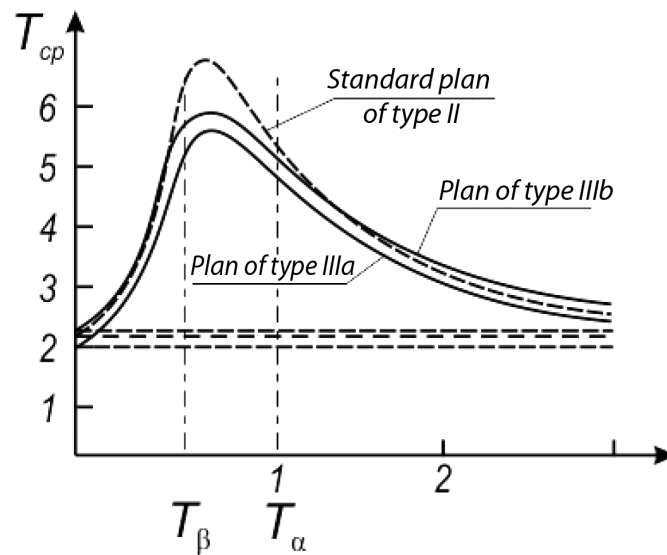


Fig. 3. Dependency of the average duration of testing till making a positive decision (about conformity)  $T_{cp}$  on time to failure of tested products  $T_0$  of plans with initial data  $T_a/T_\beta = 2$ ;  $\alpha = \beta = 0.128$  in scale  $T_\alpha$

Analogous results are also obtained for other initial data. Summing up the consideration of quality criteria (characteristics) of safety performance control plans, it is necessary to make the following conclusions:

A manufacturer who takes into account the specifics of failure-free performance testing is interested by a number of characteristics of plans: maximum duration, risk immunity to possible breaks-in, average duration till making a positive decision, in particular in the field of high values of acceptable failure rates;

The average duration till making a negative decision is not of interest for the parties, and therefore, such characteristic wide spread in theoretical researches as total average duration is the less important one for practice;

The task of selecting an optimal plan as to a set of specified characteristics is not stated mathematically, i.e. there is no optimal solution in this case, so the task should be solved by providing a manufacturer an opportunity of selecting at his discretion a required plan among a set of plans of type III with identical initial data and varying, presumably rational correlations of quality characteristics;

Type III plans combine benefits of standardized plans of types I and II and are free from their drawbacks;

In terms of a consumer, all plans of type III with identical initial data are equivalent and ensure checking the set hypotheses with specified risks of the parties.

The presented approach with necessary changes can be also applied for plans without replacement (recovery) of failed products or for types of distribution different from an exponential distribution and (in a slightly lesser degree) for plans of controlling parameters like "probability".

## References

1. IEC 605-7. Reliability testing of equipment. P.7. Plans of control testing for defining failure rates and mean time between failures with the assumption of constant failure rates. — M.: Publishing house VNII-electrostandard, 1980.
2. GOST 27.410-87. Reliability in equipment. Methods for controlling reliability parameters and plans of reliability control testing.

## **Рецензия Чепурко В.А. на учебное пособие Антонова В.А., Никулина М.С. «Статистические модели в теории надежности»**

Вниманию читателя предлагается книга авторов Антонова А.В. и Никулина М.С. «Статистические модели в теории надежности». Учебное пособие, предназначенное студентам, обучающимся по направлению «Информатика и вычислительная техника», будет также весьма полезно аспирантам и инженерам, чья научная работа тесно связана с математической теорией надежности и применением статистических методов.

Никулин М.С. знаком российскому читателю по книге Воинов В.Г., Никулин М.С. «Несмещенные оценки и их применения». Множество работ автора связано с построением и развитием критерия типа  $\chi^2$  в случае проверки сложных статистических гипотез, когда параметры распределения оцениваются по выборке (критерий Никулина). По критерию  $\chi^2$  в США издана замечательная книга авторов P.E. Greenwood, M.S. Nikulin «A Guide to Chi-Squared Testing» [6], являющаяся, по сути, наиболее полным исследованием критериев типа  $\chi^2$ . Жаль, что эта книга пока еще не переведена на русский язык. Современные научные работы автора связаны со статистическими моделями, применяемыми при планировании и организации ускоренных испытаний, а также методами анализа информации по исследованию деградационных процессов. Учебное пособие Антонова А.В. «Системный анализ» пережило уже несколько переизданий и по-прежнему пользуется большой популярностью. Научные интересы Антонова А.В. отражены во множестве публикаций. Здесь присутствуют параметрические и непараметрические методы обработки экспериментальной информации, бутстреп-метод, а также математические модели учета старения.

К несомненным преимуществам «Статистических моделей в теории надежности» необходимо отнести как доступность, так и математическую строгость изложения материала. В большинстве случаев для понимания необходимы лишь основные сведения из теории вероятностей и математической теории надежности. Этот факт является существенным, поскольку в настоящее время крайне мало добротных учебников по теории надежности. Имеющиеся учебные пособия по предмету в некоторых разделах зачастую просто устарели. В первую очередь это относится к применению различных статистических моделей и методов при проведении вероятностного анализа надежности и безопасности сложных технических систем.

### **Разберем затронутые основные научные вопросы учебного пособия по главам.**

В первой главе даются основные понятия теории надежности, определяются показатели восстанавливаемых и невосстанавливаемых систем и приводятся классические способы их оценивания. Рассматриваются различные виды исходных статистических данных, в частности приводится классификация способов цензурирования.

Вторая глава посвящена основным математическим свойствам показателей надежности невосстанавливаемых и восстанавливаемых систем. Причем необходимо отметить, что во втором случае приведенный материал достаточно подробен, содержит сведения о прямом и обратном остаточных временах, известные оценки для функции восстановления и важные предельные теоремы. При этом формулируемые теоремы, в основном, приведены без доказательств, что существенно облегчает чтение материала.

В следующем разделе авторы пособия приводят методы структурного анализа надежности систем. К ним отнесены логико-вероятностный метод анализа надежности, методы построения структурных функций, путей и сечений и метод деревьев отказов. В главе рассмотрены вопросы зна-

чимости элементов, определяется значимость по Барлоу-Прошану и Веселы-Фасселу. Для различных стратегий обслуживания восстанавливаемых систем приведены подробные аналитические расчеты нестационарного и стационарного коэффициента готовности. Для каждой стратегии приведены подробные рисунки, что естественно улучшает качественное восприятие полученного результата.

Четвертая и пятая главы пособия посвящены обзору применяемых в теории надежности статистических методов оценивания и проверки гипотез. Вначале авторами обсуждается понятие вероятности как фундаментального, поскольку наиболее значимые результаты математической теории надежности связаны в первую очередь с вероятностным подходом. Определяются основные вероятностные распределения, первичные статистические характеристики выборки. Далее приводятся основные свойства и методы получения точечных оценок. К неоспоримым преимуществам учебного пособия в этой части необходимо отнести развитие метода максимального правдоподобия для различных моделей цензурирования. Собранный материал обладает очевидной научной новизной и публиковался в основном в статьях или зарубежной научной книге. К редко публикуемой можно отнести непараметрическую оценку функции надежности Каплана-Мейера. Пятую главу можно отнести к наиболее сложным в математическом смысле. И это вызвано, в первую очередь, необходимостью осветить все нюансы применения критерия Пирсона  $\chi^2$ . Хотелось бы отметить, что и здесь объем представленного материала полностью оправдан и не загроможден излишними для инженера доказательствами теорем. Замечательно, что здесь же приведен ряд редко публикуемых критериев проверки нормальности, экспоненциальности наработки; принадлежности ее распределению Вейбулла. Как некоторое замечание по содержанию хочу отметить, что непараметрическую оценку Каплана-Мейера следовало бы, на мой взгляд, поместить в шестую главу.

В следующей (шестой) главе уделяется внимание основным непараметрическим методам анализа статистической информации. Приводятся свойства эмпирической функции распределения, гистограммы, ядерной и проекционной оценки плотности распределения. Ядерная оценка выводится для различного вида цензурированных данных, а также для параметра потока отказов. Рассмотрены различные непараметрические тесты проверки гипотез: Колмогорова, Смирнова, Мизеса, критерий знаков.

Седьмой раздел является введением в теорию ускоренных испытаний. Необходимо отметить, что в русскоязычной литературе пособий по этой достаточно новой тематике практически не существует. Как известно, модель ускоренных испытаний применяется в тех случаях, когда необходимо оценить надежность системы, отказы которой за наблюдаемое время чрезвычайно редки (высоконадежная система). В этом случае проводят (ускоренные) испытания при нагрузках, превышающих обычные эксплуатационные. Чтобы уметь обрабатывать такую информацию, надо иметь соответствующие модели долговечности. В связи с этим излагаются две модели Лемана проведения ускоренных испытаний (в частности модель AFT), модель Седакина и ряд других. Вначале определяются несколько важных понятий модели ускоренных испытаний такие, как вектор ковариант, стресс, функция связи, базовая функция надежности (интенсивности) и т.п. В рамках предложенных моделей строятся параметрические оценки максимального правдоподобия показателей надежности (в частности ВБР) при произвольной нагрузке для различных законов распределения.

Восьмая глава посвящена моделям учета старения в работе оборудования. В отличие от модели ускоренных испытаний, где показатели надежности объектов на этапе ускоренных испытаний меняются скачкообразно, в моделях учета старения изменение этих показателей происходит непрерывно во времени. В главе рассматриваются две основные модели неоднородных потоков отказов – модель с коэффициентом износа (геометрический поток отказов) и модель нормализующей функции потока. В рамках последней модели предложен способ расчета коэффициента готовности для альтернирующих неоднородных потоков отказ – восстановление. На мой взгляд, данный раздел следовало бы

расширить другими интересными моделями неоднородных процессов. К примеру неоднородный пуассоновский процесс (NHPP) [1], гамма-процесс [2], обобщенные модели с коэффициентом износа [3-4] и процесс восстановления с трендом (TRP) [5]. Вполне возможно, авторы были ограничены временем и объемом материала, что не позволило им рассказать об этих моделях.

Последняя глава пособия содержит обзор свойств различных моделей долговечности в частности модели Гумбеля и Моргенштерна. Интересен параграф, посвященный двумерной копуле, необычна, на первый взгляд, приведенная простая связь параметра ассоциативности с коэффициентом ранговой корреляции Кендалла. Для двумерных моделей долговечности решается вопрос оценивания функции надежности.

Необходимо отметить большой объем переработанного литературного материала. В конце пособия приведен обширный библиографический список, включающий в себя 155 источников, среди которых классические, и, что примечательно, в основном современные публикации в зарубежных изданиях. К сожалению, стоит признать, что современное состояние теории надежности и математической статистики слабо отражено в российских изданиях. Тем не менее, за пределами России статистические модели и методы развиваются достаточно интенсивно. Для желающих продолжить знакомство с работами авторов в библиографии приведен список статей и книг [7-26], выпущенных уже после выхода книги.

Хочется надеяться, что книга авторов Антонова А.В. и Никулина М.С. «Статистические модели в теории надежности» будет не только замечательным учебным пособием для будущих специалистов по автоматизированным системам обработки информации и управления (АСОИУ), но окажется полезным подспорьем для аспирантов и инженеров, чьи научные интересы связаны с математической теорией надежности.

## Литература

1. **Daley D.J. and Vere-Jones D.** An introduction to the theory of point processes: Volume 1: Elementary theory and methods. – Verlag New York Berlin Heidelberg: Springer, 2003. – 469 pp.
2. Berman Inhomogeneous and modulated gamma processes// *Biometrika*, –1981, vol 68(1), p 143–152.
3. **Finkelstein M.** Failure rate modelling for reliability and risk//Springer, 2008. p.290.
4. **Braun W.J. and Li, W. and Zhao Y.Q.** Properties of the geometric and related processes. *Naval research logistics*, 2005, v. 52, p.607–616.
5. **Lindqvist B.H. and Elvebakk G. and Heggland K.** The trend-renewal process for statistical analysis of repairable systems//*Technometrics*, 2003, v.45, p.31–44.
6. **P.E.Greenwood, M. Nikulin** A Guide to Chi-Squared Testing , 1996, New York : John Wiley & Sons, 280 p.
7. **V.Voinov, M.Nikulin, N.Balakrishna** Chi-squared Goodness-of-fit tests with Applications// Academic press, (December 2012).
8. **V.Bagdonavicius, J.Kruopis, M.Nikulin** Nonparametric Tests for Complete Data, WILEY-ISTE, 2011– 233 pp.
9. **V.Bagdonavicius, J.Kruopis, M.Nikulin** Nonparametric Tests for Censored Data, WILEY-ISTE, 2011– 308 pp.
10. **M.Nikulin, N.Limnios, N.Balakrishnan, C.Huber, W. Kahle (Eds.)** Advances in Degradation Modeling: Applications to Reliability, Survival Analysis and Finance. Birkhauser: Boston, 2009.
11. **V. Rykov, N.Balakrishnan, M.Nikulin (Eds.)** Mathematical and Statistical Models and Methods in Reliability. Birkhauser: Boston, 2010.
12. **B.Lemeshko, M.Nikulin, N.Balakrishnan (Eds.)**. Applied Methods of Statistical Analysis. Simulations and Statistical Inference. Proceedings AMSA'11, 20-22 September 2011, Publishing House of NSTU, Novosibirsk, Russia, 431p. (ISBN 978-5-7782-1731-7).

13. **Elsayed A.Elsayed, Fabrice Guérin, Mikhail Nikulin**, guest editors of the Special issue on Accelerated Life Testing of the Journal Quality Technology and Quantitative Management, v.8, #4, 359-493, December 2011.

14. **Antonov A.V., Chepurko V.A.** The account of ageing effect in operation of the equipment at the stage of nuclear power plant reliability and safety analysis. / Second International Conference on Accelerated life testing in reliability and Quality control «ALT 2008» (University V. Segalen. Bordeaux 2, France). p. 35-39.

15. Application of generalised linear model for time-dependent trend assessment – a case study for the ageing psa network / A. Antonov, A. Polyakov, A. Rodionov, V. Chepurko // Reliability Engineering and System Safety. – 2009. – June. – Vol. 94, no. 6. – Pp. 1021-1029.

16. The statistical analysis of operating reliability of electropump units cn 60-180 for reactors VVER-1000 by root estimation methods / A. Antonov, N. Zulyaeva, A. Belousov et al. // VI International Conference MMR 2009 – Mathematical methods in reliability. Theory. Methods. Applications.: extended abstracts. – Moscow: 2009. – 22-29 June. -Pp. 521-525.

17. **Antonov A., Belova K., Chepurko V.** On one method of reliability coefficients calculation for objects in non-homogeneous event flows // Mathematical and Statistical Models and Methods in Reliability. Applications to Medicine, Finance, and Quality Control / Ed. by V.V. Rykov, N. Balakrishnan, M.S. Nikulin. -Statistics for Industry and Technology. Springer, 2010. – Pp. 51-67.

18. Statistical analysis of operational reliability for electric pump units cn 60-180 of VVER-1000 reactors with root estimation methods / A. Antonov, N. Zulyaeva, A. Belousov et al. // Automation and Remote Control. -2010. -Vol. 71, no. 7.-Pp. 1425-1435.

19. Статистический анализ эксплуатационной надежности электронасосных агрегатов ЦН 60-180 реакторов ВВЭР-1000 методами корневого оценивания / А.В. Антонов, Н.Г. Зюляева, А.Я. Белоусов и др. // Автоматика и телемеханика. -2010. -Т. 71, №7. -С. 160-172.

20. **Antonov A.V., Sokolov S.V., Chepurko V.A.** Mathematical model of the residual lifetime of NPP equipment calculation based on operational information specific type// Applied methods of statistical analysis. Simulations and Statistical Inference – AMSA2011. Proceedings of the international workshop / Ed. by B. Lemeshko, M. Nikulin, N. Balakrishnan; Novosibirsk State Technical University. -Novosibirsk, Russia: Publishing house of NSTU, 2011.-20-22 September. Pp. 54-63.

21. **Antonov A.V., Chepurko V.A.** Researching some characteristics of geometric processes // Proceedings of the 4th International Conference on Risk Analysis- ICRA4 / Ed. by Alex Karagrigoriou; University of Cyprus, National Technical University of Athens, School of Applied Mathematical and Physical Sciences, Committee on Risk Analysis, Cyprus Tourism Organization. -Limassol, Cyprus: University of Cyprus, 2011. -May. – Pp. 9-17.

22. **Антонов А.В., Поляков А.А., Чепурко В.А.** Модель анализа надежности объектов с неполным восстановлением //Надежность. -2011. -№ 3(38). -С. 33-41.

23. **Антонов А.В., Соколов С.В., Чепурко В.А.** К вопросу оценки остаточной наработки восстанавливаемого оборудования ядерных энергетических установок // Надежность. – 2011. – №4(39). – С. 1.

24. **Антонов А.В., Соколов С.В., Чепурко В.А.** Вероятностные методы оценки остаточной наработки восстанавливаемых элементов ЯЭУ в условиях ограниченности исходных данных/ Ядерная физика и инжиниринг. 2011. Т. 2. № 5. С. 421-424.

25. **Антонов А.В., Соколов С.В., Чепурко В.А.** Бутстреп-метод оценки характеристик надежности восстанавливаемых объектов по специфическим данным об отказах // Информационные технологии. 2012 №4, с.51-54.

26. **Antonov A.V., Chepurko V.A.** On some characteristics of geometric processes // Journal of Reliability and Statistical Studies, April 2012, Vol. 5 (S), P.1-14.



**Chepurko V.A.**

## **Review of the textbook by Antonov A.V., Nikulin M.S. STATISTICAL MODELS IN THE RELIABILITY THEORY**

### *About the author*

*Valery A. Chepurko, PhD, associate professor of chair of automated control systems, Obninsk Institute of Atomic Energy (IATE)*

*Tel. (48439)78465(office), (48439)48066(home)*

*Email: chepurko@iate.obninsk.ru*

The reader is presented with the book written by Antonov A.V. and Nikulin M.S and called Statistical Models in the Reliability Theory. This textbook written for students specialized in Computer and information Sciences will be also helpful for postgraduate students and engineers whose research is closely linked with the mathematical theory of reliability and application of statistical methods.

The Russian reader knows Nikulin M.S. due to the book Unbiased Estimations and their Application by Voinov V.G., Nikulin M.S. A lot of works of this author is related to construction and development of  $\chi^2$  criterion in case of checking complicated statistical hypotheses when distribution parameters are estimated by sampling (Nikulin criterion). In USA the authors Greenwood P.E., Nikulin M.S. published a wonderful book on  $\chi^2$  criterion A Guide to Chi-Squared Testing [6] which in fact is a complete research of  $\chi^2$  type criteria. It is a pity that this book has not been translated into Russian yet. Current research works of the author are related to statistical models applied for planning and making accelerated tests, as well as methods for information analysis in researching degradation processes. The textbook System Analysis by Antonov A.V. has survived several issues and is still very popular. The scientific interests of Antonov A.V. have been reflected in a lot of publications. Here we can see parametric and non-parametric methods of experimental information processing, bootstrapping, as well as mathematical models of ageing calculations.

The unquestionable benefits of Statistical Models in the Reliability Theory are the comprehensibility as well as the mathematical precision of material treatment. In most cases the reader should have only basic information about the theory of probabilities and the mathematical theory of reliability to comprehend the exposition. This is very important since nowadays there are just few good textbooks on the reliability theory. The existing textbooks in this field are often out of date in many sections. In the first place, it refers to application of various statistical models and methods for probabilistic analysis of reliability and safety of complex technical systems.

Let us consider the main scientific issues dwelt upon in the textbook as per chapters.

The first chapter provides the basic concepts of the reliability theory, defines parameters of recoverable and non-recoverable systems and presents classical methods of their estimation. The chapter studies various types of initial statistical data, in particular providing the classification of censoring methods.

The second chapter is about the major mathematical properties of reliability parameters of non-recoverable and recoverable systems. It is worth to note that in the latter case the presented material is very detailed and contains information about direct and reverse residual times, known estimators for recovery function and important limit theorems. The stated theorems are generally presented without proving, this making it easier to read the material.

In the next section the authors present methods of structural analysis of systems reliability. They include logical and probabilistic methods of reliability analysis, methods of construction of structural functions, paths and sections and failure tree method. The chapter considers the issues related to the importance of elements and defines the importance according to Barlow-Proshan and Vesely-Fassel. For different strategies of maintaining recoverable systems, the authors provide detailed analytical calculations of non-stationary and stationary availability factors. Detailed figures are provided for each strategy, which of course improves the quality of perception of obtained results.

The fourth and fifth chapters of the textbook provide an overview of statistical methods of hypothesis evaluation and check used in the reliability theory. First the authors discuss the concept of probability as a fundamental concept, as the most important results of the mathematical theory of reliability are in the first place related to a probabilistic approach. The authors define major probabilistic distributions, primary statistical characteristics of sampling. Later the basic properties and methods of obtaining point estimations are provided. One of the unquestionable advantages of the textbook is the development of maximum likelihood estimation for various censoring models. The collected material has an obvious scientific novelty and has been generally published in papers and in foreign scientific editions. The Kaplan-Meier nonparametric estimation of reliability functions is among those that are seldom published. The fifth chapter can be considered as one of the most complicated chapters in mathematical terms. And this is mainly caused by the necessity to cover all the nuances of application of the Pearson criterion  $\chi^2$ . It should be mentioned that the volume of the presented material is again justified and not overloaded with proofs of theorems unnecessary for engineers. It is remarkable that here we can find a number of seldom published check criteria for normality, exponentiality of time to failure, its belonging to the Weibull distribution. As a kind of comment on the contents, I would like to note that the Kaplan-Meier nonparametric estimation should have been inserted, in my opinion, into the sixth chapter.

The next (sixth) chapter is focused on the major nonparametric methods of statistical data analysis. Here you can find the properties of an empirical distribution function, histogram, nuclear and projective estimation of distribution density. The nuclear estimation is derived for various types of censored data, as well as for the parameter of failure flow. The chapter considers different nonparametric test for checking hypotheses – Kolmogorov, Smirnov, Mises tests, and sign criterion.

The seventh chapter is an introduction to the theory of accelerated testing. It should be noted that there is practically no textbooks in such new enough are in the Russian literature. As we know, a model of accelerated testing is used in case when we have to evaluate the reliability of a system whose failures occur very seldom at the observation time (highly reliable system). In this case (accelerated) testing is made with loads exceeding the standard operational loads. To process such information, we should have corresponding models of durability. That's why the authors propose two Lemman models for making accelerated testing (in particular AFT model), Sedyakin model and others. First one should define several important concepts of accelerated testing model such as covariance vector, stress, correlation function, basic function of reliability (intensity) etc. Within the framework of the offered models, we construct parametric estimations of maximum likelihood of reliability parameters (in particular, failure-free performance probability) in case of arbitrary loads for various laws of distribution.

The eighth chapter is devoted to models of considering ageing in performance of equipment. Compared with the model of accelerated testing where parameters of equipment reliability at the stage of accelerated testing change spasmodically, in the models of ageing calculation these parameters change continuously during the time. The chapter studies two main models of non-homogeneous failure flows – model with a wear coefficient (geometric glow of failures) and model of normalizing flow function. As part of the latter model, the authors offer a way of calculating an availability factor for alternating non-homogeneous failure-recovery flows. To my mind, this section should have been extended by other interesting models of non-homogeneous processes.

For instance: the non-homogeneous Poisson process (NHPP) [1], gamma process [2], generalized models with a wear coefficient [3-4] and trend recovery process (TRP) [5]. It is very likely that the authors were restricted by the time and the volume of material preventing them from telling about these models.

The last chapter gives an overview of the properties of various models of durability, in particular the Gumbel-Morgenstern model. Of interest is a paragraph about the bivariate copula, and the presented simple relation of the associativity parameter with the Kendall rank correlation coefficient seems strange at first glance. For bivariate models of durability, the authors solve the problem of estimating a function of reliability.

It is worth to note a big amount of processed literature materials. At the end of the textbook there is a long list of references comprising 155 sources, among them classical ones and, remarkably, generally recent foreign publications. Unfortunately, it should be admitted that the current state of the reliability theory and the mathematical statistics are faintly reflected in Russian editions. However, beyond Russia statistical models and methods are developing intensely enough. For those who want to know more about the works of the authors, there are references to papers and books [7-26] published after the issue of the textbook.

I hope that Statistical Models in the Reliability Theory by Antonov A.V. and Nikulin M.S. will be a wonderful textbook for future specialists in automated systems of information processing and management as well as a helpful support for postgraduate students and engineers whose scientific interests are related to the mathematical theory of reliability.

## References

1. **Daley D.J. and Vere-Jones D.** An introduction to the theory of point processes: Volume 1: Elementary theory and methods. – Verlag New York Berlin Heidelberg: Springer, 2003. – 469 pp.
2. Berman Inhomogeneous and modulated gamma processes// *Biometrika*, –1981, vol 68(1), p 143–152.
3. Finkelstein M. Failure rate modelling for reliability and risk//Springer, 2008. p.290.
4. **Braun W.J. and Li W. and Zhao Y.Q.** Properties of the geometric and related processes. Naval research logistics, 2005, v. 52, p.607–616.
5. **Lindqvist B.H. and Elvebakk G. and Heggland K.** The trend-renewal process for statistical analysis of repairable systems//*Technometrics*, 2003, v.45, p.31–44.
6. **Greenwood P.E., Nikulin M.A.** Guide to Chi-Squared Testing , 1996, New York : John Wiley & Sons, 280 p.
7. **Voinov V., Nikulin M., Balakrishna N.** Chi-squared Goodness-of-fit tests with Applications// Academic press, (December 2012).
8. **Bagdonavicius V., Kruopis J., Nikulin M.** Nonparametric Tests for Complete Data, WILEY-ISTE, 2011– 233 pp.
9. **Bagdonavicius V., Kruopis J., Nikulin M.** Nonparametric Tests for Censored Data, WILEY-ISTE, 2011– 308 pp.
10. **Nikulin M., Limnios N., Balakrishnan N., Huber C., Kahle W. (Eds.)** Advances in Degradation Modeling: Applications to Reliability, Survival Analysis and Finance. Birkhauser: Boston, 2009.
11. **Rykov V., Balakrishnan N., Nikulin M. (Eds.)** Mathematical and Statistical Models and Methods in Reliability. Birkhauser: Boston, 2010.
12. **Lemeshko B., Nikulin M., Balakrishnan N. (Eds.)**. Applied Methods of Statistical Analysis. Simulations and Statistical Inference. Proceedings AMSA'11, 20-22 September 2011. Publishing House of NSTU, Novosibirsk, Russia, 431p. (ISBN 978-5-7782-1731-7).
13. **Elsayed A.Elsayed, Fabrice Guérin, Mikhail Nikulin**, guest editors of the Special issue on Accelerated Life Testing of the Journal Quality Technology and Quantitative Management, v.8, #4, 359-493, December 2011.

14. **Antonov A.V., Chepurko V.A.** The account of ageing effect in operation of the equipment at the stage of nuclear power plant reliability and safety analysis. / Second International Conference on Accelerated life testing in reliability and Quality control «ALT 2008» (University V. Segalen. Bordeaux 2, France). p. 35-39.
15. Application of generalised linear model for time-dependent trend assessment – a case study for the ageing psa network / A. Antonov, A. Polyakov, A. Rodionov, V. Chepurko // Reliability Engineering and System Safety. – 2009. – June. – Vol. 94, no. 6. – Pp. 1021-1029.
16. The statistical analysis of operating reliability of electropump units cn 60-180 for reactors VVER-1000 by root estimation methods / A. Antonov, N. Zulyaeva, A. Belousov et al. // VI International Conference MMR 2009 – Mathematical methods in reliability. Theory. Methods. Applications.: extended abstracts. – Moscow: 2009. – 22-29 June. -Pp. 521-525.
17. **Antonov A., Belova K., Chepurko V.** On one method of reliability coefficients calculation for objects in non-homogeneous event flows // Mathematical and Statistical Models and Methods in Reliability. Applications to Medicine, Finance, and Quality Control / Ed. by V.V. Rykov, N. Balakrishnan, M.S. Nikulin. -Statistics for Industry and Technology. Springer, 2010. – Pp. 51-67.
18. Statistical analysis of operational reliability for electric pump units cn 60-180 of VVER-1000 reactors with root estimation methods / A. Antonov, N. Zulyaeva, A. Belousov et al. // Automation and Remote Control. -2010. -Vol. 71, no. 7.-Pp. 1425-1435.
19. Statistical analysis of operational reliability for electric pump units cn 60-180 of VVER-1000 reactors with root estimation methods / A. Antonov, N. Zulyaeva, A. Belousov et al. // Automation and Remote Control. -2010. -Vol. 71, no. 7.-Pp. 160-172.
20. **Antonov A.V., Sokolov S.V., Chepurko V.A.** Mathematical model of the residual lifetime of NPP equipment calculation based on operational information specific type// Applied methods of statistical analysis. Simulations and Statistical Inference – AMSA2011. Proceedings of the international workshop / Ed. by B. Lemeshko, M. Nikulin, N. Balakrishnan; Novosibirsk State Technical University. -Novosibirsk, Russia: Publishing house of NSTU, 2011.-20-22 September. Pp. 54-63.
21. **Antonov A.V., Chepurko V.A.** Researching some characteristics of geometric processes // Proceedings of the 4th International Conference on Risk Analysis- ICRA4 / Ed. by Alex Karagrignoriou; University of Cyprus, National Technical University of Athens, School of Applied Mathematical and Physical Sciences, Committee on Risk Analysis, Cyprus Tourism Organization. -Limassol, Ciprus: University of Cyprus, 2011. -May. – Pp. 9-17.
22. **Antonov A.V., Sokolov S.V., Chepurko V.A.** Model of reliability analysis of objects with incomplete recovery //Dependability. -2011. -№ 3(38). -Pp. 33-41.
23. **Antonov A.V., Sokolov S.V., Chepurko V.A.** On the issue of evaluation of residual time to failure of recoverable equipment of nuclear energy facilities // Dependability. -2011. -№4(39). – P. 1.
24. **Antonov A.V., Sokolov S.V., Chepurko V.A.** Probabilistic methods of estimating residual time to failure of recoverable equipment of nuclear energy facilities under conditions of incomplete initial data // Nuclear physics and engineering. 2011. T. 2. № 5. P. 421-424.
25. **Antonov A.V., Sokolov S.V., Chepurko V.A.** Bootstrapping estimation of reliability characteristics of recoverable objects using specific data on failures // Information technologies. 2012 №4, P.51-54.
26. **Antonov A.V., Chepurko V.A.** On some characteristics of geometric processes // Journal of Reliability and Statistical Studies, April 2012, Vol. 5 (S), P.1-14.

# НАДЁЖНОСТЬ

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

ПРЕДСТАВЛЯЕТ

И. Б. ШУБИНСКИЙ

## Структурная надежность информационных систем

Методы анализа



Приобрести издание  
можно через редакцию  
ООО «Журнал «Надежность»

8 (495) 967-77-05, доб.186  
8-916-105-81-31  
(Патрикеева Евгения)

E.Patrikeeva@gismps.ru,  
www.dependability.pro

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 «Надежность»,  
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 «Надежность»  
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

Igor B. Shubinsky

## Structural Dependability of Information Systems

Methods of analysis



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.

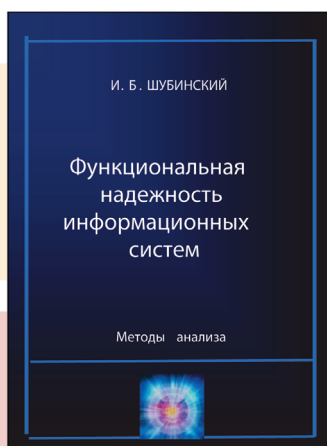
Copy deadline 12.07.2012. Format of the edition 70х100/16.  
Offset printing. Offset paper. Conv. Sheet L 24,05.  
Circulation of 700 copies. Order number 1452.

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 НАДЁЖНОСТЬ 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.

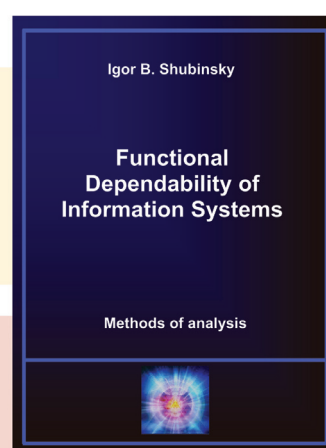
The book is primarily intended for experts who are engaged in practical development, manufacture, operation and updating of information technologies and information systems. It is intended for researchers in the field of software-hardware of information systems, academic staff, post-graduate students 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 1. 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



## 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 пристатейным 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.

Текст необходимо набирать в редакторе Word 97-2003 шрифтом № 12; текст не форматируется. Абзацы организуются путем нажатия клавиши Enter. Текст статьи набирается через два интервала на странице формата А4; слева должно быть поле 4 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,  $\beta$ ,  $\odot$  — 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.

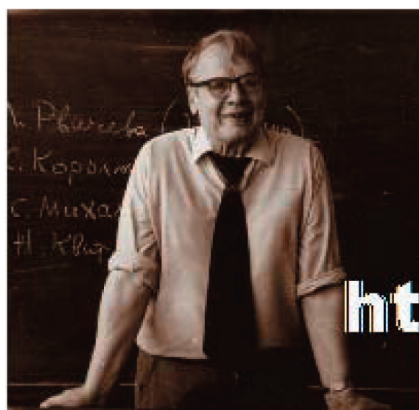
Представленная информация о каждом авторе помимо журнала будет размещаться на сайте techizdat.ru в разделе «Авторы» на отдельной интернет-странице.

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 на 2014 год можно:

- Через агентство «Роспечать» – индекс 81733;
- По каталогу «Пресса России» агентства «Книга-Сервис» – индекс 11804
- Через редакцию на любой срок  
тел.: 8-916-105-8131  
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:

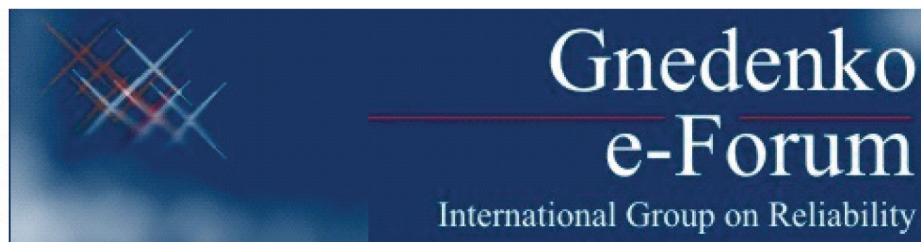
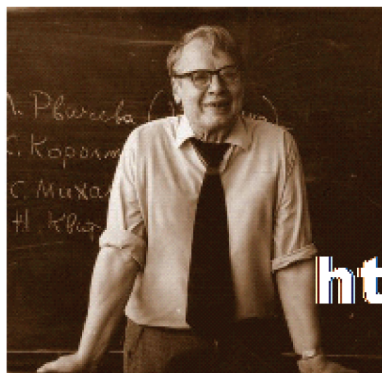
**Проф. Игорь Ушаков,**  
[igusha22@gmail.com](mailto:igusha22@gmail.com)

или

**к.т.н. Александр Бочков,**  
[a.bochkov@gmail.com](mailto: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](mailto:igusha22@gmail.com)

*or*

***Alexander Bochkov, PhD***  
[a.bochkov@gmail.com](mailto:a.bochkov@gmail.com)

**Membership is free.**

## 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@gismips.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 4 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,  $\beta$ ,  $\odot$  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 2014:

- 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.: 8-916-105-8131; e-mail: E.Patrikeeva@gismips.ru

## АВТОРЫ НОМЕРА / AUTHORS OF THIS ISSUE

### **Анцупов Александр Викторович**

кандидат технических наук, доцент; доцент кафедры «Технология машиностроения» ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И.Носова» (МГТУ)  
тел. (3519) 04-24-21  
e-mail: ants@mgn.ru

### **Анцупов Алексей Викторович**

кандидат технических наук; и.о. доцента кафедры «Механическое оборудование металлургических заводов» ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И.Носова» (МГТУ)  
e-mail: ants@mgn.ru

### **Анцупов Виктор Петрович**

доктор технических наук, профессор; профессор кафедры «Механическое оборудование металлургических заводов» ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И.Носова» (МГТУ)  
e-mail: ants@mgn.ru

### **Аксенов Владимир Алексеевич**

доктор технических наук, профессор, директор «Отраслевого центра охраны труда, промышленной, пожарной безопасности и экологии», заведующий кафедрой «Техносферная безопасность» Российской открытой академии транспорта федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Московский государственный университет путей сообщения».  
e-mail: v.aksenov@rgotups.ru

### **Ахрамович Игорь Лазаревич**

академик МАИ и РАН, доктор технических наук, профессор, генеральный директор Межрегиональной ассоциации «Моринформсистема», заместитель технического директора по качеству ОАО «Концерн «Моринсис-Агат». тел. (495) 673-13-14  
e-mail: ail01@mail.ru

### **Байнева Ирина Ивановна**

доцент, кандидат технических наук; доцент кафедры «Светотехника» светотехнического факультета Мордовского государственного университета им. Н.П.Огарева  
e-mail: baynevaii@rambler.ru

### **Байнев Виталий Валерьевич**

студент 3 курса Мордовского госуниверситета им.Н.П.Огарева, факультет электронной техники, специальность «Автоматизированные системы обработки информации и управления»  
e-mail: bw14@mail.ru

### **Завьялов Антон Михайлович**

кандидат технических наук, доцент кафедры «Железнодорожная автоматика, телемеханика и

связь» Российской открытой академии транспорта федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Московский государственный университет путей сообщения»  
e-mail: zavant@gmail.com

### **Демидович Николай Олегович**

кандидат технических наук, ответственный секретарь Технического комитета по стандартизации № 119 «Надежность в технике»

### **Карманов Анатолий Вячеславович**

доктор физико-математических наук, профессор кафедры АТП РГУ нефти и газа имени И.М. Губкина  
e-mail: ABKar2007@yandex.ru

### **Когут Сергей Александрович**

начальник отдела надежности ОАО «Концерн «Моринсис-Агат»  
тел. (495) 603-90-36  
e-mail: agat-kot@list.ru

### **Онищенко Дмитрий Дмитриевич,**

программист-биостатистик, ООО «Парексель Интернэшнл (РУС)».  
e-mail: d.d.onishchenko@gmail.com

### **Раенок Дмитрий Леонидович**

начальник Департамента охраны труда, промышленной безопасности и экологического контроля ОАО «РЖД»  
тел. (499) 262-41-48

### **Романов Юрий Владимирович**

начальник отдела надежности ОАО «Ульяновское конструкторское бюро приборостроения»  
e-mail: on@ukbp.ru

### **Стенюшкин Денис Игоревич**

аспирант кафедры «Измерительно-вычислительные комплексы» Ульяновского государственного технического университета  
e-mail: de\_sten@mail.ru

### **Терещенко Федор Вадимович**

инженер отдела надежности ОАО «Концерн «Моринсис-Агат»  
тел.: (495) 603-90-36  
e-mail: luxma@rambler.ru

### **Телюк Антон Сергеевич**

аспирант кафедры АТП РГУ нефти и газа имени И.М. Губкина  
e-mail: ABKar2007@yandex.ru

### **Чепурко Валерий Анатольевич**

кандидат физико-математических наук, доцент кафедры АСУ Обнинского государственного технического университета атомной энергетики (ИАТЭ)  
тел. (48439) 7-84-65  
e-mail: chepurko@iate.obninsk.ru

**Шишкин Вадим Викторович**

кандидат технических наук, профессор кафедры  
«Измерительно-вычислительные комплексы»  
Ульяновского государственного технического уни-  
верситета  
e-mail: shvv@ulstu.ru

**Antsupov Alexander V.**

PhD, associate professor of chair of Machinery  
Engineering Technology  
Magnitogorsk State Technical University (MGTU)  
Tel. (3519) 04-24-21  
E-mail: ants@mgn.ru

**Antsupov Alexey V.**

PhD, interim associate professor of chair of  
Mechanical Equipment of Metallurgic Plants  
Magnitogorsk State Technical University (MGTU)  
E-mail: ants@mgn.ru

**Antsupov Victor P.**

Doctor of technical sciences, professor of chair  
of Mechanical Equipment of Metallurgic Plants  
Magnitogorsk State Technical University (MGTU)  
E-mail: ants@mgn.ru

**Aksenov Vladimir A.**

Doctor of technical sciences, professor, director of  
Industrial Center for Labour Protection, Industrial,  
Fire Protection and Safety and Ecology, head of  
chair of Technospheric Safety of Russian Academy  
of Transport, Moscow State University of Railway  
Engineering  
E-mail: v.aksenov@rgotups.ru

**Akhramovich Igor L.**

Member of International Information Academy and  
Russian Academy of Sciences, doctor of technical  
science, professor, director general of Interregional  
association Morinformsystema, quality deputy of  
technical director JSC Concern Morinsis-Agat  
Tel. (495) 673-13-14  
E-mail: ailOI@mail.ru

**Bayneva Irina I.**

PhD, associate professor of chair of Lighting  
Engineering  
Mordovian State University  
E-mail: baynevaii@rambler.ru

**Baynev Vitaly V.**

3rd course student of Mordovian State University,  
faculty of electronic equipment, specialty Automated  
Systems of Information Processing and Management  
E-mail: bw14@mail.ru

**Zavyalov Anton M.**

PhD, associate professor of chair of Railway  
Automation, Telemechanics and Telecommunications  
Russian Academy of Transport, Moscow State  
University of Railway Engineering  
E-mail: zavant@gmail.com

**Demidovich Nikolay O.**

PhD, executive secretary of Standardization  
Technical Committee No. 119 Dependability in  
Equipment

**Karmanov Anatoly V.**

Doctor of physical and mathematical sciences,  
professor of chair of Automation of  
Technological Processes, Russian State  
University of Oil and Gas  
E-mail: ABKar2007@yandex.ru

**Kogut Sergey A.**

Head of reliability department of JSC Concern  
Morinsis-Agat  
Tel. (495) 603-90-36  
E-mail: agat-kot@list.ru

**Onischenko Dmitry D.**

Programmer-biostatistician, Parexel International  
(RUS) Ltd.  
E-mail: d.d.onishchenko@gmail.com

**Raenok Dmitry L.**

Head of Department of Labour Protection, Industrial  
Safety and Ecological Control of JSC RZD  
Tel. (499) 262-41-48

**Romanov Yury V.**

Head of reliability department of JSC Ulyanovsk Tool  
Engineering Design Bureau  
E-mail: on@ukbp.ru

**Stenyushkin Denis I.**

Postgraduate student of chair of Measuring and  
Computing Complexes,  
Ulyanovsk State Technical University  
E-mail: de\_sten@mail.ru

**Tereschenko Fedor V.**

Engineer of reliability department of JSC Concern  
Morinsis-Agat  
Tel.: (495) 603-90-36  
E-mail: luxma@rambler.ru

**Telyuk Anton S.**

Postgraduate student of chair of Automation of  
Technological Processes, Russian State University of  
Oil and Gas  
E-mail: ABKar2007@yandex.ru

**Chepurko Valery A.**

PhD, associate professor of chair of automated  
control systems, Obninsk Institute of Atomic Energy  
(IATE)  
Tel. (48439) 7-84-65  
E-mail: chepurko@iate.obninsk.ru

**Shishkin Vadim V.**

PhD, professor of chair of Measuring and Computing  
Complexes,  
Ulyanovsk State Technical University  
E-mail: shvv@ulstu.ru

## 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](http://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.