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

Главный редактор
Шубинский И.Б., д.т.н., проф.

Редколлегия
Бочков А.В., к.т.н.
Дзиркал Э.В., к.т.н.
Замышляев А.М., д.т.н.
Каштанов В.А., д.ф.-м.н., проф.
Климов С.М., д.т.н., проф.
Кофанов Ю.Н., д.т.н., проф.
Лецкий Э.К., д.т.н., проф.
Нетес В.А., д.т.н., проф.
Розенберг И.Н., д.т.н., проф.
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.
Юркевич Е.В., д.т.н., проф.

Выпускающий редактор
Патрикеева Е.В.

Издатель журнала
ООО «Журнал «Надежность»

Директор
Калинина И.В.

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

Верстка
Куртиш Б.С.

Отпечатано в ОАО «Областная типография «Печатный двор».
432049, г. Ульяновск,
ул. Пушкарева, 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

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.
S. Klimov, Dr. Sci., prof.
E. Letsky, Dr. Sci., prof.
V. Netes, Dr. Sci., prof.
I. Rozenberg, Dr. Sci., prof.
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.
E. Jurkevich, Dr. Sci., prof.
A. Zamyshlaev, Dr. Sci.
Commissioning editor
E. Patrikeeva

Publisher of the journal
LLC Journal "Dependability"

Director
I. Kalinina

The address:
109029, Moscow,
Str. Nizhegorodskaya, 27,
Building 1, 1, office 209
Ltd Journal "Dependability"
www. dependability.pro
Make-up
B. Kurtish

Printed by JSC "Regional printing house, Printing place" 432049, Ulyanovsk, Pushkarev str., 27. Circulation: 500 copies.
Printing order
Papers are reviewed.

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

СОДЕРЖАНИЕ/CONTENTS

ОТ ГЛАВНОГО РЕДАКТОРА *3*

A WORD FROM THE EDITOR-IN-CHIEF *4*

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

МЕТОДИЧЕСКИЕ ПОГРЕШНОСТИ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ СРЕДНЕГО РЕСУРСА ИЗДЕЛИЙ ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНИКИ
Кофанов Ю.Н., Стрельников В.П. *5*

METHODOLOGICAL IMPRECISION OF PREDICTION OF ELECTRONICS' MEAN LIFE TIME
Kofanov Yu.N., Strelnikov V.P. *9*

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ БОРТОВОЙ АППАРАТУРЫ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ НИЗКОЙ ИНТЕНСИВНОСТИ
Жаднов В.В., Артюхова М.А. *13*

FORECASTING DEPENDABILITY INDICATORS OF SPACECRAFT ONBOARD EQUIPMENT UNDER LOW-INTENSITY IONIZING RADIATION
Zhadnov V.V., Artyukhova M.A. *19*

О НАДЕЖНОСТИ ПОДВИЖНОГО СОСТАВА, ПРОШЕДШЕГО РЕМОНТ
Володарский В.А., Орленко А.И. *25*

ON THE DEPENDABILITY OF RECONDITIONED ROLLING STOCK
Volodarsky V.A., Orlenko A.I. *29*

СТАТИСТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА НАРАБОТКИ ДО ОТКАЗА ПОЛУВАГОНОВ В МЕЖРЕМОНТНОМ ПЕРИОДЕ
Иванова Т.В., Петровых В.А., Налабордин Д.Г. *32*

STATISTICAL ESTIMATION OF MEAN TIME TO FAILURE OF GONDOLA CARS BETWEEN REPAIRS
Ivanova T.V., Petrovykh V.A., Nalabordin D.G. *36*

МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ДИАГНОСТИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ СЛАБОТОЧНЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ РЕЛЕ
Лавров В.А., Дурнев А.В. *39*

METHODS AND MEANS OF DIAGNOSTIC CONTROL OF LOW-CURRENT ELECTROMAGNETIC RELAYS
Lavrov V.A., Durnev A.V. *46*

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

ПРОБЛЕМАТИКА В ОБЛАСТИ НАДЕЖНОСТИ ПРОГРАММНЫХ СИСТЕМ
Потапов И.В. *53*

ISSUES OF SOFTWARE SYSTEMS DEPENDABILITY
Potapov I.V. *58*

ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ УПРАВЛЕНИЯ ПЕРСОНАЛОМ НА ОСНОВЕ ОБЪЕКТИВНОЙ ПСИХОДИАГНОСТИКИ
Ануашвили А.Н. *62*

ENHANCEMENT OF RELIABILITY OF HUMAN RESOURCE MANAGEMENT BASED ON OBJECTIVE PSYCHODIAGNOSTICS
Anuashvily A.N. *69*

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

АРХИТЕКТУРА ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ СИСТЕМЫ, СВЯЗАННОЙ С БЕЗОПАСНОСТЬЮ
Колчин А.Ф., Михеев Н.В. *75*

ARCHITECTURE OF SAFETY RELATED SYSTEM SOFTWARE
Kolchin A.F., Mikheev N.V. *82*

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ РЕСУРСОВ, ПРЕДНАЗНАЧЕННЫХ ДЛЯ ЗАЩИТЫ ОБЪЕКТОВ КРИТИЧЕСКОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ ОТ ТЕРРОРИСТИЧЕСКИХ АТАК НА ОСНОВЕ СУБЪЕКТИВНЫХ ЭКСПЕРТНЫХ ОЦЕНОК
Бочков А.В., Ушаков И.А. *88*

SOLVING THE TASK OF RESOURCES ALLOCATION FOR CRITICAL INFRASTRUCTURE PROTECTION AGAINST TERRORIST ATTACKS BASED ON SUBJECTIVE EXPERT ESTIMATES
Bochkov A.V., Ushakov I.A. *93*

НЕКРОЛОГ *97*

OBITUARY *98*

ГНЕДЕНКО –ФОРУМ *99*

GNEDENKO FORUM *100*

УВАЖАЕМЫЕ КОЛЛЕГИ, ДРУЗЬЯ!

Обращаюсь ко всем специалистам надежности, ко всем исследователям и практическим работникам в области надежности, которые заинтересованы в публикации своих оригинальных результатов или новых трактовок существующих понятий и положений надежности. Редколлегия журнала открыта для широкого диалога с авторами и читателями журнала, редколлегия заинтересована в освещении текущего состояния теории и практики надежности и, конечно, перспективных направлений ее развития.

Надежность, как научная дисциплина, в настоящее время переживает новый этап своего развития. Это, в значительной мере, связано с автоматизацией производства на основе современных информационных технологий, с энергичным развитием телекоммуникационных технологий. В настоящее время формируется общая теория надежности (Dependability). Известные исследователи в области надежности информационных систем Авиженис А., Лапрэ Д.-С., Рэнделл Б. и др. под общей надежностью понимают способность информационной системы поставлять обслуживание, которому можно доверять. Известно, что объект классической (структурной) надежности – продукция (изделие). Изделие — это предмет или набор предметов, изготовляемых на предприятии. Изделие является результатом производственного процесса. В свою очередь, объект функциональной надежности – услуга (функция), осуществляемая с помощью технической системы (действие, операция, процесс). Услуги — виды деятельности, работ, в процессе восполнения которых не создается новый, ранее не существовавший материально-вещественный продукт, но изменяется качество уже имеющегося, созданного продукта. Само оказание услуги создает желаемый результат.

Сочетание задач создания надежной продукции и обеспечения «обслуживания, которому можно доверять» и есть, по нашему убеждению то, что следует называть задачами общей (современной) теории надежности. Это толкование надежности позволяет концентрировать усилия не только в области информационных и телекоммуникационных систем, но и широко использовать и развивать фундаментальные результаты классической надежности по построению надежных механических объектов и систем.

Надежность, как научная дисциплина, оказывает большое влияние на смежные дисциплины. Это относится к функциональной и информационной безопасности, а также к кибербезопасности. В свою очередь, и эти научные дисциплины оказывают обратное влияние на развитие надежности. Поэтому смежные научно – практические результаты обсуждаются на страницах журнала в разделах «Функциональная надежность» и «Функциональная безопасность».

Большое внимание редколлегия журнала уделяет проблематике оценки рисков нарушения надежности и безопасности объектов и процессов. Приветствуются работы по методологии оценки рисков; статьи, содержащие результаты оценки рисков, теоретические методы и практические результаты управления рисками.

Проблемы стандартизации и сертификации в области надежности находятся в центре внимания журнала. Этой проблеме в течение последних лет посвящена серия статей. Так, ряд из них освещают нормативную базу, созданную в ОАО «РЖД» в рамках проекта УРРАН (Управление ресурсами, рисками, надежностью и безопасностью на железнодорожном транспорте).

Журнал «Надёжность» включён в перечень ведущих журналов и изданий Высшей аттестационной комиссии (ВАК).

На сегодняшний день в работе журнала принимают участие ведущие российские и зарубежные учёные, а также специалисты-практики, руководители высшего звена компаний.

Журнал издается на русском и английском языках.

Журнал открыт для широкой публикации ваших научно-практических результатов в данной предметной области.

В нашем журнале вы можете разместить рекламу на выгодных для вас условиях!

Будем рады видеть вас в числе наших основных подписчиков и авторов журнала!

Более подробную информацию можно получить на сайте: www.dependability.pro.

С уважением,
Главный редактор журнала «Надёжность»,
эксперт научного совета при Совете Безопасности РФ,
доктор технических наук, профессор

Шубинский И.Б.

DEAR COLLEAGUES, FRIENDS

I address myself to all experts in the field of dependability, to all researchers and workers in the field of dependability who are interested in publishing their authentic results or new interpretations of the existing concepts and principles of dependability. The editorial board of the journal are open for a broad dialogue with authors and readers of the journal, we are interested in covering the state of the art of the dependability theory and practice and of course, the aspects of its further development.

Dependability as a science discipline enjoys a new phase of its development. This is to a great extent connected with the automation of production based on advanced information technology and the intensive development of telecommunications technology. A general theory of dependability is currently being developed. Well-known researchers in the field of information systems dependability such as A. Avižienis, J-C. Laprie, B. Randell and others understand dependability as the ability of an information system to deliver service that can be justifiably trusted. It is known that the object of classical (structural) dependability is a product. A product is an item or a set of items manufactured at an enterprise. In turn, the object of functional dependability is service (function) delivered with the help of a technical system (action, operation, process). Services are types of activities, works whose execution does not lead to the creation of a new material product not existed before but rather it changes the quality of an already existing product developed earlier. Service delivery by itself brings a desired result.

It is the combination of the tasks related to development of a reliable product and delivery of "service that can be justifiably trusted" what in our opinion should be called the tasks of a general (state-of-the-art) dependability theory. This interpretation gives a possibility to concentrate not only on information and telecommunications systems but also to widely apply and develop fundamental results of classical dependability for constructing reliable mechanical objects and systems.

Dependability as a science discipline оказывает greatly influences adjacent disciplines. This applies to functional and information safety as well as cyber security. In turn, these science disciplines also make back impacts on development of dependability. Therefore, results of researches in adjacent fields are discussed in sections Functional reliability and Functional safety of the journal.

The editorial board gives a lot of coverage to the issues of risk assessment as regards objects and processes reliability and safety violations. We welcome works about methods of risk assessment, and papers presenting results of risk assessment, theoretical methods and practical results of risk management.

The journal makes a focus on the problems of dependability standardization and certification. A series of papers has been devoted to this issue over the last few years. Some of them cover the normative framework made in Russian Railways within the URRAN project (Management of Resources, Risks, Reliability and Safety on Railway Transport).

The Dependability journal is included in the list of major journal and editions of the Higher attestation commission (VAK).

Today the journal enjoys the participation of major Russian and international researchers as well as practicing experts and top managers.

The journal is published in Russian and English.

The journal is widely open for publishing your scientific and practical results in this domain area.

In our journal you can put an advertisement on favourable terms!

We'll be glad to see you among our key subscribers and authors!

For more detailed information please visit our website: www.dependability.pro.

Sincerely yours,
Editor-in-chief of the Dependability Journal
Expert of Research Security Council
of the Russian Federation
Doctor of Technical Sciences, Professor

I.B. Shubinsky

Кофанов Ю.Н., Стрельников В.П.

МЕТОДИЧЕСКИЕ ПОГРЕШНОСТИ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ СРЕДНЕГО РЕСУРСА ИЗДЕЛИЙ ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНИКИ

Представлены методики оценки средней наработки до отказа изделий электронной техники (MTTF) на основе использования DN-распределения для различных экспериментальных и справочных данных о надежности: интенсивности отказов, вероятности отказов, минимальной наработки, величины FIT. Отмечается, что прогнозные оценки MTTF на основе экспоненциального распределения завышены в 70-500 раз по сравнению с аналогичными оценками на основе DN-распределения.

Ключевые слова: *надежность, квантиль, распределение наработки до отказа (ресурс), средняя наработка до отказа (MTTF).*

Введение

При решении практически всех задач надежности используют определенные теоретические модели надежности (функции распределения наработки до отказа (на отказ)). В последние годы исследователи надежности техники используют решения разнообразных задач надежности, основанные на применении различных теоретических моделей надежности (экспоненциального, Вейбулла, логарифмически нормального, диффузионных [1] и других распределений [2, 3]), которые приводят к значительному расхождению получаемых результатов. Ниже приводятся результаты оценки (прогнозирования) средней наработки до отказа изделий электронной техники (ИЭТ) при использовании различных теоретических моделей отказов.

Оценка и прогнозирование средней наработки до отказа ИЭТ

Современная элементная база – это изделия электронной техники, обладающие достаточно высокой надежностью. В связи с этим, средняя наработка до отказа ИЭТ (Mean Time to Failure – MTTF) – характеристика, необходимая производителям ИЭТ, а также разработчикам технических систем, может быть оценена только параметрическим методом, то есть путем использования соответствующих теоретических моделей распределения наработки до отказа. Использование той или иной теоретической модели отказов предопределяет соответствующие методические погрешности при оценке MTTF. При этом надежность изделий электронной техники такова, что при испытаниях удается получить наработки, соответствующие экспериментальной вероятности отказов $F(t)$=0,0001...0,0005, и на основании этих результатов прогнозировать среднее время до отказа данных изделий. Известно [4, 5], что прогнозирование среднего значения для квантилей указанного уровня вероятностей при использовании однопараметрического

экспоненциального закона приводит к завышению оценки на несколько порядков по сравнению с известными двухпараметрическими законами. Прогноз средней наработки до отказа ИЭТ на основе двухпараметрических распределений естественно является точнее.

Ниже приводятся результаты исследования и причины в расхождении прогнозируемых оценок MTTF при использовании различных теоретических функций распределения наработки до отказа на примере интегральных микросхем (ИМС).

Для сокращения объема испытаний, с целью оценки надежности ИМС, ведущие производители электронных компонентов проводят ускоренные испытания, позволяющие получить оценки показателей надежности за время, значительно меньшее реальной долговечности ИМС. Основным способом сокращения продолжительности испытаний является форсирование режимов работы ИМС температурой, ускоряющей основные физико-химические процессы деградации электронных компонентов.

Коэффициент ускорения A_t в зависимости от температуры определяется исследователями, следуя закону Аррениуса:

$$A_t = \exp\left[-\frac{E_a}{k}\left(\frac{1}{T_f}-\frac{1}{T_n}\right)\right],$$

где E_a – энергия активации (для ИМС $E_a = 0{,}7$ *eB*); k – постоянная Больцмана ($k = 8{,}617\cdot10^{-5}$); T_f – температура, при которой проводились форсированные испытания (в К); T_n – рабочая температура компонентов (в К). Испытания ИМС на надежность при повышенной температуре, как правило, проводятся в соответствии со стандартом MIL-STD-883, метод 1005 [6].

В таблице 1 представлены коэффициенты ускорения в зависимости от температуры проведения форсированных испытаний, которыми пользуются специалисты [6,7], основываясь на выше указанных теоретических предпосылках. Однако экспериментального подтверждения этих данных нет, и получить их практически невозможно, поскольку получение статистических данных в нормальных условиях эксплуатации практически не реально.

Уровень надежности современных ИМС настолько высок, что даже форсированные испытания на надежность при повышенной температуре не позволяют определить показатели надежности некоторых типов ИМС. Поэтому оценка показателей надежности выполняется в обобщенной форме и показатели группируются по типам технологий или достаточно обширным классам ИМС. Таким образом, исходные данные по оценке показателей надежности (как правило, интенсивности отказов) включают как методические погрешности температурных пересчетов, так и влияние разных технологических процессов изготовления конкретных ИМС.

Прогнозирование MTTF ИМС на основании результатов экспериментальной оценки интенсивности отказов

В качестве исходных данных использованы достаточно объемные результаты испытаний интегральных микросхем BiCMOS фирмы Analog Devices [7]. В [6] показано, что ИМС типа BiCMOS имеет показатель надежности FIT=5. Значение величины FIT было установлено на основании испытаний N = 26980 образцов, при этом произведение (ИМС)×(час)=*EDH* (приведенное полное время испытаний), то есть EDH = 2763317240 час, число отказов за время наблюдения r = 12. Необходимо вычислить среднюю наработку до отказа T_0 (MTTF) этой ИМС.

Определяем усредненное время испытаний каждого образца: $\tilde{t}_н = \frac{\text{EDH}}{\text{N}} = 102420$ *ч*. Вычисляем экспериментальную интенсивность отказов: $\tilde{\lambda}(\tilde{t}_н) = \frac{FIT}{10^9} = 5\cdot10^{-9}\,1/ч$. Вычисляем вероятность отказа на момент $\tilde{t}_н$:

$$F(\tilde{t}_н) = \frac{r}{N} = 0{,}00044.$$

Поскольку статистических данных для оценки параметров формы двухпараметрических распределений нет, принимаем гипотезу о равенстве коэффициента вариации распределения наработки единице ($v = 1$), как у экспоненциального распределения. Заметим, что исследователи, использующие для решения задач надежности однопараметрическое экспоненциальное рас-

Таблица 1. Значения коэффициента ускорения в зависимости от температуры проведения форсированных испытаний

Температура испытаний ИМС, °С	Рабочая температура ИМС, °С	Коэффициент A_t
150	55	258
140	55	162
135	55	128
125	55	77
100	55	20

пределение, автоматически допускают, что коэффициент вариации распределения наработки до отказа (на отказ) равен единице. Далее, используя исходные данные ($\tilde{t}_н$, $\tilde{\lambda}(\tilde{t}_н)$, $F(\tilde{t}_н)$) и различные теоретические функции распределения наработки до отказа (экспоненциальное (*E*), Вейбулла (W), логарифмически нормальное (*LN*), *DN* – и *DM*-распределение), получают прогнозные оценки MTTF:

Экспоненциальное распределение: $T_0^E = \frac{1}{\tilde{\lambda}(\tilde{t}_н)} =$

$= \frac{1}{5\cdot 10^{-9}} = 2\cdot 10^8 \, ч = \frac{200000000}{8760} \cong 22830 \, лет.$

Распределение Вейбулла: при коэффициенте вариации, равном единице,

$T_0^W = T_0^E = 22830 \, лет.$

Логарифмически нормальное распределение:

а. Параметр формы σ логарифмически нормального распределения можно вычислить из следующего соотношения: $\sigma = \sqrt{\ln(\nu^2+1)} = \sqrt{\ln 2} = 0,833.$

б. Параметр масштаба *a* логарифмически нормального распределения вычисляют из соотношения для вероятности отказов:

$$\tilde{F}(\tilde{t}_н) = \Phi\left(U_{\tilde{t}_н}\right) = \Phi\left(\frac{\ln \tilde{t}_н - a}{\sigma}\right) = 0,00044;$$

здесь и далее Φ() – функция нормированного нормального распределения;

$a = \ln \tilde{t}_н - \sigma U_{\tilde{t}_н} = \ln 102420 - 0,833\cdot(-3,33) = 14,31.$

в. Математическое ожидание наработки до отказа:

$$T_0^{LN} = \exp\left(a + \frac{\sigma^2}{2}\right) = \exp(14,657) =$$

$$= 2316168 \, ч = \frac{2316168}{8760} = 264 \, лет.$$

Диффузионное монотонное распределение (*DM*-распределение):

а. Параметр формы *DM* -распределения *ν*=1.

б. Параметр масштаба μ *DM*-распределения вычисляют из соотношения для вероятности отказов:

$$\tilde{F}(\tilde{t}_н) = DM\left(t;\mu,\nu\right) = \Phi\left(\frac{\tilde{t}_н - \mu}{\nu\sqrt{\mu\tilde{t}_н}}\right) = 0,00044;$$

$$\mu = \tilde{t}_н\left(1 + \frac{\nu^2 U_{\tilde{t}_н}^2}{2} - \nu U_{\tilde{t}_н}\sqrt{1 + \frac{\nu^2 U_{\tilde{t}_н}^2}{4}}\right) =$$

$$= 102420\left(1 + \frac{(-3,33)^2}{2} + 3,33\sqrt{1 + \frac{(-3,33)^2}{4}}\right) = 1332694 \, ч\cdot$$

в. Математическое ожидание наработки до отказа:

$$T_0^{DM} = \mu\left(1 + \frac{\nu^2}{2}\right) = 1332694\cdot 1,5 =$$

$$= 1999041 \, ч = \frac{1999041}{8760} = 228 \, лет.$$

Диффузионное немонотонное распределение (*DN*-распределение):

а. Параметр формы *DN*-распределения ν=1.

б. Параметр масштаба μ *DN*-распределения вычисляют из соотношения для вероятности отказов:

$$\tilde{F}(\tilde{t}_н) = DN\left(t;\mu,\nu\right) = \Phi\left(\frac{\tilde{t}_н - \mu}{\nu\sqrt{\mu\tilde{t}_н}}\right) +$$

$$+ \exp\left(\frac{2}{\nu_2}\right)\cdot\Phi\left(-\frac{\tilde{t}_н + \mu}{\nu\sqrt{\mu\tilde{t}_н}}\right) = 0,00044;$$

$$\mu = \frac{\tilde{t}_н}{x\left(\tilde{F}(\tilde{t}_н);\nu\right)} = \frac{102420}{x(0,00044;1)} = \frac{102420}{0,0699} =$$

$$= 1465236 \, ч.$$

Значение $x(F;\nu)$ относительной наработки $x = \tilde{t}_н / \mu$ определяется из соответствующих таблиц *DN*-распределения по значениям *F* и *ν* или из решения уравнения

$$\Phi\left(\frac{x-1}{\nu\sqrt{x}}\right) + \exp\left(\frac{2}{\nu^2}\right)\cdot\Phi\left(-\frac{x+1}{\nu\sqrt{x}}\right) = F.$$

Математическое ожидание наработки до отказа по *DN*-распределению:

$$T_0^{DN} = \mu = 1465236 \, ч = \frac{1465236}{8760} = 167 \, лет.$$

Приведенный выше прогнозный расчет MTTF исследуемой ИМС выполнен при допущении значения коэффициента вариации распределения наработок ИМС, равном единице ($\nu = 1$). Из опыта эксплуатации электронных систем представляется, что наиболее правильное значение коэффициента вариации наработок до отказа изделий электронной техники в режимах эксплуатации, в том числе ИМС, составит $\nu = 0,8$. Ниже в таблице 2 приводятся прогнозные оценки MTTF исследуемой ИМС при гипотезе $\nu = 0,8$, которые рассчитаны аналогично предыдущему случаю.

Как видно из представленных данных, расхождение между прогнозными оценками MTTF ИМС, заявленной надежности (FIT=5), например, между оценками на

Таблица 2. Прогнозируемые оценки MTTF ИМС BiCMOS фирмы Analog Devices (в годах) по результатам форсированных испытаний

ν	E	W	LN	DM	DN
1,0	22830	22830	264	228	167
0,8	22830	5275	155	128	115

основе экспоненциального и диффузионного немонотонного распределений составляет порядка 100-200 раз. Если выполнить аналогичные прогнозы для ИМС, имеющей надежность FIT=1, то расхождение прогнозных оценок MTTF составит порядка 500 раз.

Механизм расхождения прогнозных оценок

Расхождение прогнозных оценок MTTF ИМС, получаемых на основе одних и тех же экспериментальных оценок интенсивности отказов, определяется видом теоретического закона распределения наработки до отказа. На рис. 1 представлены теоретические кривые плотности распределения наработки $f(t)$ (штриховые линии) и интенсивности отказов $\lambda(t)$ (непрерывные линии), а также прогнозируемые значения средней наработки до отказа MTTF, соответствующие экспериментальным данным для разных законов распределения (E,LN, DN).

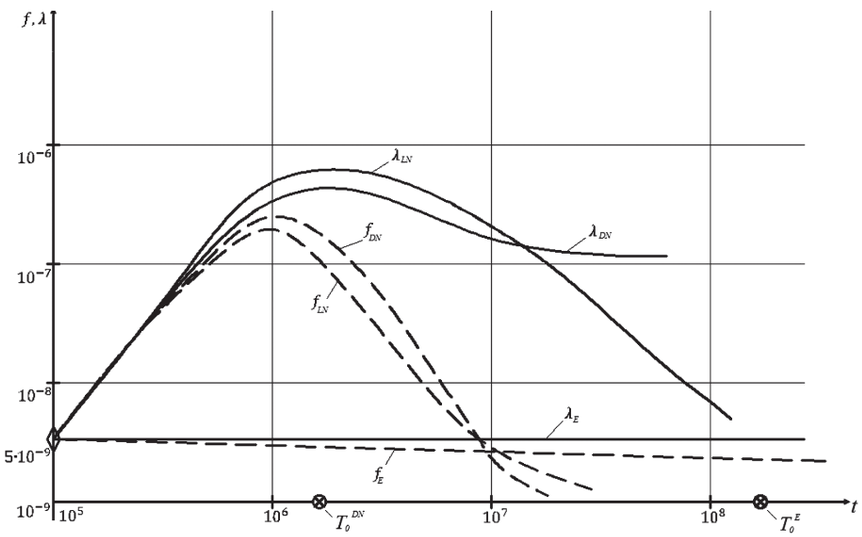


Рис. 1. Кривые прогнозируемых характеристик $\lambda(t)$ и $f(t)$

На рис. 1 обозначено: $f_E, f_{LN}, f_{DN}, \lambda_E, \lambda_{LN}, \lambda_{DN}$ – соответственно плотности и интенсивности отказов экспоненциального, логарифмически нормального и немонотонного диффузионного распределений. Как видно, интенсивность отказов $\lambda(t)$ и плотность распределения $f(t)$ двухпараметрических распределений на основном временном интервале весьма существенно (на несколько порядков) отличаются от этих характеристик по экспоненциальному распределению, хотя исходные значения на момент $\tilde{t}_н$ совпадают. Это явление и обусловливает такое же существенное расхождение прогнозируемых значений MTTF по различным законам распределений.

Таким образом [5, 8], в настоящее время при использовании экспоненциального закона завышается математическое ожидание времени до отказа (MTTF) изделий электронной техники в 50…500 и более раз по сравнению со значением этой же характеристики, вытекающей из двухпараметрических моделей, более адекватно описывающих статистику отказов.

Выводы

Экспоненциальный закон распределения времени безотказной работы, получивший широкое распространение, часто не отражает реальные условия возникновения отказов электронной техники. Его применение приносит большой экономический ущерб, в первую очередь, потребителям изделий электронной техники, применяющих их в бортовом аэрокосмическом оборудовании и в других ответственных случаях.

Двухпараметрические диффузионные законы распределения, разработанные в Институте проблем математических машин и систем Национальной академии наук Украины, как показывают теоретические и экспериментальные исследования, дают наиболее адекватные показатели надёжности изделий электронной техники [5, 8].

Литература

1. **Strelnikov V.** The Status and Prospects of Reliability Technology – Part 1 // RAC Jornal. – 2001, N 1. – P. 1 – 4; Part 2 // RAC Jornal. – 2001, N 2. – P. 8 – 10.

2. **Кофанов Ю.Н.** Моделирование и обеспечение надёжности технических систем: Научное издание. – Москва: Энергоатомиздат, 2011, – 324 с.

3. **Кофанов Ю.Н.** Теоретические основы конструирования, технологии и надёжности радиоэлектронных средств: Учебник для вузов. – Москва: Радио и связь, 1991. – 360 с.

4. **Шор Я.Б.** Статистические методы анализа и контроля качества и надежности. – М.: Сов. радио, 1962. – 252 с.

5. **Стрельников В.П., Федухин А.В.** Оценка и прогнозирование надежности электронных элементов и систем. – К.: Логос, 2002. – 486 с.

6. **Романов В. А.** Количественная оценка надежности интегральных микросхем по результатам форсированных испытаний // ЭКиС. – Киев: VD MAIS, 2003, №10. – С. 3-6.

7. Reliability and Quality Report. Fourth Quarter 1996. – Motorola, Inc., 1996.

8. **Грибов В.М., Кофанов Ю.Н., Стрельников В.П.** Оценивание и прогнозирование надёжности бортового аэрокосмического оборудования: Под отв. редакцией Ю.Н. Кофанова. – М.: НИУ ВШЭ, 2013. – 496 с.

Kofanov Yu.N., Strelnikov V.P.

METHODOLOGICAL IMPRECISION OF PREDICTION OF ELECTRONICS' MEAN LIFE TIME

The paper presents the methods for evaluating the mean time to failure (MTTF) of electronics products based on the application of DN distribution for various experimental and reference data on reliability – failure rate, failure probabilities, minimal time to failure, FIT. It is noted that MTTF predictive estimates based on exponential distribution are overstated by 70-500 times as compared to those based on DN distribution.

Keywords: *reliability, quantile, time to failure distribution (resource), mean time to failure (MTTF).*

Introduction

To solve practically all problems of reliability, we use specific theoretical models of reliability (time to failure distribution functions). Researchers of equipment reliability have recently used solutions of various reliability problems based on application of various theoretical models of reliability (exponential, Weibull, logarithmical normal, diffusive [1] and other distributions [2, 3]), which lead to substantial discrepancies of final results. Below you can find the results of assessing (predicting) the mean time to failure of electronic devices (ED) obtained with the use of various theoretical models of failures.

Assessment and prediction of ED mean time to failure

Modern hardware components are electronics products that feature rather high reliability. Owing to this, ED mean time to failure (MTTF) as a feature needed by ED producers as well as by developers of technical systems can only be assessed by a parametrical method, i.e. by means of application of respective theoretical models of time to failure. The application of one or another theoretical model of failures stipulates corresponding methodological imprecision of MTTF assessment. And the reliability of electronic devices is such that testing manages to provide products life corresponding to the experimental failure probability $F(t)$ =0,0001...0,0005, and based on these results, it makes it possible to predict mean time to failure of these products. It is known [4,5] that prediction of a mean value for quantiles of the specified probability level while using a one-parametric exponential law leads to overstatement of assessment by several orders of magnitude as compared to the known two-parametric laws. Naturally, the prediction of ED mean time to failure based on two-parametric distributions is more precise.

Below you can find the results of research and the causes of variation of predicted MTTF estimates using various theoretical functions of time to failure distributions exemplified by integrated circuits (IC).

To reduce the volume of testing for IC reliability assessment, major producers of electronic components make accelerated testing capable of getting assessments of reliability parameters

for the time considerably shorter than the real longevity of IC. The main way to reduce testing duration is to force IC operation modes by temperature accelerating the basic physical and chemical processes of degradation of electronic components.

Acceleration coefficient A_t in relation to temperature is defined by researches according to the Arrhenius law:

$$A_t = \exp\left[-\frac{E_a}{k}\left(\frac{1}{T_f}-\frac{1}{T_n}\right)\right],$$

where E_a is the energy of activation (for IC $E_a = 0{,}7eB$); k is the Boltzmann constant ($k = 8{,}617\cdot10^{-5}$); T_f is the temperature at which forced testing was made (in K); T_n is the operation temperature of components (in K). IC testing for reliability under increased temperature is generally made according to MIL-STD-883, method 1005 [6].

Table 1 presents acceleration coefficients in relation to temperatures of forced testing used by researchers [6,7] based on the above theoretical assumptions. However there is no experimental proof of these data and it is practically impossible to get it, as it is almost not real to get statistical data in normal operation conditions.

Table 1. Acceleration coefficient values in relation to forced testing temperatures

IC testing temperature, °C	IC operation temperature, °C	Coefficient A_t
150	55	258
140	55	162
135	55	128
125	55	77
100	55	20

The level of modern IC reliability is so high that even forced testing for reliability under increased temperature doesn't make it possible to identify the reliability parameters of some integrated circuits. Therefore, assessment of reliability parameters is done in generalized form and the parameters are grouped as to types of technology or rather numerous classes of integrated circuits. Thus, input data of reliability assessment (generally failure rate) includes methodological imprecision of temperature conversions as well as influences of various technological processes related to manufacture of individual integrated circuits.

Prediction of IC MTTF based on the results of experimental assessment of failure rate

As source data, quite huge results of testing of BiCMOS integrated circuits produced by Analog Devices [7] are used. [6] shows that IC like BiCMOS has reliability of FIT=5. FIT value was defined based on testing of N=26980 samples, and in this case the product (IC)×(hour))=EDH (total time of testing), i.e. EDH = 2763317240 hour, the number of failures for observation time r = 12. We shall calculate the mean time to failure T_0 (MTTF) of this IC.

Let us define the averaged time of testing for each sample: $\tilde{t}_н = \frac{\text{EDH}}{\text{N}} = 102420\ h$. Now we calculate the experimental failure rate: $\tilde{\lambda}(\tilde{t}_н) = \frac{FIT}{10^9} = 5\cdot10^{-9}\,1/h$. Then we calculate the failure probability for moment $\tilde{t}_н$: $F(\tilde{t}_н) = \frac{r}{N} = 0{,}00044$.

Since there is no statistical data for assessment of parameters of two-parametric distributions, we assume that the variation coefficient of time to failure distribution is equal to entity (v = 1), as for exponential distribution. Note that researchers using a one-parametric exponential distribution to solve tasks automatically assume that the variation coefficient of time to failure distribution is equal to entity. Then using the source data ($\tilde{t}_н$, $\tilde{\lambda}(\tilde{t}_н)$, $F(\tilde{t}_н)$) and various theoretical functions time to failure distribution (exponential (E), Weibull (W), logarithmical normal (LN), DN and DM distributions) we get predicted MTTF estimates:

Exponential distribution: $T_0^E = \frac{1}{\tilde{\lambda}(\tilde{t}_н)} = \frac{1}{5\cdot10^{-9}} =$

$= 2\cdot10^8 h = \frac{200000000}{8760} \cong 22830$ *years*.

Weibull distribution: with the variation coefficient equal to entity,

$$T_0^W = T_0^E = 22830 \text{ years}.$$

Logarithmical normal distribution:

The parameter of σ form of logarithmical normal distribution can be calculated from the following relation:

$$\sigma = \sqrt{\ln(v^2+1)} = \sqrt{\ln 2} = 0{,}833.$$

The parameter of a size of logarithmical normal distribution is calculated from the relation for failure probability:

$$\tilde{F}(\tilde{t}_н) = \Phi\left(U_{\tilde{t}_н}\right) = \Phi\left(\frac{\ln\tilde{t}_н - a}{\sigma}\right) = 0{,}00044;$$

hereinafter Φ(·) is the function of standardized normal distribution;

$$a = \ln\tilde{t}_н - \sigma U_{\tilde{t}_н} = \ln 102420 - 0{,}833\cdot(-3{,}33) = 14{,}31.$$

The mathematical expectation of time to failure:

$$T_0^{LN} = \exp\left(a+\frac{\sigma^2}{2}\right) = \exp(14{,}657) =$$

$$2316168\ h = \frac{2316168}{8760} = 264 \text{ years}.$$

Diffusive monotonous distribution (DM distribution):

The parameter of DM distribution v = 1.

The parameter of μ size of DM distribution is calculated from the relation for failure probability:

$$\tilde{F}(\tilde{t}_н) = DM\left(t;\mu,\nu\right) = \Phi\left(\frac{\tilde{t}_н - \mu}{\nu\sqrt{\mu\tilde{t}_н}}\right) = 0,00044;$$

$$\mu = \tilde{t}_н\left(1 + \frac{\nu^2 U_{\tilde{t}_н}^2}{2} - \nu U_{\tilde{t}_н}\sqrt{1 + \frac{\nu^2 U_{\tilde{t}_н}^2}{4}}\right) =$$

$$= 102420\left(1 + \frac{(-3,33)^2}{2} + 3,33\sqrt{1 + \frac{(-3,33)^2}{4}}\right) = 1332694 \text{ h}.$$

The mathematical expectation of time to failure:

$$T_0^{DM} = \mu\left(1 + \frac{\nu^2}{2}\right) = 1332694 \cdot 1,5 =$$

$$= 1999041 ч = \frac{1999041}{8760} = 228 \textit{ years}.$$

Diffusive non-monotonous distribution (DN distribution):

The parameter of DN distribution $v = 1$.

The parameter of μ size of DN distribution is calculated from the relation for failure probability:

$$\tilde{F}(\tilde{t}_н) = DN\left(t;\mu,\nu\right) = \Phi\left(\frac{\tilde{t}_н - \mu}{\nu\sqrt{\mu\tilde{t}_н}}\right) +$$

$$+ \exp\left(\frac{2}{\nu_2}\right)\cdot\Phi\left(-\frac{\tilde{t}_н + \mu}{\nu\sqrt{\mu\tilde{t}_н}}\right) = 0,00044;$$

$$\mu = \frac{\tilde{t}_н}{x\left(\tilde{F}(\tilde{t}_н);\nu\right)} = \frac{102420}{x\left(0,00044;1\right)} = \frac{102420}{0,0699} =$$

$$= 1465236 \textit{ h}.$$

Value $x(F; v)$ of relative time to failure $x = \tilde{t}_н / \mu$ is defined from the respective tables of DN distribution as per values F and v, or from solving the equation

$$\Phi\left(\frac{x-1}{\nu\sqrt{x}}\right) + \exp\left(\frac{2}{\nu^2}\right)\cdot\Phi\left(-\frac{x+1}{\nu\sqrt{x}}\right) = F.$$

The mathematical expectation of time to failure as per DN distribution:

$$T_0^{DN} = \mu = 1465236 ч = \frac{1465236}{8760} = 167 \textit{ years}.$$

The above predictive MTTF calculation of considered IC was done upon the assumption that the value of variation coefficient of IC time to failure distribution is equal to entity ($v = 1$). The experience of electronic systems operation suggests that a more correct value of variation coefficient of time to failure of electronic devices in operation modes, including IC, will be $v = 0,8$. Table 2 below presents MTTF predictive estimates of considered IC based on the hypothesis $v = 0,8$ that are calculated by analogy to the previous case.

Table 2. MTTF predictive estimates of BiCMOS IC by Analog Devices (in years) upon results of forced testing

v	E	W	LN	DM	DN
1,0	22830	22830	264	228	167
0,8	22830	5275	155	128	115

As follows from the above data, the discrepancy between IC MTTF predictive estimates, declared reliability (FIT=5), for example, between estimates based on exponential and diffusive non-monotonous distributions is about 100-200 times. If we do analogous predictions for IC with the reliability FIT=1, then the variation of MTTF predictive estimates will be about 500 times.

The mechanism of predictive estimates discrepancy

The discrepancy of IC MTTF predictive estimates obtained on the basis of the same experimental estimates of failure rate is defined by the type of a theoretical law of time to failure distribution. Fig 1 shows theoretical curves of time to failure distribution density $f(t)$ (dashed lines) and failure rate $\lambda(t)$ (solid lines), as well as predictive values of mean time to failure MTTF corresponding to experimental data for various distribution laws (E, LN, DN).

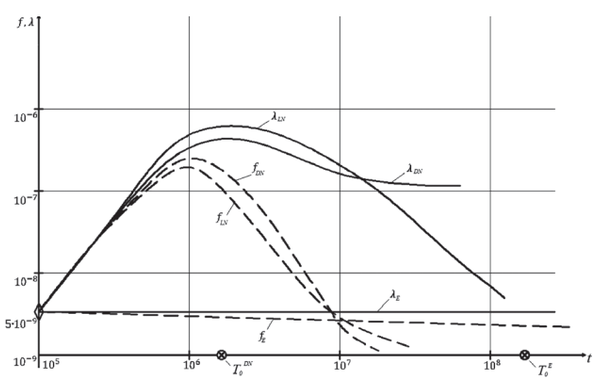


Fig. 1. Curves of predicted characteristics $\lambda(t)$ and $f(t)$

Fig. 1 has the following symbols: $f_E, f_{LN}, f_{DN}, \lambda_E, \lambda_{LN}, \lambda_{DN}$ are respectively failure densities and rates for exponential, logarithmical normal and non-monotonous diffusive. As seen, the failure rate $\lambda(t)$ and the distribution density $f(t)$ of two-parametric distribution at the main time interval are quite substantially (by several orders) different from these characteristics as per exponential distribution, though the initial values for $\tilde{t}_н$ moment coincide. This phenomenon stipulates the same consider-

able discrepancy of MTTF predictive values for various distribution laws.

Therefore [5, 8], currently the application of exponential law overstates the mathematical expectation of time to failure (MTTF) of electronic devices by 50…500 and more times as compared to the value of the same characteristics issued from two-parametric models, which describe failure statistics in a more adequate way.

Conclusions

The exponential law of failure-free operation time distribution recently received wide application doesn't reflect real conditions for emergence of electronic devices failures. Its application brings a huge economic damage, first of all, to users of electronic devices who apply them as part of avionics and in other vital cases.

As theoretical and experimental researches show, the two-parametric diffusive distribution laws developed by the Institute of Problems of Mathematical Machines and Systems of the Ukrainian National Academy of Sciences provide the most adequate parameters of reliability for electronics products [5, 8].

References

1. **Strelnikov V.** The Status and Prospects of Reliability Technology – Part 1 // RAC Journal. – 2001, N 1. – P. 1 – 4; Part 2 // RAC Journal. – 2001, No. 2. – P. 8 – 10.

2. **Kofanov Yu.N.** Modelling and ensuring reliability of technical systems: Scientific edition. – Moscow: Energoatomizdat, 2011, – 324 p.

3. **Kofanov Yu.N.** Theoretical bases of designing, technology and reliability of radioelectonics: Higher school textbook. – Moscow: Radio and communications, 1991. – 360 p.

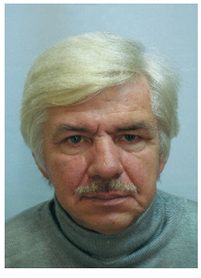
4. **Shor Ya.B.** Statistical methods of analysis and quality and reliability control. – M: Sov. radio, 1962. – 252 p.

5**. Strelnikov V.P., Feduhkin A.V.** Assessment and prediction of electronic components and systems reliability. – K: Logos, 2002. – 486 p.

6. **Romanov V.A.** Quantitative assessment of integrated circuits reliability upon results of forced testing // EKiS. – Kiev: VD MAIS, 2003, No.10. – P. 3-6.

7. Reliability and Quality Report. Fourth Quarter 1996. – Motorola, Inc., 1996.

8. **Gribov V.M., Kofanov Yu.N., Strelnikov V.P.** Assessment and prediction of avionics reliability: Ed. Kofanov Yu.N. – M: NIU VSHE, 2013. – 496 p.



Жаднов В.В., Артюхова М.А.

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ БОРТОВОЙ АППАРАТУРЫ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ НИЗКОЙ ИНТЕНСИВНОСТИ

В статье рассматриваются вопросы прогнозирования показателей надежности современной бортовой аппаратуры космических аппаратов. Показана целесообразность использования результатов испытаний аппаратуры и ее элементов на стойкость к воздействию ионизирующих излучений для прогнозирования показателей надежности. Обоснована возможность применения альфа-распределения времени наработки до отказа для прогнозирования показателей безотказности и долговечности КМОП ИС. Приведены расчетные соотношения для оценки вероятности безотказной работы, среднего времени наработки на отказ и минимальной наработки. Показаны возможные пути повышения стойкости современной бортовой аппаратуры космических аппаратов путем использования специализированных способов защиты от воздействий ионизирующих излучений космического пространства. *Данное научное исследование (№14-05-0038) выполнено при поддержке Программы «Научный фонд НИУ ВШЭ» в 2014 г.*

Ключевые слова: *надежность, стойкость, радиоэлектронное средство, интегральная микросхема, космический аппарат, ионизирующее излучение.*

Практически повсеместное применение в отечественной аппаратуре электронной компонентной базы иностранного производства с одной стороны позволяет проектировать и выпускать аппаратуру, отвечающую современным требованиям, а с другой стороны создает ряд трудностей при ее проектировании, в частности при проектной оценке показателей надежности. Особенно это касается бортовой аппаратуры космических аппаратов, в которой широко применяются полупроводниковые компоненты коммерческого уровня качества, имеющие относительно низкую радиационную стойкость. Поэтому при прогнозировании показателей надежности такой аппаратуры необходимо учитывать и вероятность отказа таких компонентов из-за воздействий ионизирующих излучений космического пространства.

Расчет показателей надежности бортовой аппаратуры космических аппаратов (КА) проводится при ее разработке для подтверждения принципиальной возможности обеспечения требуемого уровня этих показателей и является одним из обязательных мероприятий, предусмотренных в ГОСТ РВ 20.39.302 [1]. Расчет надежности составных частей аппаратуры (электронных модулей 1-го уровня) должен проводиться по методике, приведенной в ОСТ 4Г 0.012.242 [2], основанной на методе «λ-характеристик», в частности вероятность безотказной работы (P_1) определяется по формуле:

$$P_1\left(t_{CAC}\right) = e^{-\Lambda \cdot t_{CAC}},$$

где Λ – эксплуатационная интенсивность отказов; $t_{сас}$ – срок активного существования (САС) КА.

$$\Lambda = \sum_{n=1}^{N} \lambda_n,$$

где λ_n – эксплуатационная интенсивность отказов электрорадиоизделий (ЭРИ); N – количество ЭРИ.

В обеспечение этой методики для расчетов интенсивностей отказов (λ-характеристик) ЭРИ должны использоваться официальные справочники [3, 4], что обеспечивает выполнение требования ГОСТ 27.301 [5] в части воспроизводимости результатов расчетов.

При использовании указанных выше стандартов для учета особенностей бортовой аппаратуры космических аппаратов в математические модели λ_n введены два коэффициента:

$К_э$ – коэффициент эксплуатации, учитывающий степень жесткости условий эксплуатации на борту КА;

$К_{ИИ}$ – коэффициент влияния ионизирующих излучений (ИИ), учитывающий степень жесткости внешних ИИ.

Вместе с тем, в РД 134-0139 [6] вскользь указывается, что если в техническом задании требования по радиационной стойкости не заданы, то для расчета вероятности безотказной работы аппаратуры следует использовать соотношение:

$$P\left(t_{CAC}\right) = P_1\left(t_{CAC}\right) \cdot P_2\left(t_{CAC}\right) \cdot P_3,$$

где $P_2(t_{сас})$ – вероятность безотказной работы при воздействии ИИ КП низкой интенсивности (дозовые эффекты); P_3 – вероятность безотказной работы при проникновении одиночной заряженной частицы с высокой энергией (одиночные эффекты).

Методики расчета P_3 приведены в РД 134-0139 [6] и в данном исследовании рассматриваться не будут.

Расчет $P_2(t_{сас})$ по методикам ОСТ 134-1034 [7] проводится «поэлементным» методом и заключается в сравнении уровня стойкости каждого типа ЭРИ (предельно-допустимой дозы – $D_{ПНД}$), приведенного в нормативно-технической документации (НТД) с уровнем радиационного воздействия на него (поглощенных доз электронов, протонов и суммарной дозы), определенного расчетным путем $D_{НД}(t_{сас})$. Уровень радиационных воздействий на ЭРИ зависит как от характеристик орбиты КА, так и от мест их размещения на борту КА, классификация которых приведена в ГОСТ РВ 20.39.305 [8].

Для КА с длительными САС, эксплуатирующихся на геостационарных орбитах, принято считать, что облучение ЭРИ идет с постоянной интенсивностью, т.е. процесс накопления дозы можно аппроксимировать линейной функцией вида:

$$D_{НД}\left(t\right) = D_{ПД} \cdot t, \qquad (1)$$

где $D_{НД}(t)$ – поглощенная доза ЭРИ; $D_{ПД}$ – мощность поглощенной дозы ЭРИ в единицу времени; t – время.

Результатом оценки является коэффициент запаса ЭРИ по радиационной стойкости ($К_з$). Если $К_з \geq 3$, то $P_2(t_{сас}) = 1$, если $К_з \leq 1$, то $P_2(t_{сас}) = 0$, если же $1 < К_з < 3$, то для оценки значения $P_2(t_{сас})$ необходимо проведение испытаний ЭРИ на стойкость, причем сначала следует провести испытания до расчетного уровня дозы, равного $D_{НД}(t_{сас})$, а затем, желательно, до отказа, что позволит уточнить значение уровня стойкости данного типа ЭРИ.

Из вышеизложенного очевидно, что методика ОСТ 134-1034 [7] ориентирована на применение в аппаратуре КА радиационно-стойких ЭРИ, а применение ЭРИ с $К_з < 3$ и их испытания должны проводиться в исключительных случаях. Однако применение в отечественных КА аппаратуры, в которой широко используется электронная компонентная база (ЭКБ) иностранного производства (ИП), значительную часть которой составляют КМОП ИС «коммерческого» уровня качества с низкой стойкостью к воздействию ИИ КП, уже привело к тому, что испытания таких ИС стали не исключением, а правилом. Причем эти испытания проводятся именно до отказа, т.к. в НТД (Data Sheet) данных по радиационной стойкости не приводится, а если и приводятся, то они крайне скудные [9].

Значение $P_2(t_{сас})$ по результатам испытаний определяется как:

$$P_2\left(t_{CAC}\right) \approx 1 - Q^*$$

где Q^* – частота отказов ИС из-за воздействия ИИ низкой интенсивности.

$$Q = \frac{k\left(D_{НД}\right)}{K}, \qquad (2)$$

где $k(D_{НД})$ – число отказавших ИС, у которых $D_{ПНД} \leq D_{НД}(t_{сас})$; K – общее число ИС, поставленных на испытания.

Принимая во внимание, что на рынке ЭКБ представлен широкий выбор сходных по функциональному назначению и характеристикам КМОП ИС различных производителей, очевидно, что одним из главных критериев при выборе конкретных типов ИС должны быть их показатели надежности и стойкости, что выдвигает еще одну задачу – оценку их показателей надежности при воздействии ИИ низкой интенсивности на ранних этапах проектирования.

Применение для ее решения методик ОСТ 134-1034 [7] естественно возможно, но вряд ли экономически оправдано, т.к. результаты испытаний не всегда дают положительный результат. В тоже время, на ранних этапах проектирования аппаратуры КА, где определяется номенклатура ЭКБ, при выборе типономиналов ИС должна быть уверенность в возможности положительных результатов их сертификационных испытаний.

Одним из возможных путей решения этой задачи является использование результатов уже проведенных испытаний ИС ИП на радиационную стойкость для

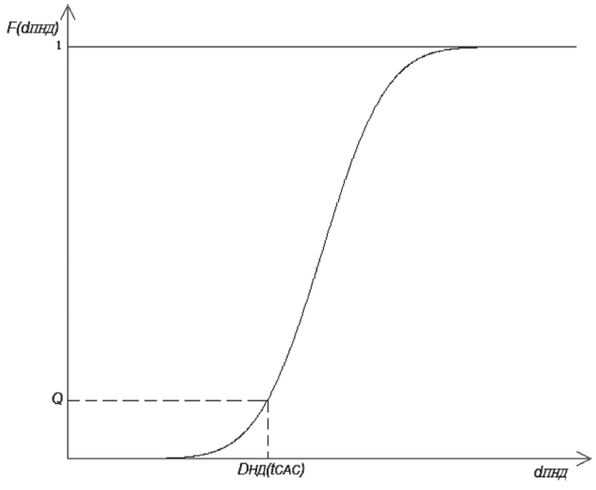


Рис. 1. Функция распределения предельной накопленной дозы

прогнозирования показателей надежности сходных по функциональному назначению и конструктивно-технологическому исполнению КМОП ИС, относящихся к одной технологической группе.

Так, результаты испытаний КМОП ИС ПЗУ с топологической нормой 0,15 мкм производства компаний Xilinx, Texas Instruments, Cypress Semiconductor, Atmel, Analog Devices и др. показали, что для $d_{ПНД}$ можно принять усеченное нормальное распределение:

$$f\left(d_{ПНД}\right)=\frac{C}{\sigma\left(d_{ПНД}\right)\cdot\sqrt{2\cdot\pi}}\cdot e^{-\frac{\left[\frac{d_{ПНД}-m\left(d_{ПНД}\right)}{\sigma\left(d_{ПНД}\right)}\right]^2}{2}}, \qquad (3)$$

где $f(d_{ПНД})$ – плотность вероятности; $m(d_{ПНД})$ – математическое ожидание; $\sigma(d_{ПНД})$ – среднее квадратичное отклонение; C – нормирующий множитель.

Значение C определяется по формуле:

$$C=\frac{1}{F\left(D_{ПНД_{MAX}}\right)-F\left(D_{ПНД_{MIN}}\right)},$$

где $F(D_{ПНДmax})$, $F(D_{ПНДmin})$ – значения функции нормального распределения.

Здесь следует отметить, что использование модели (3) позволяет также рассчитать оценку $P_2(t_{cac})$ ИС при известных $m(d_{ПНД})$, $\sigma(d_{ПНД})$ и $D_{НД}(t_{cac})$:

$$P_2\left(t_{CAC}\right)=1-F\left[D_{НД}\left(t_{CAC}\right)\right]=$$
$$=1-\int_{D_{ПНД_{MIN}}}^{D_{НД}\left(t_{CAC}\right)} f\left(d_{ПНД}\right)d_{ПНД}, \qquad (4)$$

где $F(d_{ПНД})$ – значение функции нормального распределения при $d_{ПНД} = D_{НД}(t_{cac})$.

Типовой вид функции $F(d_{ПНД})$ приведен на рис. 1.

На рис. 2 показана схема формирования функции плотности вероятности $d_{ПНД}$ по результатам испытаний.

Следует отметить, что использование такой схемы формирования функции плотности вероятности $d_{ПНД}$ по результатам испытаний также позволяет уточнить значение $\sigma(d_{ПНД})$ для конкретного типономинала ИС данной технологической группы, если для нее известна $D_{ПНД}$. Как правило, $D_{ПНД}$ представляет собой нижнюю «3σ-границу» (см. рис. 2). Тогда, в предположении постоянства $m(d_{ПНД})$ и коэффициента вариации (ν), значение σ можно получить из уравнения:

$$D^*_{ПНД}=\frac{\sigma\left(d^*_{ПНД}\right)}{\nu}-3\cdot\sigma\left(d^*_{ПНД}\right),$$

где $D^*_{ПНД}$ – предельно-допустимая доза данного типономинала ИС; $\nu=\sigma(d_{ПНД})/m(d_{ПНД})$; $\sigma(d^*_{ПНД})$ – среднее квадратичное отклонение $d^*_{ПНД}$ данного типономинала ИС.

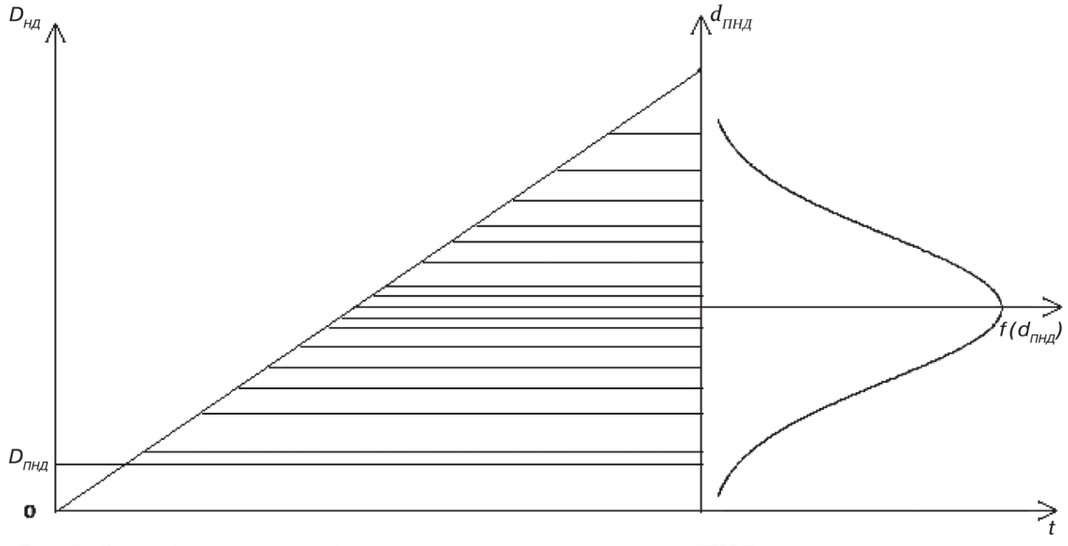


Рис. 2. Схема формирования функции плотности вероятности dПНД по результатам испытаний

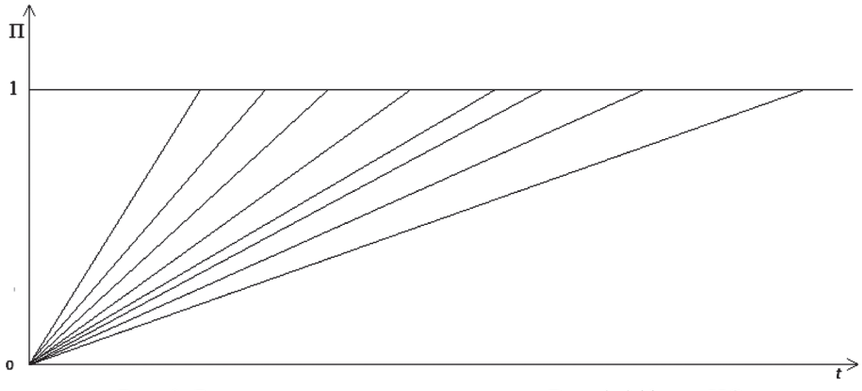


Рис. 3. Реализации процесса изменения $D_{НДк}(t_И)/d_{ПНДк}$ ИС

Рис. 4. Плотность вероятности наработки до отказа ИС

Как видно из рис. 2 испытания проводятся при $D_{ПД}$=const в течении времени $t_И$. Однако, исходя из (1) можно найти такие значения $D_{ПДк}$ для каждой (k-ой) ИС, при которых их отказы будут происходить при одном и том же значении $D_{ПДк}/d_{ПНДк} = 1$:

$$D_{ПД_k} = \frac{d_{ПНД_k}}{t_{O_k}}, \qquad (5)$$

где $d_{ПНДк}$ – предельно-допустимая доза k-ой ИС; t_{Ok} – время до отказа k-ой ИС из-за воздействия ИИ низкой интенсивности.

На рис. 3 показаны полученные с использованием (5) временные зависимости $D_{НДк}(t_И)/d_{ПНДк}$ ИС.

Как видно из рис. 3, процесс изменения $D_{НДк}(t_И)/d_{ПНДк}$ представляет собой случайный процесса «веерного» типа по классификации ГОСТ 27.005 [10]. Исходя из этого и в соответствии с рекомендациями ГОСТ 27.005 [10] в качестве модели отказов следует принять α-распределение вида:

$$f(t) = \frac{C \cdot \beta}{t^2 \cdot \sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{\beta}{t} - \alpha\right)^2}, \qquad (6)$$

где α, β – параметры распределения.

Параметр α – это относительная скорость изменения определяющего параметра (коэффициент однородности скорости изменения определяющего параметра).

Параметр β – это относительный запас долговечности.

График функции плотности вероятности α-распределения показана на рис. 4.

Значения параметров α и β можно определить по соотношениям, приведенным ГОСТ 27.005 [10]:

$$\alpha = \frac{m(V_П)}{\sigma(V_П)}; \ \beta = \frac{П_{Пр} \cdot t_{CAC}}{\sigma(V_П)}$$

где $m(V_{ОП})$ – средняя скорость изменения определяющего параметра; $\sigma(V_{ОП})$ – среднеквадратичное отклонение скорости изменения определяющего параметра; $П_{ОП}$ – предельное значение определяющего параметра.

Значения $m(V_{ОП})$, $\sigma(V_{ОП})$ и $\sigma(V_{ОП})$ можно определить по при известным значениям $m(d_{ПНД})$, $\sigma(d_{ПНД})$ и $D_{НД}(t_{cac})$. Однако, при этом следует учитывать следующие особенности. Дело в том, что в отличие от «классической» схемы формирования модели α-распределения, где предельное значение определяющего параметра $П_{ОП}$ является детерминированной величиной, а скорость его изменения – случайной (см. рис. 2), в данном случае скорость накопления дозы ($D_{НД}$), в соответствии с (1), является детерминированной величиной, а предельно-допустимая накопленная доза ($d_{ПНД}$) – случайной (см. рис. 1). А это приводит к тому, что если в качестве предельного значения определяющего параметра принять $D_{НД}(t_{cac})$ (детерминированную величину), то при ее увеличении $P_2(t_{cac})$ так же будет возрастать, что противоречит здравому смыслу (т.е., чем больше будет доза, накопленная за время t_{cac}, тем меньше будет вероятность отказов ИС за тоже время).

Поэтому, чтобы избежать этого противоречия, следует принять:

$$m(V_{ОП}) = D_{НД} \ \text{ и } \ П_{ОП} = m(d_{ПНД}).$$

Тогда значения параметров α и β будут соответственно равны:

$$\alpha = \frac{D_{НД}}{\sigma(d_{ПНД})}; \ \beta = \frac{m(d_{ПНД}) \cdot t_{CAC}}{\sigma(d_{ПНД})}. \qquad (7)$$

Рис. 5 иллюстрирует адекватность приведенного выше обоснования.

Как видно из рис. 5 вероятности (заштрихованные

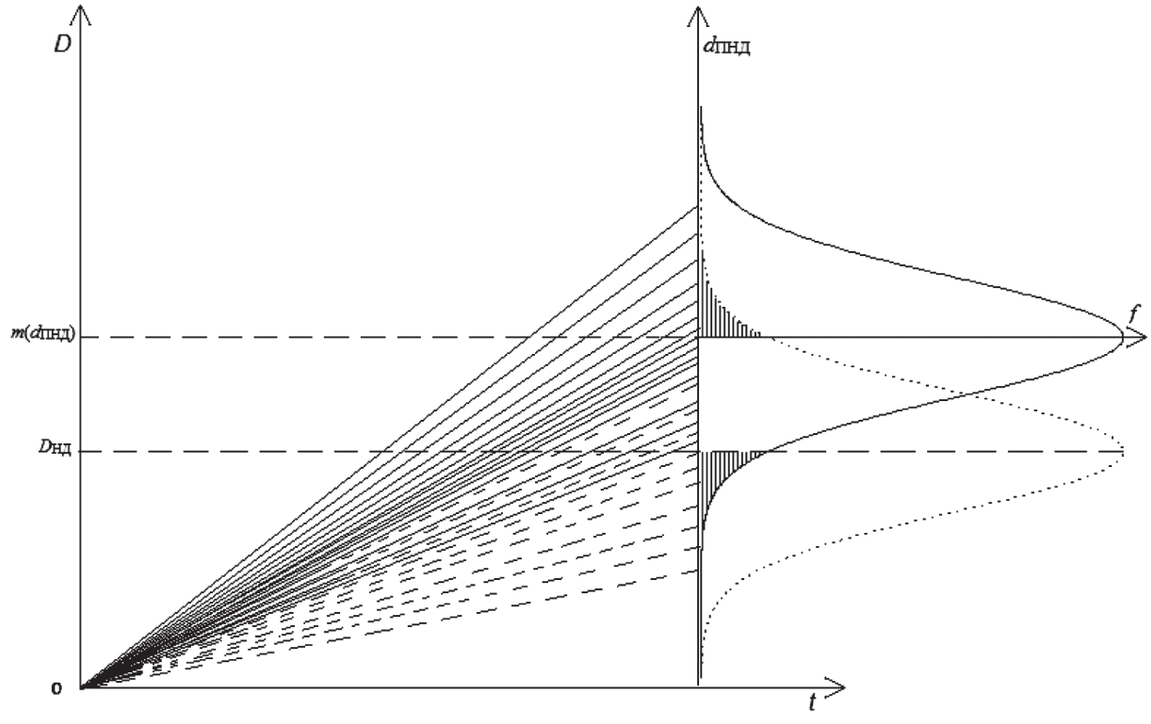


Рис. 5. Плотности вероятности отказов ИС при $m(V_{ОП}) = m(d_{ПНД})$ и $m(V_{ОП}) = D_{НД}$

области) отказа при $П_{ОП} = D_{НД}$ и безотказной работы при $П_{ОП} = m(d_{ПНД})$ равны.

При использовании модели (5) расчет $P_2(t_{сас})$ ИС при известных α, β и С проводится по формуле:

$$P_2\left(t_{CAC}\right) = 1 - \int_0^{t_{CAC}} f\left(t\right)dt.$$

Кроме того, следует отметить, что использование модели отказов (5) позволяет, в отличие от (4), получить оценку не только $P_2(t_{сас})$, но и оценку среднего времени наработки до отказа (T_0) ИС при воздействии ИИ низкой интенсивности:

$$T_0 = \int_0^{\infty} P_2\left(t\right)dt.$$

Еще одним важным аспектом применения модели (5) является возможность оценки такого показателя долговечности ИС, как минимальная наработка ($T_{М.Н}$). Это является особенно важным, так как при оценке этого показателя КМОП ИС в инженерной практике допускаются методическая погрешность, причины которой подробно рассмотрены в [11, 12]. Заметим только, что в соответствии ГОСТ РВ 20.39.303 [13] КМОП ИС относятся к изделиям общего назначения вида I (высоконадежное комплектующее изделие межотраслевого применения), непрерывного длительного применения, невосстанавливаемое, необслуживаемое, переход которого в предельное состояние не ведет к катастрофическим последствиям, изнашиваемое, стареющее при хранении. Критерием предельного состояния таких изделий является максимально-допустимое значение интенсивности отказов ($\lambda_{эmax}$).

При использовании модели (5) значение $T_{М.Н2}$ КМОП ИС при воздействии ИИ низкой интенсивности равно времени эксплуатации (t) аппаратуры КА, при котором плотность распределения $f(t) \approx \lambda(t)$ впервые достигает критического значения $f_{кр}(t = T_{М.Н2}) \approx \lambda_{max}$ [14]. Значение λ_{max} можно определить исходя из требуемого значения $\lambda_{эmax}$ КМОП ИС. На рис. 6 показана связь между значениями λ_{max} и $T_{М.Н2}$.

Тогда значение $T_{М.Н}$ можно найти из уравнения:

$$\lambda_{MAX} = \frac{\beta}{\left(T_{M.H_2}\right)^2 \cdot \sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot e^{-\frac{\left(\frac{\beta}{T_{M.H_2}} - \alpha\right)^2}{2}},$$

разрешив его относительно $T_{М.Н2}$.

Заметим, что точное значение $T_{М.Н2}$ можно получить при $\lambda_{кр}(t = T_{М.Н2}) = \lambda_{max}$, разрешив уравнение (8) относительно $T_{М.Н2}$:

$$\lambda_{MAX} = \lambda_{кр} = \frac{f\left(T_{M.H_2}\right)}{1 - F\left(T_{M.H_2}\right)}, \qquad (8)$$

где $F(T_{М.Н2})$ – значение функции распределения наработки.

Итоговое значение минимальной наработки КМОП ИС получают на основе соотношения ОСТ 4.012.013 [16]:

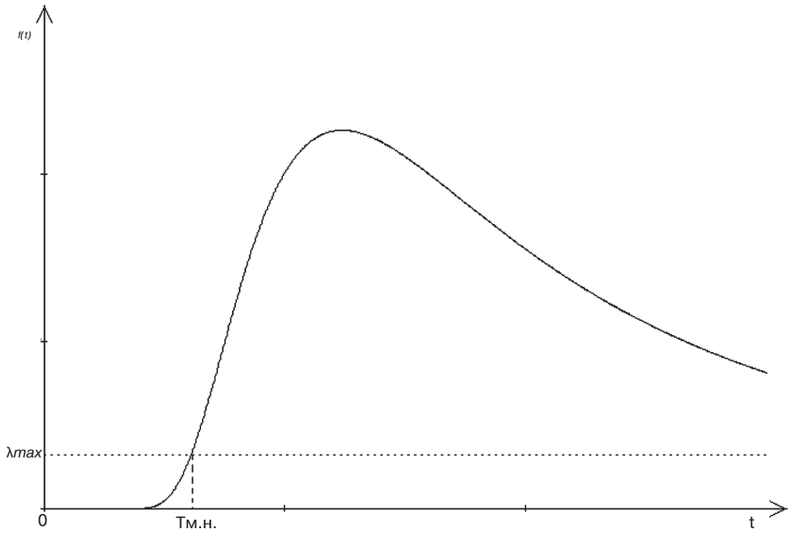


Рис. 6. Связь значений λ_{max} и $T_{М.Н2}$

$$T_{M.H_{ИС}} = \min\left(T_{M.H_1}, T_{M.H_2}\right),$$

где $T_{М.Н1}$ – минимальная наработка КМОП ИС при отсутствии воздействия ИИ низкой интенсивности.

Представленный в настоящем исследовании материал позволяет получить прогнозную оценку показателей надежности и долговечности бортовой аппаратуры космических аппаратов. Однако, значение уровня стойкости и надежности КМОП ИС зависит не только от характеристик закона распределения их предельно-допустимой дозы, но и от величины накопленной дозы. Поэтому, если прогнозная оценка показателей надежности не удовлетворяет требованиям, единственным способом обеспечения требуемых значений показателей надежности и долговечности является снижение величины накопленной дозы. Это может быть достигнуто не только с помощью традиционных средств защиты аппаратуры, как правило, ухудшающих ее массогабаритные характеристики, но и путем применения специализированных способов (например, использования специальных печатных плат [16]), а также рациональным размещением радиационно-стойких ЭРИ на печатных узлах (ПУ) и компоновкой этих ПУ в блоках [17, 18].

Литература

1. ГОСТ РВ 20.39.302-98 КСОТТ. Требования к программам обеспечения надёжности и стойкости к воздействию ионизирующих и электромагнитных излучений.

2. ОСТ 4Г 0.012.242-84 Аппаратура радиоэлектронная. Методика расчета показателей надежности.

3. Справочник «Надежность ЭРИ».

4. Справочник «Надежность ЭРИ ИП».

5. ГОСТ 27.301-95 Расчет надежности. Основные положения.

6. РД 134-0139-2005 Методы испытаний и оценки стойкости РЭА КА к воздействию ЗЧ КП по одиночным сбоям и отказам.

7. ГОСТ 134-1034-2012 Методы испытаний и оценки стойкости бортовой радиоэлектронной аппаратуры космических аппаратов к воздействию электронного и протонного излучений космического пространства по дозовым эффектам.

8. ГОСТ РВ 20.39.305-98 КСОТТ. Аппаратура, приборы, устройства и оборудование военного назначения. Требования стойкости к воздействию поражающих факторов ядерного взрыва, ионизирующих излучений ядерных установок и космического пространства.

9. **Артюхова М.А.** Проблемы обеспечения стойкости бортовой радиоэлектронной аппаратуры космических аппаратов на этапах проектирования. / М.А. Артюхова, В.В. Жаднов, С.Н. Полесский. // Компоненты и технологии. – 2010. – № 9. – с. 93-98.

10. ГОСТ 27.005-97 Надежность в технике. Модели отказов. Основные положения.

11. **Жаднов В.В.** Расчетная оценка показателей долговечности электронных средств космических аппаратов и систем. / В.В. Жаднов. // Надежность и качество сложных систем. – 2013. – № 2. – с. 65-73.

12. **Жаднов В.В.** Повышение точности расчётной оценки показателей долговечности бортовой космической аппаратуры. / В.В. Жаднов. // Радиовысотометрия-2013: Сборник трудов Четвертой Всероссийской научно-технической конференции. / Под ред. А.А. Иофина, Л.И. Пономарева. – Екатеринбург: Форт Диалог-Исеть, 2013. – с. 164-169.

13. ГОСТ РВ 20.39.303-98 КСОТТ. Требования к надежности. Состав и порядок задания.

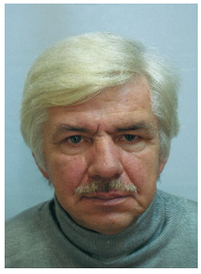
14. **Дружинин Г.В.** Надежность автоматизированных систем. Изд. 3-е, перераб. и доп. / Г.В. Дружинин. – М.: Энергия, 1977. – 536 с.

15. ОСТ 4.012.013-84. Аппаратура радиоэлектронная. Определение показателей долговечности.

Двусторонняя печатная плата. Жаднов В.В. Патент на полезную модель RU 135219 27.11.2013.

16. **Артюхова М.** Оценка стойкости ИС для бортовой космической аппаратуры. / М. Артюхова, В. Жаднов, С. Полесский. – Электронные компоненты. – 2013. – № 1. – с. 72-76.

17. **Жаднов В.В.** Особенности конструирования бортовой космической аппаратуры: учеб. пособие. / В.В. Жаднов, Н.К. Юрков. – Пенза: Изд-во ПГУ, 2012. – 112 с.



Zhadnov V.V., Artyukhova M.A.

FORECASTING DEPENDABILITY INDICATORS OF SPACECRAFT ONBOARD EQUIPMENT UNDER LOW-INTENSITY IONIZING RADIATION

The article deals with forecasting the dependability indicators of state-of-the-art spacecraft onboard equipment. The authors demonstrate the applicability of the results of equipment and components testing for resistance to ionizing radiation in forecasting dependability indicators. They prove the applicability of Alfa distribution of time to failure in forecasting CMOS IC reliability and longevity. The paper presents design ratios for probability evaluation of fail-safe operation, mean time to failure and minimum operation time. Ways are shown to improve the resistance of state-of-the-art spacecraft onboard equipment through the use of specialized means of protection against the effects of ionizing radiation of the outer space. This research (No. 14-05-0038) was conducted with the support of the Higher School of Economics Academic Fund Program in 2014.

Keywords: *dependability, resistance, electronic devices, integrated circuit, spacecraft, ionizing radiation.*

The widespread application of foreign electronic components in Russian-made equipment, on the one hand, allows designing and manufacturing state-of-the-art hardware, and, on the other hand, creates a number of difficulties in the design process, namely the engineering estimate of dependability indicators. That is especially relevant when it comes to spacecraft onboard equipment that widely uses commercial semiconductor components with relatively low radiation hardness. Therefore, forecasting the dependability indicators of such equipment requires taking into consideration the probability of their failure due to ionizing radiation of the outer space.

Dependability indicators of spacecraft onboard equipment are calculated during the design stage in order to confirm the feasibility of ensuring the required parameters and is a mandatory activity as per GOST RV 20.39.302 [1]. Equipment components dependability calculation (first level electronic units) shall be performed according to the method given in OST 4G 0.012.242 [2] and based on the method of "λ-characteristics". In particular, the fail-safe operation probability (P_1) is determined from the following formula:

$$P_1\left(t_{CAC}\right) = e^{-\Lambda \cdot t_{CAC}},$$

where: Λ is the operational failure rate; t_{al} is the active life (AL) of the spacecraft.где:

$$\Lambda = \sum_{n=1}^{N} \lambda_n,$$

where: λ_n is the operational failure rate of electronic components (ECs); N is the number of the ECs.

In order to support the application of this method for the purpose of ECs failure rate cal-

culation (λ-characteristics), official guidelines [3, 4] must be used, which ensures compliance with GOST 27.301 [5] in terms repeatability of results.

In order to take into consideration the special features of spacecraft onboard equipment, the above standards introduces two coefficients in the mathematical models λ_n:

C_o, coefficient of operation that takes into consideration the severity of the operational environment onboard the spacecraft;

C_{IR}, coefficient of ionizing radiation (IR) effect allowing for the severity of external IR.

At the same time, RD 134-0139 [6] briefly mentions that if the technical specification does not set forth any radiation hardness requirements, the probability of fault-free operation of equipment must be calculated using the following formula:

$$P\left(t_{CAC}\right) = P_1\left(t_{CAC}\right) \cdot P_2\left(t_{CAC}\right) \cdot P_3,$$

$P_2(t_{al})$ is the probability of fault-free operation under low-intensity IR OS (dose effect); P_3 is the probability of fault-free operation in case of penetration of a single high-energy charged particle (single effect).

The P_3 calculation methods are given in RD 134-0139 [6] and will not be considered in this paper.

Calculation of $P_2(t_{al})$ based on the methods set forth in OST 134-1034 [7] is performed element by element and consists in comparing the resistance of each type of ECs (maximum permissible dose, D_{MPD}) specified in standard technical documentation (STD) with the level of radiation exposure (absorbed dose of electrons, protons and the total dose) defined by means of calculation $D_{ND}(t_{al})$. The level of EC radiation exposure depends both of the SC orbit characteristics and their location within the SC of which the classification is given in GOST RV 20.39.305 [8].

In case of SC with long active life operating on geostationary orbit it is commonly believed that the intensity of EC radiation exposure is constant, i.e. dose build-up can be approximated with a line function as follows:

$$D_{НД}\left(t\right) = D_{ПД} \cdot t, \qquad (1)$$

where: $D_{ND}(t)$ is the dose absorbed by EC; D_{PD} is the rate of the dose absorbed per unit time; t is time.

The result of evaluation is the EC radiation hardness safety margin (M_s). If $M_s \geq 3$, then $P_2(t_{al}) = 1$, if $Ms \leq 1$, then $P_2(t_{al}) = 0$, if $1 < Ms < 3$, then the evaluation of $P_2(t_{al})$ requires resistance testing of EC. First, test must be performed to dose design value that equals to $D_{ND}(t_{al})$, then, preferably, to failure, which would help specify the value of resistance of the particular type of EC.

The above clearly shows that the OST 134-1034 [7] method implies the use of radiation-resistant EC in SC, while the use of ECs with $M_s < 3$ and their testing shall be performed in exceptional cases. However, the use in Russian SC of equipment that contains foreign electronic components, mostly commercial CMOS IC with low IR OS resistance, has already caused the situation when IC testing is rather a rule that an exception. The tests are performed to failure, as data sheets do not specify radiation resistance, and if they do, the information is extremely scarce [9].

On completion of testing, the value of $P_2(t_{al})$ is identified as follows:

$$P_2\left(t_{CAC}\right) \approx 1 - Q^*$$

Q* is the IC failure rate due to low-intensity IR exposure.

$$Q = \frac{k\left(D_{НД}\right)}{K}, \qquad (2)$$

where: $k(D_{ND})$ is the number of failed ICs that have $D_{MPD} \leq D_{ND}(t_{al})$; K is the total number of ICs submitted to testing.

Taking into consideration the fact that the electronic components market provides a wide selection of CMOS ICs by various manufacturers that are similar in terms of function and performance, it is obvious that one of the key criteria of specific IC selection must be their dependability and resistance, which imposes one more task: evaluation of the dependability in low-intensity IR environment at early design stages.

The application of OST 134-1034 [7] methods is possible, but hardly economically viable, as tests do not always yield positive results. At the same time, at early stages of SC equipment design when the list of used electronic components is defined and the IC part types are chosen, the positive outcome of their certification testing must be assured.

One of the possible ways of solving this task is using the results of previously conducted radiation resistance tests of foreign ICs in order to forecast the dependability indicators of CMOS ICs similar in functionality and design.

Thus, the test results of CMOS IC of a 0.15 MCM nonvolatile storage device manufactured by Xilinx, Texas Instruments, Cypress Semiconductor, Atmel, Analog Devices, etc. have shown that for d_{MPD} a truncated Gaussian distribution can be accepted:

$$f\left(d_{ПНД}\right) = \frac{C}{\sigma\left(d_{ПНД}\right) \cdot \sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot e^{-\frac{\left[\frac{d_{ПНД} - m\left(d_{ПНД}\right)}{\sigma\left(d_{ПНД}\right)}\right]^2}{2}}, \qquad (3)$$

where: $f(d_{MPD})$ is the probability density; $m(d_{MPD})$ is the mathematical expectation; $\sigma(d_{MPD})$ is the mean square deviation; C is the normalizing factor.

C is determined from the formula:

$$C = \frac{1}{F\left(D_{ПНД_{MAX}}\right) - F\left(D_{ПНД_{MIN}}\right)},$$

where: $F(D_{MPDmax})$, $F(D_{MPDmin})$ are Gaussian distribution functions.

It should be noted that model (3) also allows calculating $P_2(t_{al})$ IC if $m(d_{MPD})$, $\sigma(d_{MPD})$ and $D_{ND}(t_{al})$ are known:

$$P_2(t_{CAC}) = 1 - F\left[D_{НД}(t_{CAC})\right] = \\ = 1 - \int_{D_{ПНД_{MIN}}}^{D_{НД}(t_{CAC})} f(d_{ПНД})\,d_{ПНД}, \quad (4)$$

where: $F(d_{MPD})$ is the Gaussian distribution value if $d_{MPD} = D_{DPU}(t_{al})$.

The generic formula for function $F(d_{MPD})$ is given in Fig. 1.

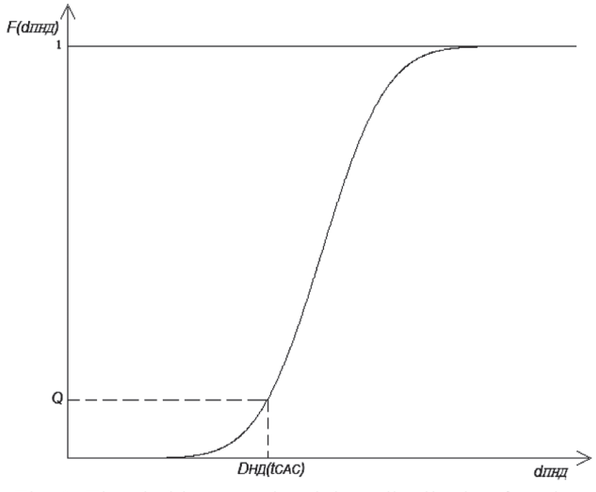


Fig. 1. Threshold accumulated dose distribution function

Fig. 2 shows the probability density function generation procedure d_{MPD} according to test results.

It should be noted this probability density function generation procedure d_{MPD} according to test results also allows specifying value $\sigma(d_{MPD})$ or the IC part type of the given technology group if its D_{MPD} is known. Normally, D_{MPD} represents the bottom "3σ boundary" (see fig. 2). Then on the assumption of constant $m(d_{MPD})$ and coefficient of variation (ν), the value of σ can be deducted from the equation:

$$D^*_{ПНД} = \frac{\sigma(d^*_{ПНД})}{\nu} - 3\cdot\sigma(d^*_{ПНД}),$$

where: D^*_{MPD} is the maximum allowable dose for this IC part type; $\nu = \sigma(d_{MPD})/m(d_{MPD})$; $\sigma(d^*_{MPD})$ is the mean square deviation d^*_{MPD} of this IC part type.

As shown in fig. 2, tests are conducted under condition of D_{PD}=const over time t_I. Nevertheless, based on (1) we can find such values of D_{PDk} for each (k^{th}) IC that each of their failure happen at the same value of $D_{PDk}/d_{MPDk} = 1$:

$$D_{ПД_k} = \frac{d_{ПНД_k}}{t_{O_k}}, \quad (5)$$

where: d_{MPDk} is the maximum allowed dose of the k^{th} IC; t_{Fk} is the time to failure of the k^{th} IC due to low-intensity IR exposure.

Fig. 3 shows IC time dependences $D_{DPUk}(t_I)/d_{MPDk}$ obtained using (5).

As shown in fig. 3, the change process $D_{DPUk}(t_I)/d_{MPDk}$ is a "fan type" stochastic process as per GOST 27.005 [10]. Given the above and in accordance with the recommendations of GOST 27.005 [10], the failure model shall be an α-distribution as follows:

$$f(t) = \frac{C\cdot\beta}{t^2\cdot\sqrt{2\cdot\pi}}\cdot e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{\beta}{t}-\alpha\right)^2}, \quad (6)$$

where α, β are distribution parameters.

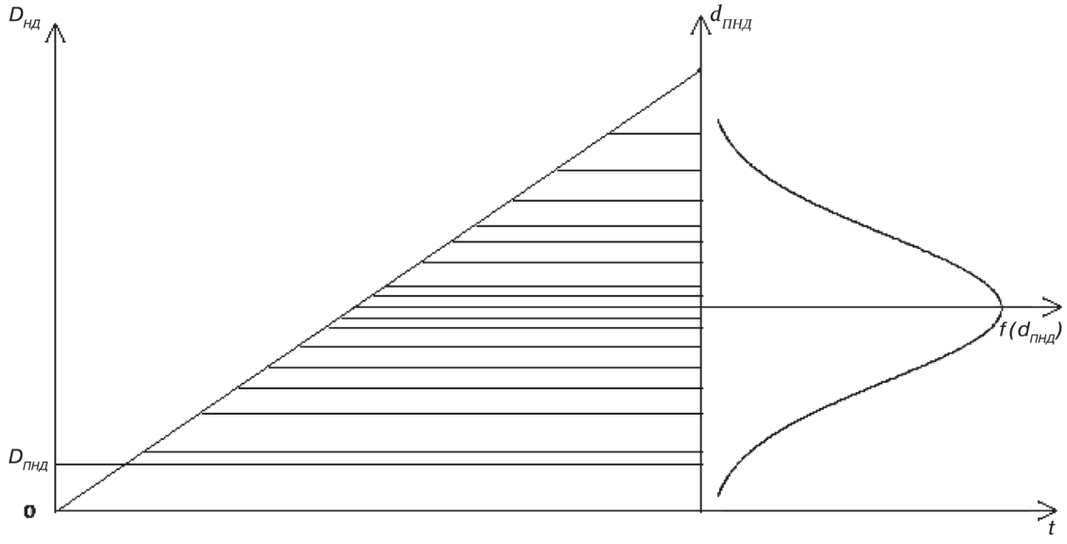


Fig. 2. Probability density function generation procedure dMPD according to test results

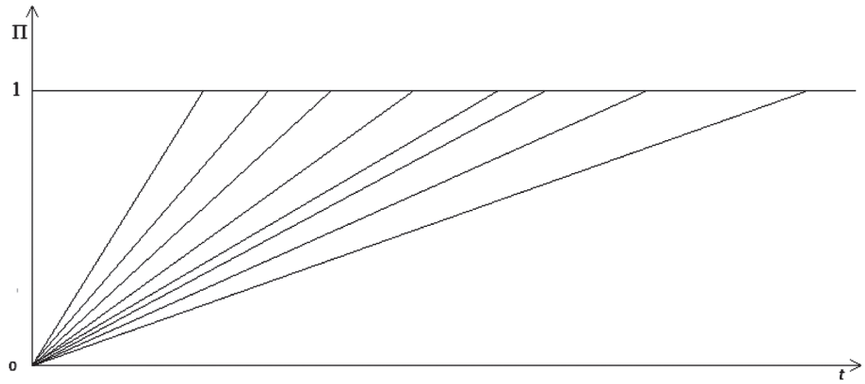


Fig. 3. Implementation of the change process $D_{DPUk}(t_I)/d_{MPDk}$ IC

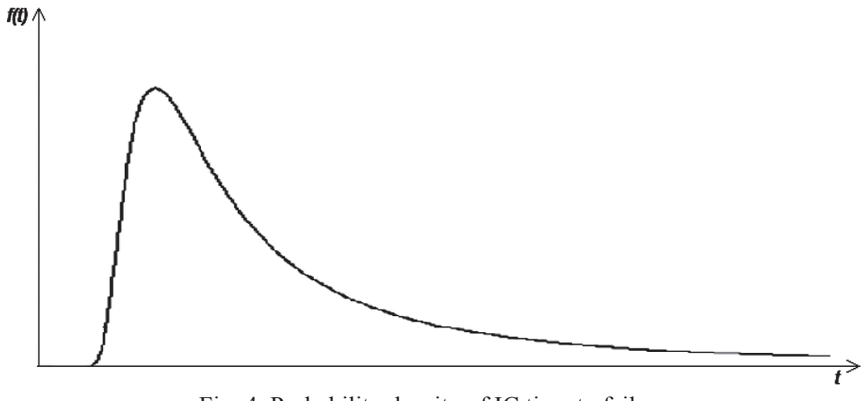


Fig. 4. Probability density of IC time to failure

Parameter α is the relative rate of change of the governing parameter (coefficient of uniformity of the rate of change of the governing parameter).

Parameter β is the relative margin of longevity.

The graph of the probability-density function of α-distribution is shown in Fig. 4.

The values of α and β parameters can be identified using the correlations given in GOST 27.005 [10]:

$$\alpha = \frac{m(V_{\Pi})}{\sigma(V_{\Pi})};\ \beta = \frac{\Pi_{\Pi p} \cdot t_{CAC}}{\sigma(V_{\Pi})}$$

where $m(V_{GP})$ is the average rate of change of the governing parameter; $\sigma(V_{GP})$ is the mean square deviation of the rate of change of the governing parameter; P_{GP} is the limit value of the governing parameter.

The values of $m(V_{GP})$, $\sigma(V_{GP})$ and $\sigma(V_{GP})$ can be identified using the known values of $m(d_{MPD})$, $\sigma(d_{MPD})$ and $D_{DPU}(t_{al})$. However, the following aspects should be taken in consideration. Unlike in the case of the "classic" α-distribution model generation procedure where the limit value of the governing parameter P_{GP} is deterministic, while its rate of change is stochastic (see fig. 2), in this case the dose build-up rate (D_{DPU}) according to (1) is a deterministic value, while the maximum allowed accumulated dose (d_{MPD}) is

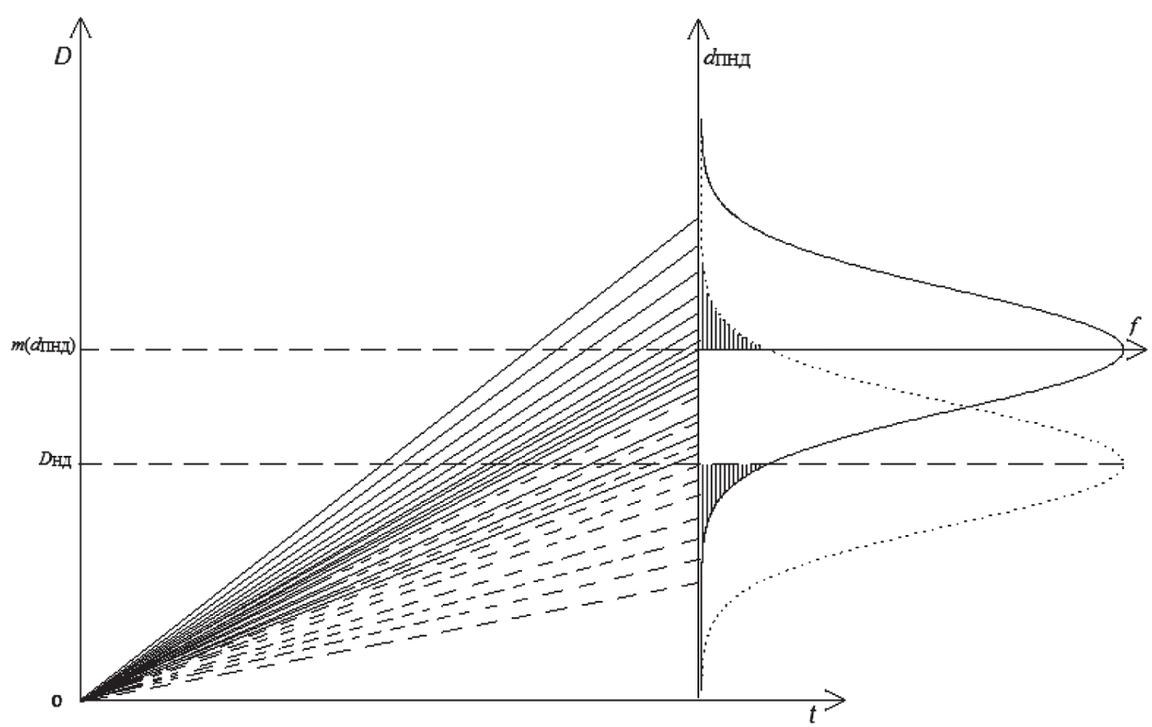


Fig. 5. IC failure probability densities if $m(V_{GP}) = m(d_{MPD})$ and $m(V_{GP}) = D_{DPU}$

stochastic (see fig. 1). That leads to the situation where if the limit value of the governing parameter is taken as $D_{DPU}(t_{al})$ (deterministic value) then if it increases $P_2(t_{al})$ will rise as well, which goes against the common sense (i.e. the higher the dose accumulated over time t_{al} the less is the probability of IC failure during that time).

Therefore, in order to avoid this contradiction we shall accept that:

$m(V_{ОП}) = $ ДИД and $П_{ОП} = m(d_{ПНД})$.

Then the values of parameters α and β will respectively be:

$$\alpha = \frac{D_{НД}}{\sigma\left(d_{ПНД}\right)};\ \beta = \frac{m\left(d_{ПНД}\right)\cdot t_{CAC}}{\sigma\left(d_{ПНД}\right)}. \qquad (7)$$

Fig. 5 shows the sufficiency of the justification given above.

As shown in Fig. 5 the probabilities (dashed areas) of failure if $P_{GP} = D_{DPU}$ and fault-free operation if $P_{GP} = m(d_{MPD})$ are equal.

When using model (5), the calculation of $K_2(t_{al})$ of IC if α, β and C are known is performed using formula:

$$P_2\left(t_{CAC}\right) = 1 - \int_0^{t_{CAC}} f\left(t\right)dt$$

It should also be noted that using failure model (5) unlike model (4) allows evaluating not only $R_2(t_{al})$, but also the mean time to failure (T_0) of IC exposed to low-intensity IR:

$$T_0 = \int_0^{\infty} P_2\left(t\right)dt.$$

Another significant aspect of model (5) is its capability to evaluate such IC longevity indicator as the minimum operation time (T_{MT}). That is especially important as in the practice of engineering the evaluation of this indicator of CMOS IC is affected by systematic errors due to the reasons that are considered in depth in [11, 12]. Please note that according to GOST RV 20.39.303 [13] CMOS IC are classified as general purpose products of the first type (highly dependable general use components) for continuous long term application, non-recoverable, maintenance-free, the transition of which into the limit state does not entail catastrophic consequences, wear-prone and ageing in storage. The limit state criterion of such products is the maximum allowable failure rate (λ_{emax}).

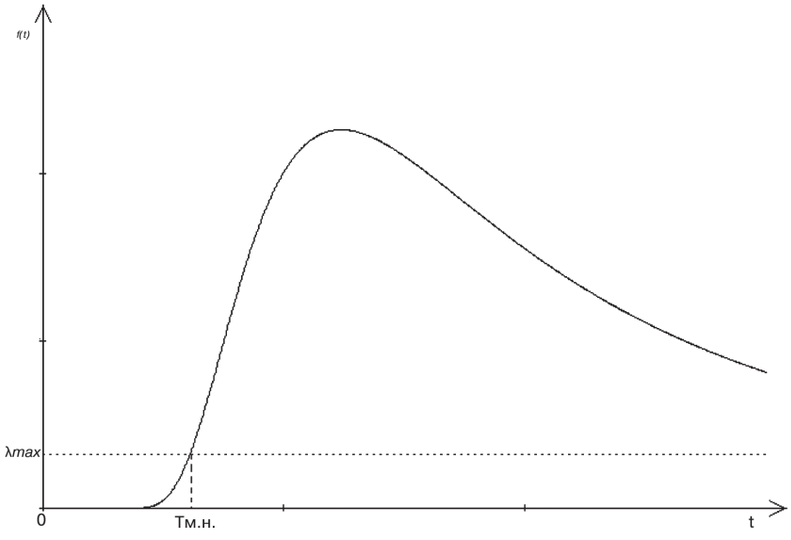


Fig. 6. Connection between values λ_{max} and T_{MN2}

When using model (5) the value of T_{MT2} of CMOS IC exposed to low-intensity IR equals to operation time (t) of SC equipment whereby distribution density $f(t) \approx \lambda(t)$ first reaches critical value $f_{cr}(t = T_{MT2}) \approx \lambda_{max}$ [14]. Value λ_{max} can be identified based on the required value of λ_{emax} of CMOS IC. Fig. 6 shows the connection between the values λ_{max} and T_{MT2}.

Then value T_{MT} can be found using the following equation:

$$\lambda_{MAX} = \frac{\beta}{\left(T_{M.H_2}\right)^2\cdot\sqrt{2\cdot\pi}}\cdot e^{-\frac{\left(\frac{\beta}{T_{M.H_2}}-\alpha\right)^2}{2}},$$

solving this for T_{MT2}.

Please note that the precise value of T_{MT2} can be found if $\lambda_{cr}(t = T_{MT2}) = \lambda_{max}$, solving equation (8) for T_{MT2}:

$$\lambda_{MAX} = \lambda_{кр} = \frac{f\left(T_{M.H_2}\right)}{1 - F\left(T_{M.H_2}\right)}, \qquad (8)$$

where: $F(T_{MT2})$ is the value of operation time distribution function.

The final value of minimal operation time of CMOS IC is deducted based on correlation given in OST 4.012.013 [16]:

$$T_{M.H_{ИС}} = \min\left(T_{M.H_1}, T_{M.H_2}\right),$$

where: T_{MT1} is the minimal operation time of CMOS IC not subject to the effects of low-intensity IR.

The information presented in this paper allows forecasting dependability and longevity indicators of spacecraft onboard equipment. At the same time, CMOS IC resistance and dependability depend not only on the characteristics of their maximum allowable dose distribution law, but also the accumulated dose. Therefore, if the prognostic evaluation of the dependability indicators does not comply with the requirements, the only way to ensure the required dependability and longevity indicators is the reduction of the

accumulated dose. That can be achieved not only through conventional means of equipment protection that usually affects its weight and size characteristics, but also through special means (e.g. by using special printed boards [16]), as well as through rational placement of radiation-resistant ECs on printed board assemblies and their arrangement in equipment units [17, 18].

References

1. GOST RV 20.39.302-98 KSOTT. Requirements for dependability and ionizing and electromagnetic radiation resistance programs.

2. OST 4G 0.012.242-84 Electronic equipment. Dependability indicators calculation method.

3. Nadiozhnost ERI Reference book.

4. Nadiozhnost ERI IP Reference book.

5. GOST 27.301-95 Dependability calculation. General provisions.

6. RD 134-0139-2005 Methods of single errors and failures testing and evaluation of SC EE residence to CSP.

7. OST 134-1034-2012 Methods of dose effect testing and evaluation of spacecraft onboard electronic equipment resistance to space electron and proton radiation.

8. GOST RV 20.39.305-98 KSOTT. Military equipment, instruments and devices. Requirements to the resistance to the effects of nuclear explosions, ionizing radiation of nuclear installations and open space.

9. **Artyukhova M.A.** Challenges of ensuring the durability of spacecraft onboard electronic equipment at the stage of design. Artyukhova M.A., Zhadnov, V.V., Polessky S.N. Komponenky i tekhnologii. – 2010. – Issue 9. – p. 93 – 98.

10. GOST 27.005-97 Technology dependability. Failure models. General provisions.

11. **Zhadnov V.V.** Evaluation of longevity indicators of spacecraft electronic systems. Zhadnov, V.V. Nadiozhnost i kachestvo slozhnikh sistem. – 2013. – Issue 2. – p. 65 – 73.

12. **Zhadnov V.V.** Increasing the accuracy of longevity indicators evaluation of spacecraft electronic systems. Zhadnov V.V. Radiovysotometria-2013: Proceedings of the Fourth National Science and Engineering Conference. Edited by Iofin A.A., Ponomariov L.I. – Yekaterinburg: Fort Dialog-Iset, 2013. – p. 164 – 169.

13. GOST RV 20.39.303-98 KSOTT. Dependability requirements. Composition and definition procedure.

14. **Druzhinin G.V.** Dependability of automated systems. – 3rd edition, revised and enlarged. Druzhinin G.V. Moscow: Energia, 1977. – 536 c.

15. OST 4.012.013-84. Electronic equipment. Definition of longevity indicators.

16. Double-sided printed-circuit board. Zhadnov, V.V. Utility model patent RU 135219 27.11.2013.

17. **Artyukhova M.** Onboard spacecraft IC durability evaluation. Artyukhova M., Zhadnov V., Polessky S. – Electronnie komponenty. – 2013. – Issue 1. – p. 72 – 76.

18. **Zhadnov V.V.** Design features of spacecraft onboard equipment: study guide. Zhadnov V.V., Yurkov N.K. Penza. Penza State University publishing house, 2012. – 112 p.

Володарский В. А., Орленко А.И.

О НАДЕЖНОСТИ ПОДВИЖНОГО СОСТАВА, ПРОШЕДШЕГО РЕМОНТ

Предложены выражения для определения средней интенсивности отказов ремонтируемого подвижного состава. Изложены результаты исследований зависимости интенсивности отказов от глубины восстановления ресурса, числа и периодичности ремонтов до замены подвижного состава.

Ключевые слова: *интенсивность отказов, ресурс, глубина восстановления, ремонт, замена, периодичность.*

1. Состояние вопроса

В процессе эксплуатации подвижного состава (ПС) с целью обеспечения его надежности проводится техническое обслуживание, текущие и капитальные ремонты. Известно, что при ремонте ПС обычно возвращается лишь часть исходных надежностных свойств.

При эксплуатации ПС неизбежны его отказы по различным причинам, которые можно классифицировать в зависимости от сложности их устранения. Важное технико-экономическое значение при этом имеет выбор места и метода устранения отказа. По этим признакам целесообразно все отказы разделить на две группы: отказы работоспособности и ресурсные отказы. Для устранения отказов первой группы не требуются трудоемкие работы, а работоспособность ПС восстанавливают заменой, ремонтом или регулировкой неисправных элементов в объеме технического обслуживания (ТО) или текущего ремонта (ТР). При этом остаточный ресурс ПС остается прежним. Преимущество этого способа – возможность полного использования ресурса большинства элементов ПС.

Под ресурсным отказом будем понимать такое событие, которое характеризуется либо физическим выходом ПС из строя как целого, либо такими отказами его элементов, при которых целесообразно восстановление до определенного уровня ресурса всего ПС. Для устранения таких отказов необходимо выполнить трудоемкие разборные, ремонтные, сборные, регулировочные, обкаточные и другие работы. Такой способ устранения отказа более сложен, и для его проведения требуются специальные производственные условия ремонта. Преимущество этого способа: восстановление установленного нормативно-технической документацией ресурса и повышение, таким образом, надежности ПС. Ресурсные отказы устраняются проведением капитального ремонта (КР) или неплановой заменой. В первом случае происходит частичное, а во втором случае – полное восстановление ресурса ПС.

Все ремонтно-обслуживающие воздействия в процессе эксплуатации ПС можно классифицировать по трем признакам: по моменту проведения работы – плановая или неплановая; по характеру работы – предупредительная или аварийная; по глубине восстановления ресурса – никакого обновления не производится (выполняется ТО или ТР),

частичное восстановление (выполняется КР) и полное восстановление (выполняется замена).

Из-за процессов старения и износа интенсивность постепенных отказов ПС со временем эксплуатации возрастает. Для описания постепенных отказов в теории надежности используются распределения с возрастающей функцией интенсивности, например, Вейбулла с параметром формы более единицы. Предупредительные ремонты предотвращают рост интенсивности отказов, обеспечивая необходимый уровень надежности ПС. Поэтому для оценки надежности ПС, прошедшего ремонт, целесообразно использовать наиболее наглядный показатель – интенсивность отказов.

Цель статьи – предложить выражения для определения средней интенсивности отказов, учитывающие глубину восстановления ресурса ремонтируемого ПС, и провести исследования зависимостей интенсивности отказов от глубины восстановления ресурса, от числа и периодичности ремонтов до замены подвижного состава.

2. Учет глубины восстановления ресурса

Для учета глубины восстановления ресурса при предупредительном и аварийном ремонте ПС предлагается использовать согласно [1] параметр а – как «возраст» ПС после проведения капитального ремонта. Изменение интенсивности ресурсных отказов при проведении капитальных ремонтов и замены ПС представлено на рисунке 1, где

$T_{др}$, $T_{мр}$ и $T_р$ – соответственно доремонтный, межремонтный и полный ресурс ПС. Полным обновлением назовем такое, при котором ПС как бы «возвращается» в состояние, которое он имел в момент начала эксплуатации (см. точка 0 на рис. 1), когда интенсивность ресурсных отказов равна нулю. Это соответствует тому, что проведена предупредительная замена. При проведении ремонта параметр а предлагается оценивать как $a = T_{др} - T_{мр}$ (см. рис. 1). В дальнейшем при разработке математических моделей оптимизации предупредительных ремонтов для оценки глубины восстановления ресурса целесообразно использовать безразмерный параметр

$\alpha = a/T_{ДР}$. Если $\alpha = 0$, то это означает, что проведена замена ПС. Если проводится КР, например, через время τ то «возраст» ПС уменьшается от τ до $\alpha\tau$.

3. Интенсивность отказов ПС, прошедшего ремонт

Так как распределение наработки на отказ при постепенных отказах не подчиняется экспоненциальному закону, представляется целесообразным использовать среднюю интенсивность отказов (ИО) за некоторое заданное время, например, за межремонтный период или период до замены. Если принять полученное среднее значение ИО практически постоянным, то можно использовать допущение об экспоненциальном распределении наработки на отказ ремонтируемых устройств.

В [2] рассмотрен случай проведения идеального ремонта, при котором происходит полное восстановление первоначальной надежности, которое возможно только при замене устройства на новое. При проведении предупредительной замены (ПЗ) с периодичностью τ интенсивность отказов $\lambda(t)$, связанная с износом и старением, снижается до нуля (см. рисунок 2.). При этом изменяется распределение наработки на отказ, поскольку кривая зависимости ИО от времени эксплуатации заменяется на пилообразную кривую с размахом от нуля до $\lambda(\tau)$, а затем снова до нуля. Среднее значение интенсивности отказов $\overline{\lambda}$ (см. пунктирная линия на рис. 2) при проведении ПЗ определяется из выражения [2]

$$\overline{\lambda} = \tau^{-1}\int_0^{\tau}\lambda(t)\,dt = -\ln P(\tau)\tau^{-1}, \qquad (1)$$

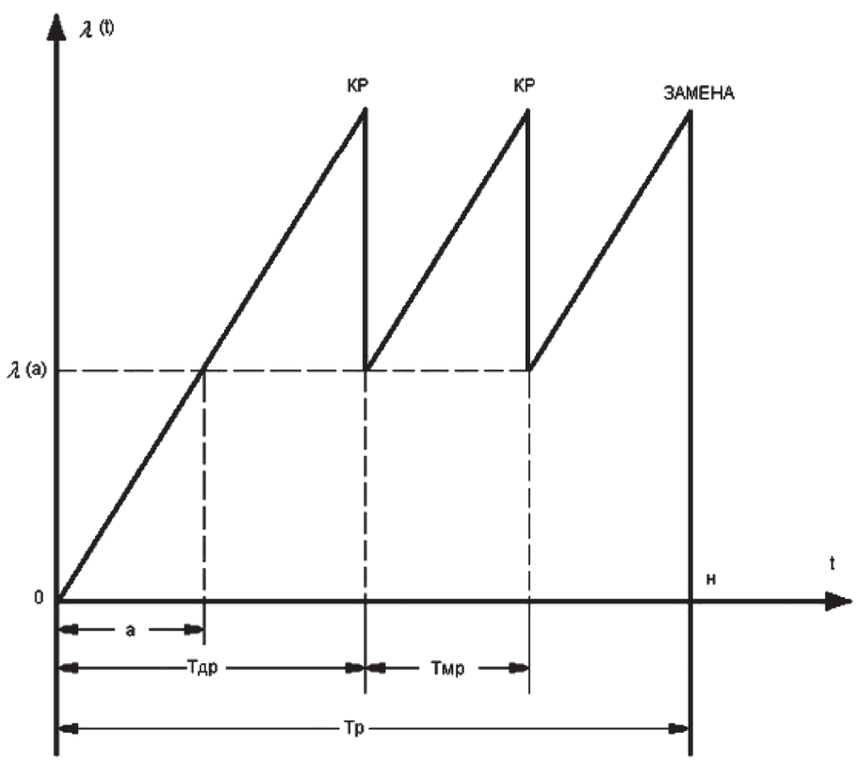


Рис. 1. Изменение интенсивности ресурсных отказов при проведении капитальных ремонтов

где $P(\tau)$ – вероятность безотказной работы при наработке τ.

На практике, как правило, устройства не заменяются, а ремонтируются. При этом не происходит полного восстановления надежности. Для учета глубины восстановления ресурса предлагается использовать параметр $a > 0$, означающий "возраст" ПС после проведения ремонта [1]. При этом значение параметра a определяется объёмом работ по замене или восстановлению составных частей ПС при проведении ремонта.

В общем случае для восстановления ресурса после проведения n предупредительных ремонтов (ПР) осуществляется замена этого ПС новым. Характер изменения интенсивности отказов представлен на рисунке 3. После проведения ПР с периодичностью τ ИО снижается до значения $\lambda(a)$, а после проведения ПЗ с периодичностью τ_p – до нуля. ИО в момент проведения ПР и ПЗ составляет $\lambda(\tau+a)$. Таким образом, кривая интенсивности отказов заменяется на пилообразную с размахом от $\lambda(a)$ до $\lambda(\tau+a)$ и затем до $\lambda(a)$ при проведении ПР и от $\lambda(\tau+a)$ до нуля при проведении ПЗ. С уменьшением периодичности ПР максимумы пилообразной кривой функции ИО приближаются к прямой $\lambda(a)$.

Средняя интенсивность отказов $\overline{\lambda}$, отмеченная на рис. 3 пунктирной линией, на интервале $0-\tau_p$ определяется из выражения

$$\lambda = \tau_p^{-1}\int_0^{\tau_p}\lambda(t)\,dt \qquad (2)$$

Где

$$\int_0^{\tau_p}\lambda(t)dt = \int_0^{a}\lambda(t)dt + (n+1)\int_a^{\tau+a}\lambda(t)dt =$$
$$= n\ln P(a) - (n+1)\ln P(\tau+a);$$

Подставив значение $\int_0^{\tau_p}\lambda(t)\,dt$ в выражение (2), и, учитывая, что

$\tau_p = a + (n+1)\tau$ (см. рис.3), получим

$$\overline{\lambda} = \left[n\ln P(a) - (n+1)\ln P(\tau+a)\right] / \left[a + (n+1)\tau\right] \qquad (3)$$

Рассмотрим два частных случая:

при $n = 0$, когда проводятся только замены и $a = 0$, из (3) получим уравнение (1);

при $n\to\infty$, когда проводятся только ремонты после раскрытия неопределенности, получим $\overline{\lambda} = \left[\ln P(a) - \ln P(\tau+a)\right]\tau^{-1}$.

Рассмотрим случай, когда отказы ПС описываются распределением Вейбулла. Тогда выражение (3) будет иметь вид

$$\overline{\lambda} = [(n+1)((\tau+a)\,k_b/T)^b - n(ak_b/T)^b]\,[a+(n+1)\tau]^{-1}, \qquad (4)$$

где T – наработка на отказ;

b – параметр формы распределения Вейбулла;

$K_b = \Gamma(1+1/b)$, здесь Γ – гамма-функция.

С использованием выражения (4) были проведены исследования зависимости средней интенсивности отказов от количества и периодичности ПР, глубины

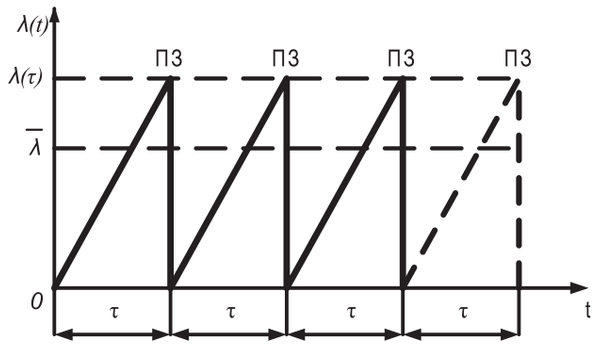


Рис. 2. Изменение интенсивности отказов при заменах

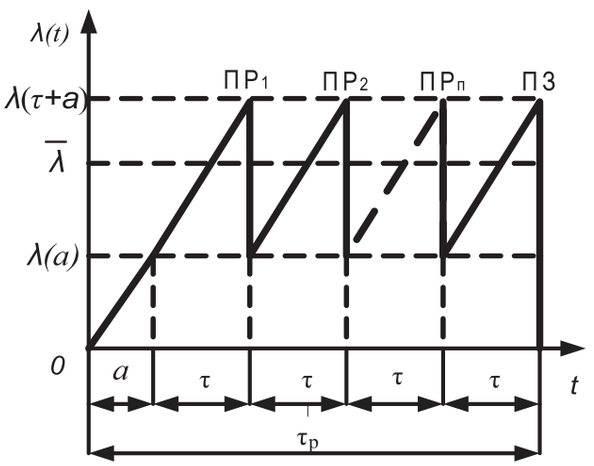


Рис. 3. Изменение интенсивности отказов при ремонтах и замене

восстановления ресурса и параметра формы распределения Вейбулла. Ниже приведены примеры результатов расчетов с представлением параметров T, τ и $\overline{\lambda}$ в безразмерном виде.

Установлено, что с уменьшением количества ПР до замены ПС значение $\overline{\lambda}$ снижается. Например, в случае распределения Вейбулла при b=4 , T=1000,

a=50 и τ=200 имеем: при $n\to\infty$ $-\overline{\lambda} = 0{,}131\times10^{-4}$; при n=3 $-\overline{\lambda} = 0{,}124\times10^{-4}$; при n=0 – $\overline{\lambda} = 0{,}054\times10^{-4}$.

При уменьшении периодичности ПР значение снижается. Например, в случае распределения Вейбулла при b = 4, T = 1000, a = 50, n =3, получаем: при τ = 200 $-\overline{\lambda} = 0{,}124\times10^{-4}$, а при τ = 100 – $\overline{\lambda} = 0{,}030\times10^{-4}$ $1/\text{час}$.

При уменьшении параметра a (увеличении глубины восстановления ресурса) значение $\overline{\lambda}$ снижается, а при a= 0 значение $\overline{\lambda}$ определяется только периодичностью ПЗ. Например, в случае распределения Вейбулла при b=2, T=1000, τ=200, n=3 имеем: при a=100 – $\overline{\lambda} = 0{,}288\times10^{-3}$, а при a=50 – $\overline{\lambda} = 0{,}224\times10^{-3}$.

Таким образом, уменьшая периодичность или количество ПР до замены ПС или увеличивая глубину восстановления ресурса (путем расширения объема работ по замене или восстановлению составных частей ПС при проведении ПР), можно обеспечить практически любое заданное значение средней интенсивности отказов подвижного состава.

С уменьшением коэффициента вариации V (с ростом параметра b) значение $\overline{\lambda}$ снижается. Например, в случае распределения Вейбулла при T =1000, a=50, τ=200 час, n=1 имеем: при b=2 $-\overline{\lambda} = 0,214\times10^{-3}$, а при b=4 $-\overline{\lambda} = 0,117\times10^{-3}$. Это означает, что для ПС с явно выраженными процессами старения и износа повышается эффективность проведения предупредительного ремонта подвижного состава.

Выводы

1. Для определения средней интенсивности постепенных отказов, связанных с износом и старением, целесообразно использовать предложенные выражения, учитывающие глубину восстановления ресурса при проведении ремонта подвижного состава.

2. Из результатов исследований следует, что для подвижного состава, у которого процессы старения и износа выражены более четко, проведение предупредительного ремонта более целесообразно.

3. Значение средней интенсивности отказов с уменьшением периодичности и количества ремонтов до замены подвижного состава снижается, а с уменьшением глубины восстановления ресурса – возрастает.

4. Варьируя глубину восстановления ресурса или периодичность и количество предупредительных ремонтов за срок службы, можно обеспечить заданное значение средней интенсивности отказов подвижного состава.

Литература

1. **Володарский В.А.** К вопросу оптимизации предупредительных замен и ремонтов технических устройств // Надежность. – 2011. – С. 49-59.

2. **Эндрени Дж.** Моделирование при расчетах надежности в электроэнергетических системах. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 435 с.

Volodarsky V.A., Orlenko A.I.

ON THE DEPENDABILITY OF RECONDITIONED ROLLING STOCK

The article suggests formulas for identification of the mean failure rate of reconditioned rolling stock. The authors present the results of the research of the dependence of failure rate on the scope of lifespan recovery, number and frequency of maintenance operations before rolling stock replacement.

Keywords: *failure rate, lifespan, scope of recovery, maintenance, replacement, frequency.*

1. State of the art

Over the course of rolling stock (RS) operation, current maintenance and overhauls are performed in order to ensure its dependability. It is well known that RS maintenance usually recovers only a part of the original dependability properties.

RS operation inevitably involves failures that are caused by various reasons and can be classified by difficulty to eliminate. The choice of the place and method of failure elimination is very important from technical and economic points of view. Accordingly, all failures should be divided into two groups: performance failure and life-limit failure. The elimination of the first type of failure does not require labor intensive operations and RS operational condition is recovered by replacing, fixing or adjustment of faulty components within the scope of maintenance or current repairs. The remaining lifetime does not change. The advantage of this method is that it ensures complete utilization of the lifetime of almost all RS elements.

The life-limit failure shall be understood as an event that indicates either the complete failure of RS as a whole or components failures that justify a certain lifespan recovery of the whole RS. The elimination of such failures requires labor intensive dismantlement, repair, assembly, adjustment, testing and other activities. This method of failure elimination is more complex and requires a special manufacturing environment. The advantage of this method consists in the recovery of the prescribed lifespan and, therefore, improvement of RS dependability. Life-limit failures are eliminated by means of overhauls (OH) or unscheduled replacements. In the first case a partial, while in the second case a complete RS lifespan recovery takes place.

All maintenance and repair actions during RS operation can be classified by three indicators: the moment of activities: scheduled or unscheduled; type of activities: preventive or emergency; scope of lifespan recovery: no recovery (maintenance or current repairs), partial recovery (overhaul) and complete recovery (replacement).

Over the course of operation due to aging and wear processes the degradation failure rate of RS increases. The dependability theory uses distributions with increasing intensity function to describe degradation failures, e.g. Weibull distribution with the shape parameter above one. Preventive repairs eliminate the increase of failure rate ensuring the required RS dependability level. Therefore, in order to evaluate the dependability of reconditioned RS the most demonstrative indicator, the failure rate, should be used.

The purpose of this article is to suggest formulas for finding mean failure rate that take into consideration the scope of reconditioned RS lifespan recovery, as well as to explore the dependence of failure rate on the scope of lifespan recovery, number and frequency of repairs before rolling stock replacement.

2. Taking the scope of lifespan recovery into consideration

In order to take the scope of lifespan recovery into consideration for the purpose of RS preventive and emergency repairs it is suggested to use as per [1] parameter a as "age" of RS after overhaul. The changes in the life-limit failures due to overhauls and RS replacement is given in fig. 1, where T_{pr}, T_{ir} and T_r are respectively the prerepair, interrepair and total resource of RS. Complete recovery shall mean a recovery that somewhat brings RS to the condition it displayed at the beginning of operation (see point 0 in fig. 1), when the life-limit failure rate equals to zero. That is equivalent to a preventive replacement. In case of repair it is suggested to evaluate parameter a as $a = T_{pr} - T_{ir}$ (see fig. 1). Subsequently, while developing mathematical models of preventive repairs optimization for the purpose of evaluating the scope of lifespan recovery it is suggested to use the non-dimensional parameter $\alpha = a/T_{pr}$. If $\alpha = 0$, that means that RS has been replaced. In case of an overhaul after time τ the «age» of RS reduces from τ to $\alpha\tau$.

3. Failure rate of reconditioned RS

As the distribution of time to degradation failure does not comply with the exponential law, it appears justified to use mean failure rate (FR) for a specified time period, e.g. interrepair period or period to replacement. If we assume that the mean FR is practically constant, we can use the hypothesis of the exponential distribution of time to failure of reconditioned technology.

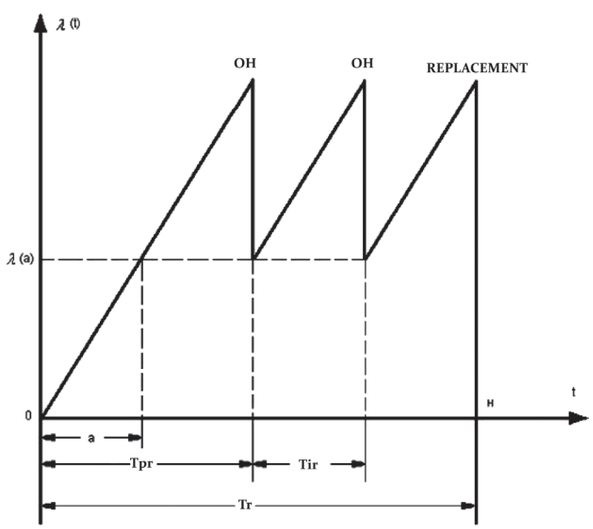


Fig. 1. Change of life-limit failure rate due to overhauls

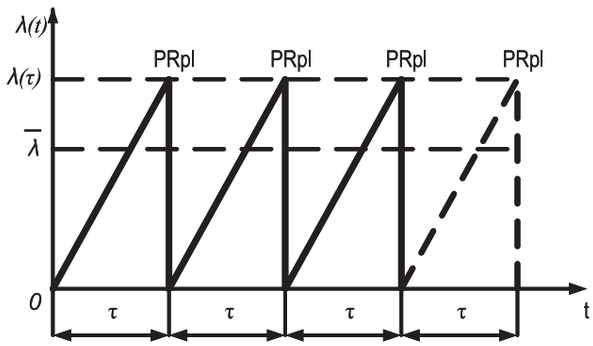


Fig. 2. Change of failure rate due to replacements

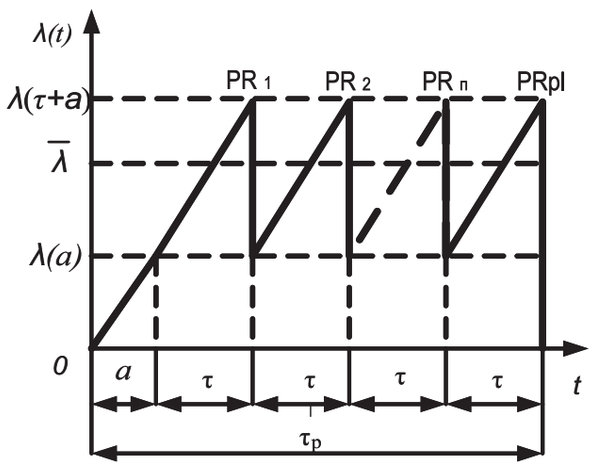


Fig. 3. Change of failure rate due to maintenance and replacements

In [2] the author describes the case of perfect repairs that completely recover the original dependability which is only possible if a device is replaced with a new one. In case of preventive replacement (PRpl) with frequency τ the failure rate $\lambda(t)$ associated with wear and aging goes down to zero (see fig. 2.). With that changes the failure rate distribution, as the curve of FR dependence on the time of operation is replaced with the saw-tooth curve ranging from zero to $\lambda(\tau)$, then back to zero. The mean failure rate $\overline{\lambda}$ (see the dotted line in Fig. 2) in case of PRpl is defined using formula [2]

$$\overline{\lambda} = \tau^{-1}\int_0^{\tau}\lambda(t)\,dt = -\ln P(\tau)\tau^{-1}, \qquad (1)$$

where $P(\tau)$ is the probability of fault-free operation with the time to failure of τ .

In practice, devices are repaired, but not replaced. In that case dependability does not recover completely. In order to take the scope of lifespan recovery into consideration it is suggested to use parameter $a>0$ that indicates the "age" of RS after repair [1]. The value of parameter a is defined on the scope of the activities related to replacement and repair of RS components during repair operations.

In general, in order to recover lifespan after n preventive repairs (PR), RS is replaced. Failure rate evolution is shown in fig. 3. After PR with frequency τ the FR goes down to $\lambda(a)$, while after PRpl with frequency τ_r it goes down to

zero. FR at the moment of PR and PRpl is $\lambda(\tau+a)$. Thus, the failure rate curve is replaced with the saw-tooth curve with the range from $\lambda(a)$ to $\lambda(\tau+a)$and then to $\lambda(a)$ in case of PR and from $\lambda(\tau+a)$ to zero in case of PRpl. As PR frequency goes down, the peaks of the saw-tooth curve of the FR function approximate the straight line $\lambda(a)$.

The mean failure rate $\overline{\lambda}$ marked in fig. 3 with a dotted line within interval $0 - \tau_r$ is defined using the formula

$$\lambda = \tau_\rho^{-1} \int_0^{\tau_\rho} \lambda(t)\,dt \qquad (2)$$

where

$$\int_0^{\tau_\rho} \lambda(t)dt = \int_0^{a} \lambda(t)dt + (n+1)\int_a^{\tau+a} \lambda(t)dt =$$
$$= n\ln P(a) - (n+1)\ln P(\tau + a);$$

Inserting value $\int_0^{\tau_\rho} \lambda(t)\,dt$ in formula (2) and taking into consideration that $\tau_\rho = a + (n+1)\tau$ (see Fig. 3) we get

$$\overline{\lambda} = \left[n\ln P(a) - (n+1)\ln P(\tau + a)\right] / \left[a + (n+1)\tau\right]. \qquad (3)$$

Let us consider two special cases:

For $n = 0$, when only replacements are made and $a = 0$, from (3) we deduct equation (1);

if $n \to \infty$ when only repairs are made after evaluation of indeterminate forms we get $\overline{\lambda} = \left[\ln P(a) - \ln P(\tau + a)\right]\tau^{-1}$.

Let us consider a case when RS failures are described with a Weibull distribution. Then formula (3) takes the form

$$\overline{\lambda} = [(n+1)((\tau+a)\,k_b/T)^b - n(ak_b/T)^b]\,[a + (n+1)\,\tau]^{-1}, \qquad (4)$$

where T is the time to failure;

b is the parameter of the Weibull distribution shape;

$K_b = G(1+1/b)$, G being the gamma function.

Formula (4) was used in the research of the dependence of the mean failure rate on the quantity and frequency of PR, scope of lifespan recovery and parameter of Weibull distribution shape. Below are given examples of calculation results with representation of parameters T, τ and $\overline{\lambda}$ in non-dimensional form.

It was established that as the number of PR goes down before RS replacement value $\overline{\lambda}$ drops. For example, in case of Weibull distribution if $b=4$, $T=1000$,$a=50$ and $\tau = 200$ we have: for $n \to \infty$ $\overline{\lambda} = 0{,}131 \times 10^{-4}$; for $n=3$ $\overline{\lambda} = 0{,}124 \times 10^{-4}$; for $n=0$ – $\overline{\lambda} = 0{,}054 \times 10^{-4}$.

As PR goes down value $\overline{\lambda}$ drops. For example, in case of Weibull distribution if $b=4$, $T=1000$, $a=50$, $n=3$, we have: for $\tau = 200$ $\overline{\lambda} = 0{,}124 \times 10^{-4}$, while for $\tau = 100$ – $\lambda = 0{,}030 \times 10^{-4}$ 1/hour.

As parameter a goes down (scope of lifespan recovery increases), value $\overline{\lambda}$ drops, while for $a = 0$ value $\overline{\lambda}$ is defined only by PRpl frequency. For instance, in case of Weibull distribution for $b=2$, $T=1000$, $\tau=200$, $n=3$ we have: for $a=100$ – $\overline{\lambda} = 0{,}288 \times 10^{-3}$, while for $a=50$ – $\overline{\lambda} = 0{,}224 \times 10^{-3}$.

Thus, by reducing the frequency or number of PR before RS replacement or increasing the scope of lifespan recovery (by extending the list of activities related to replacement or recovery of RS components during PR) practically any target values of mean failure rate of rolling stock can be ensured.

With the reduction of the coefficient of variation V (rise of parameter b) value $\overline{\lambda}$ drops. For example, in case of Weibull distribution if $T=1000$, $a=50$, $\tau=200$ hours, $n=1$ we have: if $b=2$ $\overline{\lambda} = 0{,}214 \times 10^{-3}$, while if $b=4$ $\overline{\lambda} = 0{,}117 \times 10^{-3}$. That means that for RS clear signs of aging and wear preventive repairs become more efficient.

Conclusions

1. In order to identify the mean degradation failure rate associated with wear and aging it is suggested to use the formulas given above that take into consideration the scope of lifespan recovery as the result of rolling stock repair.

2. Research shows that for rolling stock that more clearly displays aging and wear preventive repairs are of higher relevance.

3. The mean failure rate value declines, as with the reduction of frequency and number of repairs to rolling stock replacement, and increases with the reduction of the scope of lifespan recovery.

4. By adjusting the scope of lifespan recovery or frequency and number of preventive repairs within the service life, the target value of rolling stock mean failure rate can be ensured.

References

1. **Volodarsky V.A.** On the optimization of preventive replacement and maintenance of technical devices. Dependability. – 2011. – P. 49-59.

2. **Endrenyi J.** Reliability Modeling in Electric Power Systems. Moscow. Energoatomizdat, 1983. – 435 p.

Иванова Т.В., Петровых В.А., Налабордин Д.Г.

СТАТИСТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА НАРАБОТКИ ДО ОТКАЗА ПОЛУВАГОНОВ В МЕЖРЕМОНТНОМ ПЕРИОДЕ

В статье приведены результаты статистической обработки массива данных по наработкам вагона до отказа. В ходе рассмотренного эксперимента установлено, что наработка до отказа таких узлов вагона как колесные пары, кузов, тележки подчиняется нормальному закону распределения. Получены численные значения параметров распределений.

Ключевые слова: *надежность, средняя наработка до отказа, грузовой вагон, закон распределения.*

Обеспечение высокой эффективности и безопасности использования грузовых вагонов имеет важное народнохозяйственное значение, поскольку является одним из основополагающих направлений экономического развития страны. Так, например, в условиях массовой эксплуатации даже незначительное уменьшение затрат на периодический ремонт вагона может привести к существенной экономии финансовых средств. И наоборот, в условиях острой промышленной конкуренции любое пусть и незначительное увеличение подобных затрат способно привести к утрате внутреннего и международного рынка транспортных услуг и, как следствие, к большим финансовым потерям.

Для того чтобы конкретный технический объект мог эффективно и безопасно использоваться по назначению система технической эксплуатации должна постоянно поддерживать его в работоспособном и готовом к применению состоянии. Этот процесс принято называть управление состоянием технического объекта. Одной из методологических посылок, на которых основаны многие научные труды, является утверждение о том, что если в рамках системы технической эксплуатации осуществлять эффективное управление состоянием каждого технического объекта в отдельности, то и система технической эксплуатации в целом будет эффективна.

Система технического обслуживания и ремонта грузовых вагонов предусматривает следующие виды периодических ремонтов и технического обслуживания:

– техническое обслуживание в пути следования ТО (техническое обслуживание);
– текущий отцепочный ремонт в объеме ТР-1 (текущий ремонт);
– текущий отцепочный ремонт в объеме ТР-2;
– деповской ремонт ДР;
– капитальный ремонт КР;
– капитальный ремонт с продлением срока службы КРП.

Для грузовых вагонов применяется комбинированный критерий периодичности проведения плановых ремонтов, учитывающий фактически выполненный объем работы вагоном и календарную продолжительность его использования от постройки или планового ремонта. В настоящее время для основных типов грузовых вагонов ресурс между плановыми ремонтами равен 160 тыс. км., а календарная продолжительность межремонтного периода составляет 2 года.

Вагон – сложная система взаимосвязанных деталей, узлов и агрегатов. Долговечность и эффективность его использования во многом зависит от ресурса, заложенного при проектировании и изготовлении вагона. В процессе использования заложенный ресурс постепенно расходуется: с течением времени снижается эффективность работы вагона, увеличиваются износы, коррозионные и усталостные повреждения.

Источником информации о техническом состоянии парка (выборки) грузовых вагонов могут быть данные реальной эксплуатации или стендовые испытания. Наиболее перспективен и эффективен первый способ получения информации. В условиях пономерного централизованного учета вагонов, который осуществляет Главный вычислительный центр (ГВЦ), можно саму нормальную эксплуатацию считать в качестве своего рода стенда для испытания на надежность вагонных конструкций [1]. Поэтому на результаты подобных эксплуатационных испытаний вагонов следует смотреть как на обратную связь в управлении процессом совершенствования их конструкции.

Методология установления количественных показателей надежности объектов на основании статистических данных об отказах при испытаниях или в процессе эксплуатации предусматривает принятие той или иной теоретической модели отказов (функции распределения наработки до отказа или на отказ) и определение параметров этой функции распределения. Если установлена функция распределения и определены параметры этой функции, тогда вычисляются все необходимые показатели надежности этих объектов (средняя наработка на отказ, гамма-процентная наработка, вероятность безотказной работы за заданное время наработки, остаточный ресурс).

Согласно ГОСТ 27.002-89 [2] наработка до отказа – наработка объекта от начала эксплуатации до возникновения первого отказа. Под средней наработкой грузового вагона до отказа необходимо понимать математическое ожидание его наработки от момента окончания планового ремонта (или постройки) до первой отцепки вагона в текущий ремонт.

Средняя наработка до отказа вагона является важным показателем, который в первую очередь показывает уровень качества производства плановых ремонтов, а также уровень эксплуатационной надежности вагона в целом и его отдельных элементов конструкции. Естественно, что задача по определению закона распределения наработки до отказа (установления, так сказать, математической природы случайной величины) вагона в межремонтном периоде и его основных числовых характеристик является актуальной для транспортной науки, а также представляет интерес и для промышленности.

Перед авторами статьи стояла именно такая задача. На полигоне Забайкальской железной дороги службой вагонного хозяйства и Забайкальским институтом железнодорожного транспорта проведен эксперимент по определению средней наработки до отказа грузовых вагонов. Получен массив данных по числу отказов и наработкам вагонов до первой отцепки в текущий ремонт. Ниже приведены основные условия данного исследования.

Условие 1. План наблюдений при испытаниях на надежность принят [NUN] – в соответствии с которым под наблюдение ставится N изделий; наблюдения ведутся до отказа всех изделий; при появлении отказа отказавшее изделие не заменяется новым.

Условие 2. По роду подвижного состава для подконтрольной эксплуатации были выбраны полувагоны. Под наблюдение было поставлено 8645 полувагонов.

Условие 3. По элементам конструкции вагона отказы разбивались на шесть групп: колесные пары, буксовый узел, тележки, автосцепное устройство, тормозное оборудование, кузов и рамы. Наблюдения проводились до первой отцепки грузового вагона в текущий ремонт после планового ремонта.

Результаты эксперимента по числу отказов в зависимости от составных частей конструкции представлены в таблице 1.

Таблица 1. Число отказов полувагонов по элементам конструкции

Отказавший узел	Число отказов	Доля в выборке
Колесные пары	1565	18%
Буксовый узел	996	12%
Тележка	2421	28%
Автосцепное устройство	240	3%
Тормозное оборудование	462	5%
Кузов и рама	2961	34%
ИТОГО	8645	100%

Таблица 2. Результаты выравнивания наработки полувагона до отказа нормальному закону распределения

Наименование	Элемент конструкции			
	Колеса	Тележки	Кузов и рама	Вагон
Закон распределения наработки до отказа	Нормальный			
Плотность вероятностей	$f(x)=\frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}}e^{\frac{-(x-\bar{x})^2}{2\sigma^2}}$			
Параметры распределения (математическое ожидание, среднее квадратичное отклонение)	$\begin{cases}\bar{x}=93072\\ \sigma=34904\end{cases}$	$\begin{cases}\bar{x}=89723\\ \sigma=37334\end{cases}$	$\begin{cases}\bar{x}=79890\\ \sigma=36605\end{cases}$	$\begin{cases}\bar{x}=84934\\ \sigma=38151\end{cases}$

Из таблицы 1 видно, что наибольшее число отказов зарегистрировано по колесным парам, тележкам, кузову и раме вагона. Полученных данных оказалось достаточно, чтобы выполнить аппроксимацию экспериментальных данных, определить закон распределения случайной величины и его числовые характеристики (таблица 2).

На рис. 1 – 3 представлены гистограммы распределения наработки элементов полувагона до отказа в сравнении с теоретическими кривыми, что визуализирует близость распределения экспериментальных данных нормальному закону распределения. Справедливость гипотез о распределении наработки вагона до отказа нормальному закону распределения в ходе расчетов подтверждена по критерию Пирсона.

Из-за малого числа отказов вагонов по автосцепному устройству и автотормозному оборудованию, а также из-за особенностей ремонта буксовых узлов (возможность проведения промежуточной ревизии при плановых видах ремонта) достаточно точно определить закон распределения наработки до отказа данных элементов конструкции пока не представляется возможным, однако накопление массива данных в этом направлении постоянно производится. При этом статистически доказано, что в целом наработка до отказа по всем элементам конструкции вагона подчиняется также нормальному закону распределения (рис. 4).

Безотказная наработка зависит от большого числа факторов, часть которых не может быть проконтролирована, а остальные заданы с той или иной степенью неопределенности. Безотказная работа конкретно взятого вагона зависит от качества сырья, материалов, заготовок и полуфабрикатов, от достигнутого уровня технологии и степени стабильности технологического процесса, от

Рис. 1. Гистограмма распределения наработки колесных пар полувагона до отказа

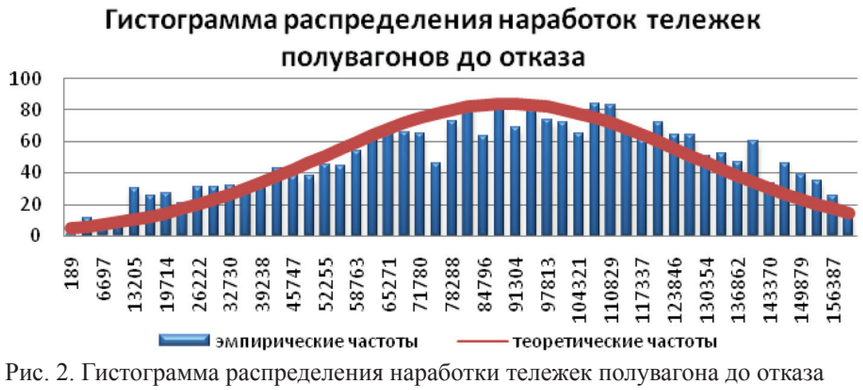


Рис. 2. Гистограмма распределения наработки тележек полувагона до отказа

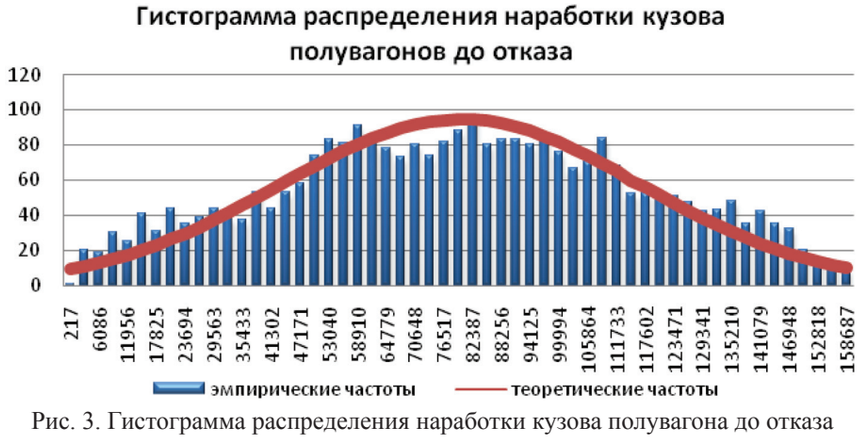


Рис. 3. Гистограмма распределения наработки кузова полувагона до отказа

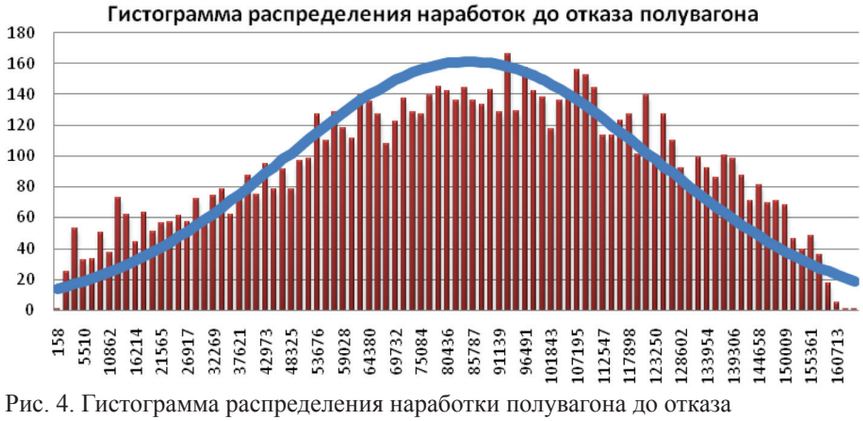


Рис. 4. Гистограмма распределения наработки полувагона до отказа

уровня технологической дисциплины, от выполнения всех требований по применению объекта по назначению. Перечисленные выше факторы, влияя на работоспособность составных частей вагона, определяют его работоспособность в целом.

Исследование показывает, что наработка до отказа имеет значительный статистический разброс. Этот разброс служит, своего рода, характеристикой технологической культуры и дисциплины, а также достигнутого уровня технологии ремонтных предприятий. Разброс наработки до первого отказа можно уменьшить, а ее значение можно увеличить путем повышения качества ремонта, применения современных технологий, неукоснительного соблюдения требований ремонтной документации, индивидуальной и пооперационной приемки каждого вагона из ремонта. Такой подход осуществляется, как правило, для особо ответственных объектов (например, для авиационной техники).

Результаты статистических расчетов показывают, что средняя наработка до отказа полувагона (в целом) на сегодняшний день равна 84934 км. И как показывает практика это событие можно считать практически достоверным, то есть которое обязательно произойдет. Необходимо также отметить, что существующая система технического обслуживания и ремонта, а также уровень качества плановых ремонтов не обеспечивают безотказную работу подвижного состава в межремонтном периоде.

Литература

1. Надежность рельсового нетягового подвижного состава. / П.А. Устич, В.А. Карпычев, М.Н. Овечников.; Под ред. П.А. Устича. – М.: УМЦ МПС России, 2004. – 416 с.

2. ГОСТ 27.002-89. Надежность в технике. Основные понятия, термины и определения. – М.: Изд-во стандартов, 1990. – 45 с.

Ivanova T.V., Petrovykh V.A., Nalabordin D.G.

STATISTICAL ESTIMATION OF MEAN TIME TO FAILURE OF GONDOLA CARS BETWEEN REPAIRS

The paper presents the statistical processing of data on a car's time to failure. During the experiment it was found out that time to failure of such car units as wheel pairs, bodies and bogies complies with a normal distribution law. Numerical values of distribution parameters have been calculated.

Keywords: *reliability, mean time to failure (MTTF), freight car, distribution law.*

Provision of high efficiency and safety in use of freight cars is vital for the economy as it is one of the key directions of the country's economic development. Thus, for example, in the context of mass operations, even inconsiderable decrease of expenditures on a car's periodic repair can result in substantial saving of financial resources. And vice versa, in the context of high industrial competition, any albeit inconsiderable increase of such expenditures can lead to losing the inner and international market of transport services and, consequently, to substantial financial losses.

In order that a particular technical facility can be efficiently and safely used as intended, the system of technical maintenance has to permanently support it in good state available for operation. This process is usually called as management of a technical facility's state. One of the methodological provisions, which many research works are based on, is an assumption that if each technical facility's state is separately managed in an efficient way within the system of technical maintenance, the system of technical maintenance as a whole will be efficient.

The system of technical maintenance and repair of freight cars provide for the following types of periodic repairs and technical maintenance:

– technical maintenance en route TM (technical maintenance);
– actual decoupling repair in the volume of AR-1 (actual repair);
– actual decoupling repair in the volume of AR -2;
– depot repair DR;
– capital repair CR;
– capital repair with prolongation of lifetime CRP.

For freight cars one uses a combined criterion of periodicity of scheduled repairing, which takes into account the volume of works actually done by a car and calendar duration of its use from its construction or scheduled repair. At present for the main types of freight cars the resource between scheduled repairs is equal to 160 thousand km, and the calendar duration between repairs is 2 years.

A car is a complex system of interconnected units, parts and components. The longevity and efficiency of its use to much extent depends on the resource put during the designing and manufacturing of a car. In the process of use the imbedded resource is gradually spent –the efficiency of a car's operation decreases, tears and wears increase, corrosion and fatigue damages become stronger as the time goes.

The information about the technical state of a fleet (sample) of freight cars can go from data of commercial operation or bench testing. The most promising and efficient one is the first way of getting information. In the conditions of centralized accounting of cars by their numbers made by the Main Computing Centre (GVC), we can consider commercial operation itself as a kind of bench for testing the reliability of car constructions [1]. Therefore, results of such operational testing should be treated as feedback in management of the process of improving their constructions.

The methodology of calculating numerical parameters of the reliability of facilties based on statistical data about failures during testing or in operation assumes adopting one or another theoretical model of failures (function of time to failure distribution) and defining parameters of this distribution function. If the function of distribution is specified and the parameters of this function are defined, then we calculate all the required indices of the reliability of these facilities (mean time to failure, gamma-percentage operating time to failure, probability of failure-free operation for specified time to failure, residual resource).

According to GOST 27.002-89 [2], time to failure is the operating time of a facility from the start of operation till emergence of the first failure. Mean time to failure of a freight car has to be understood as the mathematical expectation of its time to failure from the moment of completion of scheduled repair (or construction) till the first decoupling of a car for actual repairing.

Mean time to failure of a freight car is an important parameter, which in its turn shows the quality level of scheduled repairs execution as well as the level of the operational reliability of a car on the whole and its separate construction elements. Naturally, the problem of defining the law of distribution of time to failure (identifying, so to say, the mathematical nature of a random value) of a car between repairs and its basic numerical characteristics is vital for the transport science as well as of interest for the industry.

It is the problem that the authors faced. At the of the Zabaykalsk railway the service of cars and the Zabaykalsk Institute of Railway Transport carried out an experiment for defining mean time to failure of freight cars. It helped to get a mass of data on numbers of failures and times to failure of cars till the first decoupling for actual repairing. The basic conditions of the experiment are presented below.

Condition 1. The plan of observations for reliability testing was adopted [NUN] – in compliance with which N of products has to be put under observation; observations are made till failure of all products; with emergence of failure, a failed product is not replaced by a new one.

Condition 2. As regards the type of rolling stock, gondola cars were chosen for under-control operation. 8645 gondola cars were put under observation.

Condition 3. As per elements of car construction, failures were divided into six groups: wheel pairs, box unit, bogies, automatic coupling device, breaking device, body and frames. Observations were made till the first decoupling of a freight car for actual repair after the scheduled overhaul.

The results of the experiment as per number of failures in relation to construction components are presented in Table 1.

Table 1. Number of failures of gondola cars as per construction elements

Failed unit	Number of failures	Sample share
Wheel pairs	1565	18%
Box unit	996	12%
Bogie	2421	28%
Automatic coupling device	240	3%
Braking equipment	462	5%
Body and frame	2961	34%
TOTAL	8645	100%

Table 1 shows that the biggest number of failures is recorded for wheel cars, bogies, body and frames. The obtained data were enough to do the approximation of the experimental data, to define a law of random value distribution and its numerical characteristics (Table 2).

Fig. 1 – 3 show the histograms of distribution of times to failure of gondola car elements as compared to theoretical

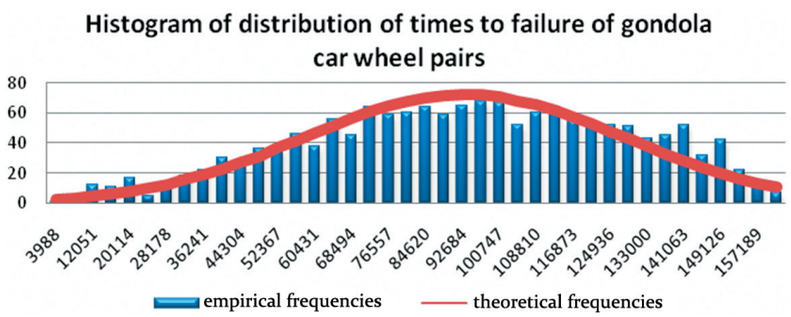


Fig. 1. Histogram of distribution of times to failure of gondola car wheel pairs

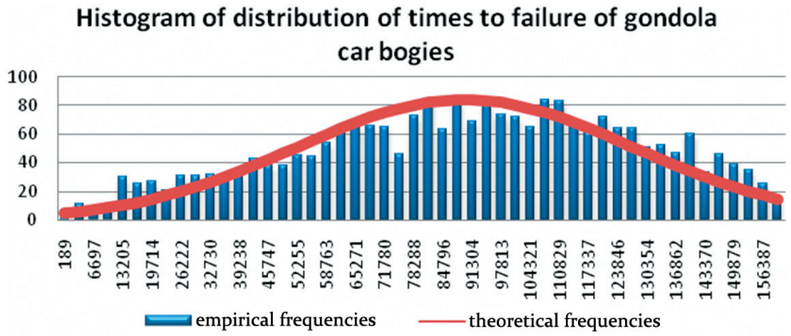


Fig. 2. Histogram of distribution of times to failure of gondola car bogies

Table 2. Results of fitting of times to failure of a gondola car to a normal distribution law

Title	Construction element			
	Wheels	Bogies	Body and frame	Car
Time to failure distribution law	Normal			
Density of probabilities	$f(x)=\frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}}e^{\frac{-(x-\bar{x})^2}{2\sigma^2}}$			
Distribution parameters (mathematical expectation, mean square deviation)	$\begin{cases}\bar{x}=93072\\ \sigma=34904\end{cases}$	$\begin{cases}\bar{x}=89723\\ \sigma=37334\end{cases}$	$\begin{cases}\bar{x}=79890\\ \sigma=36605\end{cases}$	$\begin{cases}\bar{x}=84934\\ \sigma=38151\end{cases}$

curves, which visualize the closeness of the distribution of experimental data to the a normal distribution law. The hypothesis that the distribution of time to failure of a car complies with a normal distribution law was confirmed during calculations by the Pearson criterion.

Due to a small number of car failures as regards automatic coupling and breaking equipment, as well as due to the specifics of box units repairing (possibility of making preliminary audits during scheduled repairs) it does not seem possible to identify a law of time to failure distribution for these construction elements, though data in this field is constantly being gathered. Yet it is statistically proven that on the whole time to failure for all the car construction elements also obeys to a normal distribution law (fig. 4).

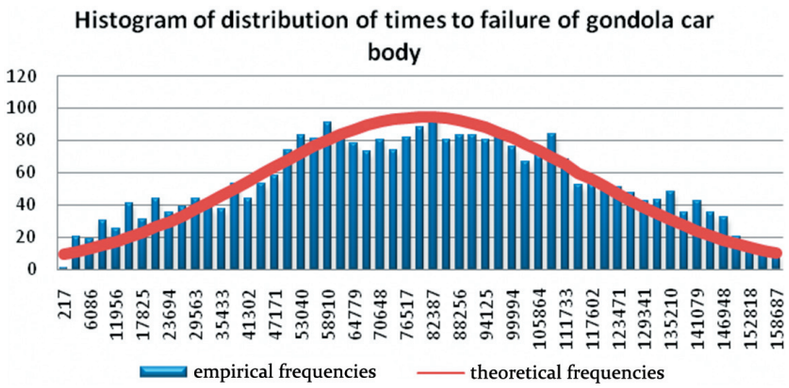


Fig. 3. Histogram of distribution of times to failure of gondola car body

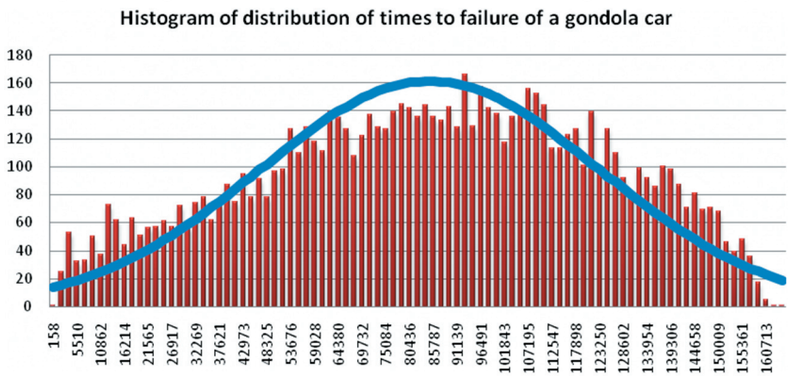


Fig. 4. Histogram of distribution of times to failure of a gondola car

Failure-free operation depends on a number of factors, some of them can be controlled and others are specified with some degree of uncertainty. Failure-free operation of a particular car depends on the quality of raw material and components, the achieved level of technology and the degree of technological process stability, the level of technological discipline, meeting all the requirements for intended use of a facility. The above listed factors influencing the availability of a car's components define its availability as a whole.

The research shows that time to failure has a substantial statistical dispersion. This dispersion serves as a kind of characteristic of technological culture and discipline as well as the achieved level of technology of repairing enterprises. The variance of time to the first failure can be reduced and its value can be increased by enhancing the quality of repairing, using advanced technologies, strictly observing the requirements of repairing documents, individual operational acceptance of each car after repair. Such approach is generally made for especially vital facilities (for example, aviation equipment).

The results of statistical calculations show that mean time to failure of a gondola car (as a whole) is equal to 84934 km at present. And as the practice shows, this event can be considered as practically reliable, i.e. as such that is due to happen. It should be also noted that the existing system of technical maintenance and repair as well as the quality level of scheduled repairs don't provide failure-free operation of rolling stock between repairs.

References

1. Reliability of rail non-traction rolling stock. / P.A. Ustich, V.F. Karpychev, M.N. Ovechnikov; Ed. by P.A. Ustich. – M: UMC MPS Russia, 2004. – 416 p.

2. GOST 27.002-89. Dependability in equipment. Basic concepts, terms and definitions. – M: Publishing house of standards, 1990. – 45 p.

Лавров В. А., Дурнев А.В.

МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ДИАГНОСТИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ СЛАБОТОЧНЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ РЕЛЕ

В статье рассматриваются методы и средства контроля качества и выявления высоконадежных слаботочных электромагнитных реле на основе диагностической ценности признаков. Предложено программное обеспечение для выбора наиболее информативных параметров и классификации реле по надежности.

Ключевые слова: *диагностика реле, контроль реле, характеристики реле, потенциально ненадежное реле, информативные параметры реле.*

Качество радиоэлектронной аппаратуры (РЭА), применяемой в различных отраслях промышленности и специальной технике (военной, космической, медицинской и др.), в значительной степени определяется качеством применяемой электронной компонентной базы [1,2]. Одними из самых широко и давно применяемых элементов РЭА являются электромагнитные слаботочные герметичные реле (в дальнейшем реле), выпуск которых вырос за последние годы [3,4]. Поэтому важно иметь диагностические инструменты, определяющие качество изготовления реле и осуществляющие прогнозирование надежности его работы.

При текущем уровне производства сохраняется возможность попадания ненадежных реле к потребителю. Причем дефекты (под дефектом понимается значение какого-либо из параметров реле, находящееся вне норм, установленных в технических условиях) обнаруживаются на каждом из этапов жизненного цикла реле, а именно, на стадии поставки, в процессе входного контроля и эксплуатации. Самым распространенным дефектом является несоответствие напряжений (токов) срабатывания и возврата к нормам, установленным в технических условиях (ТУ). Затем идут дефекты, связанные с повышенными значениями временных параметров, сопротивлением цепи контактов и наличием кратковременных обрывов цепи обмотки. Учитывая области применения реле, можно сказать, что проблемы разработки и внедрения эффективных мер по предупреждению возникновения, обнаружению вышеперечисленных дефектов и исключению попадания таких реле к потребителю, являются ключевыми в повышении качества данной продукции [5].

Путем практических экспериментов установлено, что выявление экземпляров реле с повышенными значениями уровней срабатывания, временных параметров и сопротивления цепи контактов необходимо проводить путем многократных измерений указанных параметров. Каждое измерение при этом производится в процессе либо по окончании очередной коммутации. Оптимальным является 20-30 коммутаций. Следует отметить, что нормативными документами [6] предусмотрено однократное измерение этих параметров. Было выявлено, что отклонение значений того или иного параметра (даже если оно находится в пределах норм ТУ) от измерения к измерению является сигналом того,

что в дальнейшем этот экземпляр реле будет работать нестабильно. Эти факторы играют большую роль в выявлении потенциально ненадежных реле. Для примера в таблицах 1 и 2 приведены значения параметров двух дефектных реле типа РЭК60 и РПС45. Измерения уровней срабатывания (чувствительности) производились 10 раз, а измерение сопротивления цепи контактов 30 раз.

Таблица 1. Результаты измерения сопротивления контактов реле РЭК60

Сопротивление контактов, мОм				
№ теста	НЗ 1	НР 1	НЗ 2	НР 2
1	50	82	53	56
2	68	58	51	55
3	101	62	52	55
4	67	53	52	55
5	54	601	51	55
6	52	71	52	55
7	93	93	53	55
8	60	53	52	55
9	51	54	51	55
10	52	53	52	55
11	50	53	52	55
12	51	53	52	55
13	51	53	53	55
14	50	53	53	55
15	51	53	53	55
16	50	53	52	55
17	51	53	53	55
18	51	53	52	55
19	51	85	53	55
20	234	173	52	55
21	54	649	53	55
22	138	93	53	55
23	140	55	53	55
24	53	59	53	55
25	53	53	52	55
26	51	53	52	55
27	50	53	53	55
28	51	55	52	55
29	53	58	53	55
30	52	62	53	55
31				

Таблица 2. Результаты измерения напряжений срабатывания реле РПС45

Проверка чувствительности						
№ теста	Ucp1 V	Ucp2 V		№ теста	Ucp1 V	Ucp2 V
1	11,77	11,53		6	13,78	11,54
2	12,83	11,52		7	14,16	11,54
3	13,4	11,53		8	14,35	11,45
4	13,3	11,52		9	15,34	11,56
5	14,75	11,55		10	14,17	11,54

Как следует из результатов контроля (таблицы 1,2) повышенные значения сопротивления цепи размыкающих и замыкающих контактов Rк (при норме 100 мОм) выявились на третьем, пятом и с девятнадцатого по двадцать третье, а напряжения срабатывания Ucp1 и Ucp2 (при норме 14,5 В) на пятом и девятом измерениях соответственно. При однократном измерении параметров данные дефекты не могли быть обнаружены и экземпляры реле, идентифицированные как годные, попали бы к потребителю. На входном контроле [7] также ничего бы не обнаружилось при однократном измерении. Фактически повышенное значение напряжения срабатывания и сопротивления цепи контактов свидетельствует о том, что реле в нескольких коммутациях не выполнило свою функцию (не соответствовало техническим условиям).

Как известно, существует два основных подхода для распознавания технического состояния системы (в данном случае реле) – детерминистский и статистический вероятностный [8,9].

В работе [10] рассматриваются методы дискриминантного анализа, использование которого можно отнести к детерминистскому подходу для классификации и выбора наиболее информативных параметров. В качестве диагностических признаков авторами используются значения восьми временных параметров реле, полученные ручным осциллографическим способом. Основным недостатком метода является недостаточный охват номенклатуры признаков, по которым должна производиться классификация, в частности авторами не использовались электрические параметры реле. Проведение диагностики реле по данной номенклатуре измеряемых параметров и их однократном измерении может привести (как было показано выше) к существенной потере точности классификации. Ведь значения временных параметров, находящиеся в норме не гарантируют нормальных значений электрических параметров. К примеру, у реле РЭК60 и РПС45, приведенных в начале статьи, значения временных параметров находились в норме. Одним из путей повышения качества и точности диагностики на основе данного метода может послужить увеличение номенклатуры исследуемых признаков и автоматизация измерения электрических и временных параметров реле.

Следует также отметить, что авторами для получения временных параметров использовался трудоемкий ручной осциллографический метод, при котором практически невозможно осуществлять многократные измерения. Нельзя не отметить, что по тем временам использование такого подхода к получению значений параметров было вполне оправданным.

За последние годы произошли существенные изменения в приборном оснащении диагностики и контроля качества слаботочных электромагнитных реле. В частности, разработан ряд автоматизированных установок для измерения электрических и временных параметров реле с применением средств вычислительной техники, позволяющие проводить многократные измерения электрических и временных параметров реле с последующей статистической обработкой.

В данной статье для распознавания технического состояния реле исследуется возможность применения статистического вероятностного подхода. Рассматриваются разработанные методы, приборы и программное обеспечение для определения технического состояния и классификации реле по значениям электрических и временных параметров, а также их изменениям в

процессе многократных измерений на основе методов теории информации.

Классификация экземпляров реле по надежности и оценка информативности признаков выполнена по априорной статистике диагнозов с расчетом диагностических весов и диагностической ценности обследования.

Наиболее достоверную информацию о коммутационной долговечности слаботочных электромагнитных реле дают их испытания на износостойкость. Для определения ресурса реле необходимо установить комплекс признаков, наиболее полно характеризующих его техническое состояние.

В качестве диагностических признаков выступают электрические и временные параметры реле. За диагнозы принимается количество безотказных коммутаций, выполненных в определенном электрическом режиме.

Следует отметить, что составление диагностической матрицы, определение наиболее информативных параметров и классификация реле на основе значений диагностических весов должны осуществляться отдельно для каждого типа реле и в зависимости от режима его работы.

В рассматриваемом примере определен диагностический вес признаков реле РЭС47. Набор диагностических признаков (K_{js}) содержит 12 параметров реле, определенных до начала испытаний на износостойкость.

Для эксперимента взяты реле РЭС47 в количестве 96 штук с набором электрических и временных параметров (признаков) реле. В процессе испытаний на износостойкость с использованием активной нагрузки контактов (36В, 3А-постоянный ток) установлены следующие диагнозы (категории технического состояния) по количеству безотказно выполненных коммутаций:

- S1 -до 7 тысяч;
- S2- от 7 до 15 тысяч;
- S3 – от 15 до 23 тысяч;
- S4 – свыше 23 тысяч.

Таблица 3

№	Диагностические признаки	(K_{js})	Интервалы признаков	$P(K_{js})$	S_1	S_2	S_3	S_4
					$P(S_1)$= 0,19	$P(S_2)$ = 0,28	$P(S_3)$ = 0,39	$P(S_4)$ = 0,14
					$P(K_{js}/S_1)$	$P(K_{js}/S_2)$	$P(K_{js}/S_3)$	$P(K_{js}/S_4)$
1	Напряжение срабатывания *Uср,В*	K_{11}	6,8-7,5	$P(K_{11})$	0,12	0,16	0,26	0,38
		K_{12}	7,5-8,4	$P(K_{12})$	0,82	0,82	0,73	0,61
		K_{13}	8,4-9,4	$P(K_{13})$	0,06	0,02	0,01	0,01
2	Напряжение возврата *Uвозвр, В*	K_{21}	2,5-3,1	$P(K_{21})$	0,05	0,16	0,17	0,24
		K_{22}	3,1-3,9	$P(K_{22})$	0,93	0,72	0,71	0,6
		K_{23}	>3,9	$P(K_{23})$	0,02	0,12	0,12	0,16
3	Сопротивление цепи контактов, *Rк, мОм*	K_{31}	13-36	$P(K_{31})$	0,9	0,96	1.0	1,0
		K_{32}	36-960	$P(K_{32})$	0,1	0,04	-	-
4	Время срабатывания, *tср, мс*	K_{41}	1,3-1,9	$P(K_{41})$	0.73	0,76	0,86	0,84
		K_{42}	>1,9	$P(K_{42})$	0,27	0,24	0,14	0,16
5	Время возврата, *tвозвр, мс*	K_{51}	0,9-1,2	$P(K_{51})$	0,81	0,73	0,71	0.69
		K_{52}	1,2-1,8	$P(K_{52})$	0,19	0,27	0,29	0,31
6	Время перелета, *tпер, мс*	K_{61}	0,08-0,18	$P(K_{61})$	0.54	0.63	0,9	0,89
		K_{62}	0,18-0,8	$P(K_{62})$	0,46	0,37	0,1	0,11
7	Время дребезга, *tдр,мс*	K_{71}	0,01-0,1	$P(K_{71})$	0,02	0,07	0,24	0,22
		K_{72}	0,1-0,3	$P(K_{72})$	0,06	0,09	0,38	0,43
		K_{73}	0,3-0,7	$P(K_{73})$	0,08	0,16	0,26	0,24
		K_{74}	0,7-1,4	$P(K_{74})$	0,84	0,68	0,12	0,11
8	Отклонение напряжений срабатывания от минимального значения, Д*Uср, В*	K_{81}	0,1-0,3	$P(K_{81})$	0,56	0,48	0,51	0,43
		K_{82}	0,3-0,6	$P(K_{82})$	0,44	0,52	0,49	0,57
9	Отклонение напряжений возврата от минимального значения, Д*Uвозвр, В*	K_{91}	0,01-0,1	$P(K_{91})$	0,24	0,48	0,65	0,73
		K_{92}	0,1-0,25	$P(K_{92})$	0,76	0,52	0,35	0,27
10	Отклонение сопротивления цепи контактов от минимального значения, Д*Rк, мОм*	K_{101}	1-10	$P(K_{101})$	0,03	0,08	0,31	0,17
		K_{102}	11-20	$P(K_{102})$	0,09	0,24	0,58	0,69
		K_{103}	20-949	$P(K_{103})$	0,88	0,68	0,11	0,14
11	Время совместного хода, *tсх, мс*	K_{111}	0,03-0,12	$P(K_{111})$	0,86	0,75	0,38	0,16
		K_{112}	0,12-0,3	$P(K_{112})$	0,14	0,25	0,62	0,84
12	Время трогания якоря, *tтр, мс*	K_{121}	0.67-0,9	$P(K_{121})$	0,72	0,78	0,84	0,83
		K_{122}	0,9-1,5	$P(K_{122})$	0,28	0,22	0,16	0,17

Таблица 4

№	Диагностические признаки	K_{js}	Интервалы признаков	$P(K_{js})$	S_1	S_2	S_3	S_4
					Z_{S1}	Z_{S2}	Z_{S3}	Z_{S4}
1	Напряжение срабатывания *Ucp,B*	K_{11}	6,8-7,5	0,222	-0,653	-0,142	0,068	0,233
		K_{12}	7.5-8,4	0,756	0,035	0,355	-0,015	0,093
		K_{13}	8,4-9,4	0,022	0,429	-0,047	-0,348	-0,348
2	Напряжение возврата *Uвозвр, B*	K_{21}	2,5-3,1	0,153	-0,485	0,019	0,046	0,196
		K_{22}	3,1-3,9	0,747	0,113	-0,015	-0,022	-0,095
		K_{23}	>3,9	0,101	-0,705	0,051	0,051	0,176
3	Сопротивление цепи контактов, *Rк, мОм*	K_{31}	13-36	0,969	-0,032	-0,004	0.013	0,013
		K_{32}	36-960	0,031	0,519	0,122	-	-
4	Время срабатывания, *tcp, мс*	K_{41}	1,3-1,9	0,804	-0.042	-0,024	0,028	0,018
		K_{42}	>1,9	0,196	0,140	0,089	-0,14	-0,08
5	Время возврата, *tвозвр, мс*	K_{51}	0,9-1,2	0,732	0,044	-0,001	-0,03	-0.025
		K_{52}	1,2-1,8	0,268	-0,149	0,003	0,073	0,102
6	Время перелета, *tпер, мс*	K_{61}	0,08-0,18	0,755	-0.145	-0.078	0,076	0,071
		K_{62}	0,18-0,8	0,245	0,272	0,178	0,407	-0,348
7	Время дребезга, *tдр,мс*	K_{71}	0,02-0,1	0,148	-0,86	-0,32	0,21	0,172
		K_{72}	0,1-0,3	0,245	-0,611	-0,43	0,19	0,244
		K_{73}	0,3-0,7	0,195	-0,386	-0,085	0,125	0,09
		K_{74}	0,7-1,4	0,412	0,309	0,217	-0,53	-0,575
8	Отклонение напряжений срабатывания от минимального значения, *ДUcp, B*	K_{81}	0,1-0,3	0,499	0,05	-0,017	0,0173	0,065
		K_{82}	0,3-0,6	0,501	-0,055	0,017	-0,008	0,056
9	Отклонение напряжений возврата от минимального значения, *ДUвозвр, B*	K_{91}	0,01-0,1	0,535	-0,348	-0,012	0,088	0,134
		K_{92}	0,1-0,25	0,465	-0,214	0,014	-0,02	-0,235
10	Отклонение сопротивления цепи контактов от минимального значения, *ДRк, мОм*	K_{101}	1-10	0,173	-0,757	-0,33	0,253	-0,007
		K_{102}	11-20	0,407	-0,655	-0,229	0,153	0,229
		K_{103}	20-949	0,420	0,321	0,209	-0,58	-0,477
11	Время совместного хода, *tcx, мс*	K_{111}	0,03-0,12	0,544	0,198	0,139	-0,155	-0,531
		K_{112}	0,12-0,3	0,456	-0,512	-0,26	0,133	0,265
12	Время трогания якоря, *tтр, мс*	K_{121}	0.67-0,9	0,79	0,04	-0,005	0,027	0,026
		K_{122}	0,9-1,5	0,21	0,125	0,02	-0,118	-0,041

В соответствии с [9] формула для оценки диагностического веса признаков имеет вид:

$$Z_{S_i}(K_{js}) = \log\frac{P(K_{js}/S_i)}{P(K_{js})}, \quad (1)$$

Где $P(K_{js}/S_i)$ – вероятность появления интервала S признака K_j для элемента системы с состоянием S_i; $P(K_{js})$ – вероятность одновременного появления каждого интервала каждого признака в каждом рассматриваемом состоянии. Величина $P(K_{js})$ рассчитывается по формуле:

$$P(K_{js}) = \sum_{i=1}^{n} P(S_i)P(K_{js}/S_i), \quad (2)$$

где $P(S_i)$ – априорная вероятность состояния.

Подставив выражение (2) в формулу (1)получим выражение (3)

$$Z_{S_i}(K_{js}) = \log\frac{P(K_{js}/S_i)}{\sum_{i=1}^{n} P(S_i)P(K_{js}/S_i)}. \quad (3)$$

Для расчета значений $Z_{S_i}(K_{js})$ составлена диагностическая матрица, приведенная в таблице 3.

Результаты расчета диагностических весов $Z_{S_i}(K_{js})$ по формуле (3) и вероятности одновременного появления каждого интервала каждого признака в каждом рассматриваемом состоянии $P(K_{js})$, определенные по формуле (2) приведены в таблице 4.

Как следует из таблицы, диагностический вес $Z_{S_i}(K_{js})$ может иметь и положительное и отрицательное значения. Отрицательное значение диагностического веса означает отрицание данного диагноза. Например, $Z_{S_3}(K_{13}) = -0{,}38$ означает отрицание диагноза S_3 по третьему интервалу первого признака. Таким образом, выявлены интервалы и характеристики, имеющие наибольшую ценность для обнаружения дефектов и выявления ненадежных реле.

В соответствии с [9] понятие диагностического веса реализации каждого конкретного признака применимо только к данному диагнозу как его подтверждение или отрицание, что еще не дает представления о диагностической ценности обследования по данному признаку. Диагностическая ценность обследования по признаку K_j для диагноза S_i, которая характеризуется величиной информации, вносимой всеми реализациями признака K_j в установление диагноза S_i (4)

$$Z_{S_i}(K_j) = \sum_{s=1}^{m} Z_{S_i}(K_{js}) P(K_{js} / S_i),$$

$$Z_{S_i}(K_j) = \sum_{s=1}^{m} P(K_{js} / S_i) \log \frac{P(K_{js} / S_i)}{\sum_{i=1}^{n} P(S_i) P(K_{js} / S_i)}, \quad (4)$$

где m – разрядность признака; $Z_{S_i}(K_j)$ – является частной диагностической ценностью обследования по признаку K_j, потому как относится к одному конкретному состоянию.

Общая диагностическая ценность обследования [6] или количество информации, вносимое обследованием в систему диагнозов, рассчитывается по формуле (5):

$$Z_s(K_j) = \sum_{i=1}^{n} Z_{S_i}(K_{js}) P(S_i). \quad (5)$$

Другими словами – это усредненное значение информации, вносимое обследованием для постановки неизвестного заранее диагноза. Значения частной и общей диагностической ценности обследования экспериментальной партии реле приведены в таблице 5.

По значениям общей и частной диагностической ценности обследования можно сделать вывод, о том, что наиболее информативными признаками для рассматриваемого случая являются *tдр, ДRк* и *tсх*.

Следует отметить, что по значениям $Z_{S_i}(K_j)$ можно определять диагностическую ценность обследования в зависимости от величины количества интервалов.

Теперь можно проводить классификацию реле по методу Байеса [9], у которых известны реализации комплекса признаков $K_{компл}$. Для рассматриваемого случая, возьмем реле, подлежащее классификации и имеющее следующие значения наиболее информативных параметров (комплекс признаков):

tдр = 0,26 мс; *ДRк*= 19 мОм; *tсх* =0,06 мс.

Вероятность появления комплекса признаков $K_{компл} = (K_{72}, K_{122}, K_{132})$ при наличии диагноза S_i вычисляется по формуле (6) [9]:

$$P(K_{компл} / S_i) = \\ = P(K_{компл1} / S_i) P(K_{компл2} / S_i) ..... P(K_{комплN} / S_i). \quad (6)$$

Тогда обобщенная формула Байеса принимает вид (7):

$$P(S_i / K_{компл}) = \frac{P(S_i) P(K_{компл} / S_i)}{\sum_{s=1}^{n} P(S_i) P(K_{компл} / S_i)}, \quad (7)$$

Для рассматриваемого случая формула (6) принимает вид:

$P(K_{компл} / S_i) = P(K_{72} / S_i) P(K_{122} / S_i) P(K_{132} / S_i)$

Подставив численные значения, найдем вероятность появления комплекса признаков для каждого диагноза

$P(K_{компл}/S_1)$ = 0,06·0,09·0,14= 0,00076,

$P(K_{компл}/S_2)$= 0,09·0,24·0,25= 0,0054,

$P(K_{компл}/S_3)$= 0,38·0,58·0,62= 0,137,

$P(K_{компл}/S_4)$= 0,43·0,69·0,84= 0,249.

В результате расчета по обобщенной формуле Байеса (6) получаем следующие значения апостериорных вероятностей рассматриваемых четырех состояний $P(S_1/K_{компл})$ = 0,00159; $P(S_2/K_{компл})$ = 0,0168; $P(S_3/K_{компл})$ = 0,594; $P(S_4/K_{компл})$ = 0,387.

Максимальное значение энтропии (первоначальной) или априорная энтропия диагнозов может быть рассчитана по формуле 8:

$$H(S) = -\sum_{i=1}^{n} P(S_i) \log P(S_i), \quad (8)$$

Тогда нетрудно подсчитать, что для данного случая $H(S)$ = –((0,19)×(–0,721)+0,28×(–0,552)+0,39××(–0,408)+0,14×(–0,853) = 0,137+0,154+0,159+0,149=0,569.

После реализации комплекса признаков энтропия такого элемента системы составит:

Таблица 5

№	Признаки	$Z_{S_1}(K_j)$	$Z_{S_2}(K_j)$	$Z_{S_3}(K_j)$	$Z_{S_4}(K_j)$	$Z_{S_5}(K_j)$
1	Напряжение срабатывания,*Uср*	0,023	0,222	0,0033	0,036	0,072
2	Напряжение возврата,*Uвозвр*	0,071	0,0012	0,0015	0,018	0,019
3	Сопротивление цепи контактов, *Rк,*	0,023	0,00065	0,013	0,013	0,011
4	Время срабатывания, *tср*	0,023	0,00312	0,0045	0,023	0,01
5	Время возврата, *tвозвр*	0,0075	0,00005	0,012	0,014	0,02
6	Время перелета, *tпер*	0,047	0,017	0,011	0,024	0,059
7	Время дребезга, *tдр*	0,259	0,076	0,22	0,101	0,166
8	Отклонение напряжений срабатывания от минимального значения, Д*Uср*	0,004	0,00077	0,005	0,06	0,035
9	Отклонение напряжений отпускания от минимального значения, Д*Uвозвр*	0,099	0.0029	0,005	0,034	0,005
1	Отклонение сопротивления цепи контактов от минимального значения, Д*Rк*	0,2	0,068	0,103	0,09	0,107
1	Время совместного хода, *tсх*	0,098	0,039	0,141	0,138	0,103
1	Время трогания якоря, *tтр*	0,064	0,00011	0,003	0,01	0,014

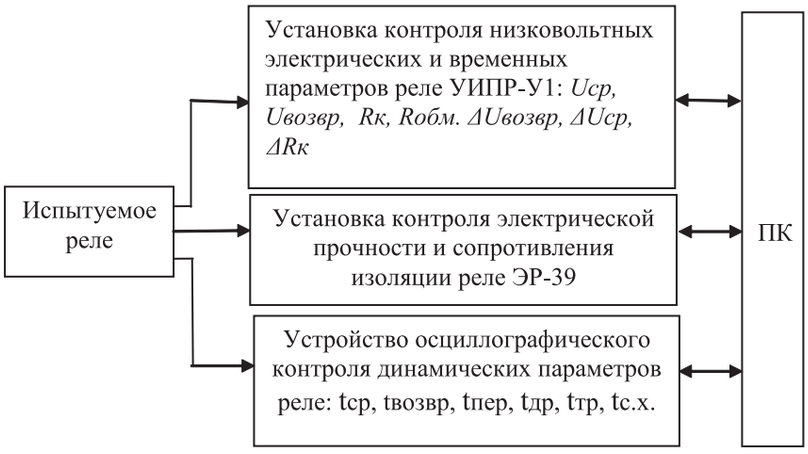


Рис. 1. Структурная схема системы определения электрических и временных параметров реле

$$H(S/K) = -\sum_{i=1}^{n} P(S_i/K_i)\log P(S_i/K_{компл}).$$

$$H(S/K) = -(0,00159\cdot\log 0,00159 + 0,0168\cdot\log 0,0168 + +0,594\cdot\log 0,594 + 0,387\cdot\log 0,387 = 0,00444 + 0,03 + +0,1343 + 0,16 = 0,328$$

Степень неопределенности или остаточная энтропия составит 0,569-0,328=0,241.

Таким образом можно сделать вывод, что система достаточно определенна и данный экземпляр реле должен быть отнесен к третьей категории технического состояния.

Для измерения электрических и временных параметров, определяемых при диагностике реле, используется разработанное контрольно-измерительное оборудование (рис. 1): установки УИПР-У1, ЭР-40 и автоматизированное устройство контроля динамических характеристик реле, фотографии которых приведены на рис. 2 – 4[11].

Надо отметить, что вышеперечисленные установки являются автоматизированными и имеют выход на персональный компьютер. Рассмотрение принципов работы установок является отдельной темой и выходит за рамки данной статьи.

Для классификации реле и отбора наиболее информативных параметров разработано программное обеспечение. На рис. 5 приведено окно классификации реле.

Здесь присутствуют три логические части: коэффициенты классификации, данные для расчета и сводная таблица с параметрами реле и результатами контроля.

С помощью программного обеспечения в представленном окне производится загрузка данных алгоритма классификации, полученных в результате обучения, и осуществляется заполнение измеренными значениями параметров. Также производятся расчеты по классификации экземпляров реле и сохранение результатов классификации в формате Excel. Имеется возможность изменения набора параметров, по значениям которых будет производиться классификация (рис.6).

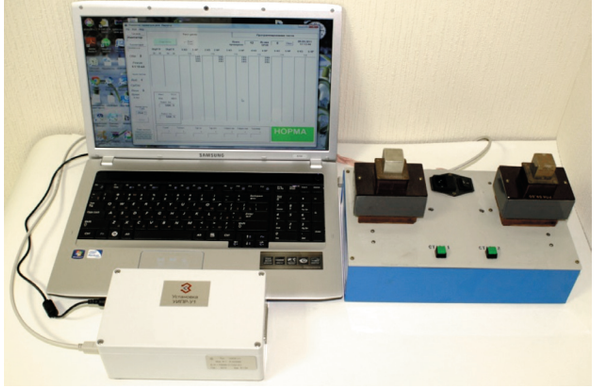


Рис. 2. Установка контроля низковольтных параметров реле УИПР-У1

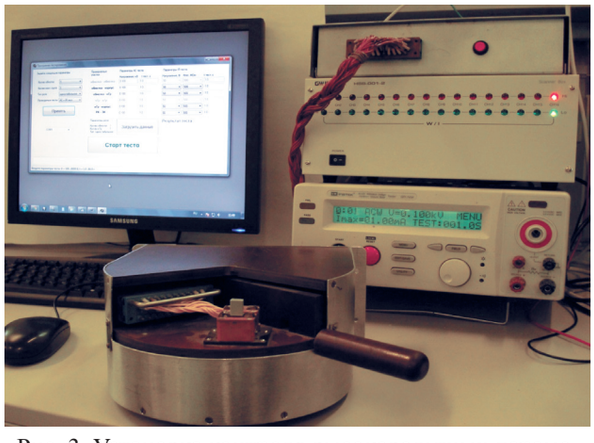
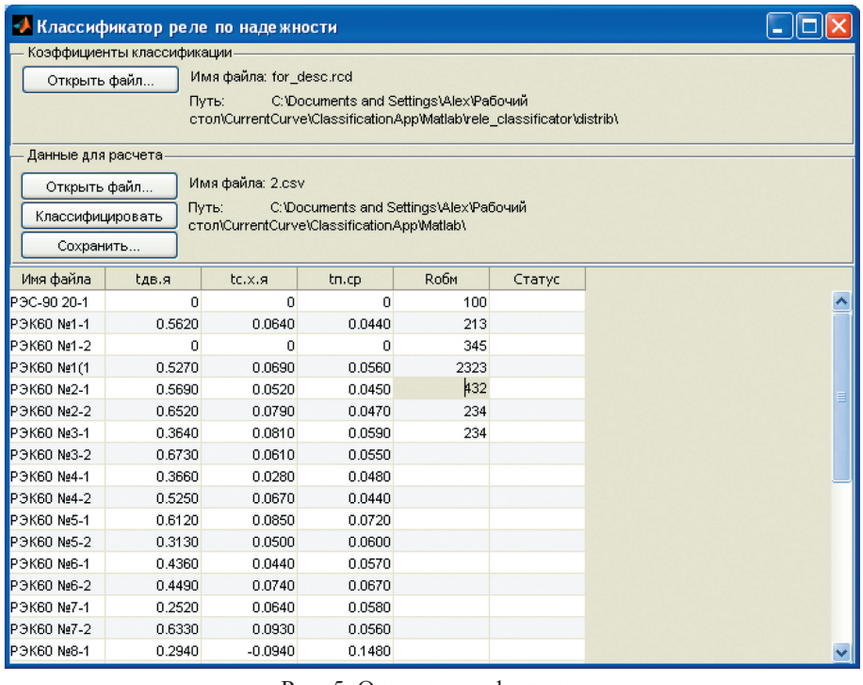


Рис. 3. Установка контроля высоковольтных параметров реле ЭР-40

Рис. 4. Автоматизированное устройство контроля временных параметров реле осциллографическим методом



Имя файла	tдв.я	tс.х.я	tп.ср	Робм	Статус
РЭС-90 20-1	0	0	0	100	
РЭК60 №1-1	0.5620	0.0640	0.0440	213	
РЭК60 №1-2	0	0	0	345	
РЭК60 №1(1	0.5270	0.0690	0.0560	2323	
РЭК60 №2-1	0.5690	0.0520	0.0450	432	
РЭК60 №2-2	0.6520	0.0790	0.0470	234	
РЭК60 №3-1	0.3640	0.0810	0.0590	234	
РЭК60 №3-2	0.6730	0.0610	0.0550		
РЭК60 №4-1	0.3660	0.0280	0.0480		
РЭК60 №4-2	0.5250	0.0670	0.0440		
РЭК60 №5-1	0.6120	0.0850	0.0720		
РЭК60 №5-2	0.3130	0.0500	0.0600		
РЭК60 №6-1	0.4360	0.0440	0.0570		
РЭК60 №6-2	0.4490	0.0740	0.0670		
РЭК60 №7-1	0.2520	0.0640	0.0580		
РЭК60 №7-2	0.6330	0.0930	0.0560		
РЭК60 №8-1	0.2940	-0.0940	0.1480		

Рис. 5. Окно классификации

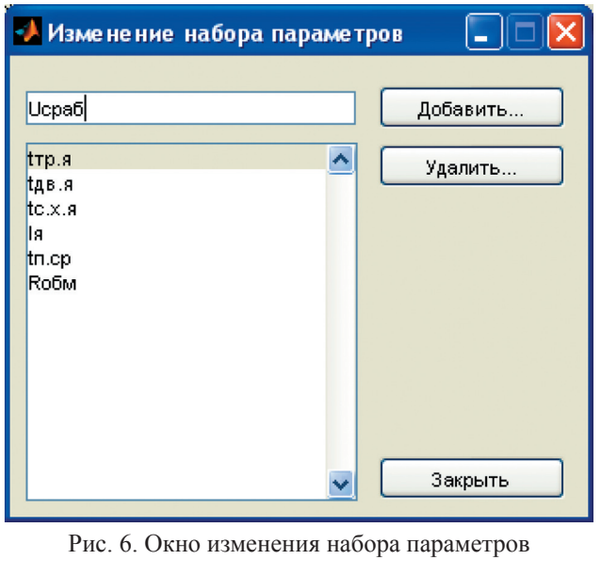


Рис. 6. Окно изменения набора параметров

В данном окне можно изменять номенклатуру параметров реле для расчетов, удалять выделенные параметры и добавлять новые. Таблица параметров в окне классификации будет меняться в соответствии с новым списком.

Для установления диагноза проведена классификация реле РЭС47 по наиболее информативным параметрам с последующим проведением испытаний на износостойкость. При этом, ошибки (первого рода), отнесения годных реле к бракованным, составили и ошибки (второго рода) не превысили 4%.

Проведенные экспериментальные исследования показали, что использование автоматизированных установок и устройств контроля позволяет с необходимой достоверностью производить классификацию реле, а также приводят к общему снижению трудоемкости выполнения контрольных операций и диагностики реле. Причем, следует отметить возможность применения данного оборудования для классификации реле по значениям электрических и временных параметров, как при вероятностном, так и при детерминистском подходе распознавания технического состояния реле.

Литература

1. Малащенко А.А. Электромагнитные реле // Электронные компоненты.-2003.-№7.-с.17-29.

2. Борисов Ю.И. Отечественная электронная промышленность и компонентная база. Перспективы развития. //Электроника: Наука. Технология. Бизнес.- 2006, №8, с.4-10.

3. Малащенко А.А. Преобразовательные устройства скачкообразного действия // Электронные компоненты.-2004.-№9.-с.1-3.

4.Гуревич В.И. электрические реле: устройство, принцип действия и применение. – М.:СОЛОН-ПРЕСС, 2011.-688 с.

5. Семенихин В.Н., Камышный В.П. Проблемы и практика диагностирования электромагнитных реле // Техника средств связи, серия ТПС.-1985.- вып. 5.- с.7-17.

6.ГОСТ 16121-86 Реле слаботочные электромагнитные. Общие технические условия. – М.: Издательство стандартов, 1987г., 56 с.

7. ГОСТ 24297-87 Входной контроль продукции. Основные положения. – М.: Издательство стандартов, 1987г., 9 с.

8. Фомин Я.А., Тарловский Г.Д. Статистическая теория распознавания образов.- М.:Радио и связь,1986.-264 с.

9. Биргер И.А. Техническая диагностика. -М.: «Машиностроение», 1978.-240 с.

10. Выбор наиболее информативных параметров слаботочных реле для прогнозирования надежности. /Ветров Л. Г., Красинский Ю.В., Мироненко А.Ф., Тимонин В.И. // Ж. Техника средств связи, серия ТПС.-1991.-Вып.9.- С.21-26.

11. Технические условия Установка измерения параметров реле УИПР-У1 РВИМ.411259.001ТУ.

Lavrov V.A., Durnev A.V.

METHODS AND MEANS OF DIAGNOSTIC CONTROL OF LOW-CURRENT ELECTROMAGNETIC RELAYS

The article covers the methods and means of quality control and identification of dependable low-current electromagnetic relays based on the diagnostic value of properties. Software is suggested for selection of the most informative parameters and dependability classification of relays.

Keywords: *relay diagnostics, relay control, relay characteristics, potentially undependable relay, informative relay parameters.*

The quality of electronic equipment (EE) used in various industries and special technology (military, space, medical, etc.) largely depends on the used electronic components [1, 2]. One of the widest and longest used EE components is the electromagnetic low-current hermetically sealed relay (further referred to as relay), the production of which has been on the rise over the last years [3, 4]. That is why it is important to have diagnostic tools able of identifying the quality of manufacture and forecast their operational dependability.

Today's manufacturing procedures still let faulty relays go to the consumers. The defects (a defect should be understood as a relay parameter outside the standard value set forth in the technical specifications) are uncovered at each lifecycle step of relays, namely delivery, acceptance test and operation. The most common defect is non-compliance of pick-up and drop-off voltage (current) with the standard values set forth in the technical specifications. They are followed by defects due to excessive time parameters, circuit resistance of contacts and short disruptions of field circuits. Given the application area of relays we can say that the problems related to the development and implementation of efficient measures of prevention and identification of the above defects and elimination of their marketing are of utmost importance to the improvement of product quality [5].

Practical experiments have shown that identifying relays with excessive values of actuation level, time parameters and circuit resistance of contacts must be performed by means of multiple measurements of those parameters. Each measurement is performed during or upon completion of switching actions. 20 to 30 switching actions are optimal. It should be noted that regulatory documents [6] prescribe a single measurement of those parameters. It has been found that deviations of one or another parameter (even if it is within the standard prescribed in technical specifications) from measurement to measurement indicates that the relay will be unstable in further operation. Those factors play a great role in identifying potentially undependable relays. As an example, tables 1 and 2 show the parameters of two faulty relays of REK60 and RPS45 types. Actuation levels (sensitivity) were measured 10 times, while circuit resistance of contacts was measured 30 times.

As control results show (Tables 1, 2), excessive circuit resistance values of NC and NO contacts Rc (100 mOhm is normal) were identified at the third, fifth and from the nineteenth to twenty-third, while pick-up voltages Upu1 and Upu2 (14,5 V is normal) at the fifth and

Table 1. Results of REK60 relay contacts resistance measurements

Contacts' resistance, mOhm				
No. of test	NZ 1	NP 1	NZ 2	NP 2
1	50	82	53	56
2	68	58	51	55
3	101	62	52	55
4	67	53	52	55
5	54	601	51	55
6	52	71	52	55
7	93	93	53	55
8	60	53	52	55
9	51	54	51	55
10	52	53	52	55
11	50	53	52	55
12	51	53	52	55
13	51	53	53	55
14	50	53	53	55
15	51	53	53	55
16	50	53	52	55
17	51	53	53	55
18	51	53	52	55
19	51	85	53	55
20	234	173	52	55
21	54	649	53	55
22	138	93	53	55
23	140	55	53	55
24	53	59	53	55
25	53	53	52	55
26	51	53	52	55
27	50	53	53	55
28	51	55	52	55
29	53	58	53	55
30	52	62	53	55
31				

nineteenth measurements respectively. With a single measurement of the parameters those defects could not be uncovered, and the relays identified as fit would have made it to the consumers. The acceptance test [7] would not identify anything either if performed once. In fact, excessive pick-up voltage and circuit resistance of contacts indicates that in some switching actions the relay did not perform its functions (did not comply with the technical specifications).

As it is well known there are two main approaches to identifying the condition of a system (in this case a relay): deterministic and probabilistic ones [8, 9].

Paper [10] covers discriminant analysis methods that can be attributed to the deterministic approach to classification and choice of the most informative parameters. As the diagnostic indicators the authors use eight time parameters of relays obtained by manual oscillographic method. The main disadvantage of the method is the limited range of covered indicators for classification. The authors, in particular, did not use electric parameters of relays. Diagnostic procedures based on this range of measured parameters with single measurement can result (as shown above) in as significant reduction of classification accuracy. The values of time parameters within normal limits do not guarantee normal values of electrical parameters. For example, REK60 and RPS45 mentioned above have normal time parameters. One of the possible ways to improve the quality and accuracy of diagnostics based on this method is the extension of the list of covered indicators and automation of the measurement of electric and time parameters of relays.

It should be also noted that in order to obtain the time parameters the authors used the labor intensive manual oscillographic method that practically does not allow for multiple measurements. Although back then that method of obtaining the values of parameters was completely justified.

Over the last few years the equipment used in the diagnostics and quality control of low-current electromagnetic relays has experienced significant changes. In particular, a number of automated installations have been developed for the purpose of measuring electrical and time parameters of relays using computer technology and enabling multiple measurements of electric and time parameters of relays with subsequent statistical processing.

This article explores the possibilities of using the statistical probabilistic method in identifying the technical condition of relays. The authors consider various methods, devices and software for identification of the technical condition and classification of relays by values of electric and time parameters, as well as their evolution over multiple measurements using information theory methods.

Relays dependability classification and evaluation of informative value of indicators has been performed based on a priori statistics of diagnostics with calculation of diagnostic weights and diagnostic value of the inspection.

The most reliable information regarding switching longevity of low-current electromagnetic relays is provided by wear tests. In order to define a relay's lifespan it is required to identify a range of properties that describe its technical condition in the best possible way.

Electric and time parameters of relays are used as diagnostic indicators. A diagnosis is the number of fault-free switching actions performed in a certain electrical mode.

It should be noted that the generation of the diagnostic matrix, identification of the most informative parameters and classification of relays by diagnostic weights must be performed individually for each type of relay depending on its operating mode.

In the given example the diagnostic weight of the RES47 relay indicators is identified. The set of diagnostic indicators K_{js} includes 12 relay parameters defined before the wear tests.

The experiment featured 96 RES47 relays with a set of electric and time parameters (indicators). During the wear tests with active load on contacts (36 V, 3 A, direct current) the follow-

Table 2. Results of RPS45 relay pick-up voltage measurements

Sensitivity checkup						
No. of test	Upu1 V	Upu2 V		No. of test	Upu1 V	Upu2 V
1	11,77	11,53		6	13,78	11,54
2	12,83	11,52		7	14,16	11,54
3	13,4	11,53		8	14,35	11,45
4	13,3	11,52		9	15,34	11,56
5	14,75	11,55		10	14,17	11,54

ing diagnoses were made (categories of technical conditions) based on the numbers of fault-free switching actions:

- S1, up to 7 thousand;
- S2, from 7 to 15 thousand;
- S3, from 15 to 23 thousand;
- S4, above 23 thousand.

As per [9], the formula for diagnostic weight evaluation is as follows:

$$Z_{S_i}(K_{js}) = \log \frac{P(K_{js} / S_i)}{P(K_{js})}, \quad (1)$$

where $P(K_{js}/S_i)$ is the probability of the interval S of indicator K_j for a system components with condition S_i; $P(K_{js})$ is the probability of simultaneous occurrence of each interval of each indicator in each condition considered. The value $P(K_{js})$ is calculated using the following formula:

$$P(K_{js}) = \sum_{i=1}^{n} P(S_i)P(K_{js} / S_i), \quad (2)$$

where $P(S_i)$ is the a priori probability of a condition.

By plugging formula (2) into formula (1) we get formula (3)

$$Z_{S_i}(K_{js}) = \log \frac{P(K_{js} / S_i)}{\sum_{i=1}^{n} P(S_i)P(K_{js} / S_i)}. \quad (3)$$

In order to calculate values $Z_{S_i}(K_{js})$ the diagnostic matrix was generated as shown in Table 3.

The results of diagnostic weights calculation $Z_{S_i}(K_{js})$ according to formula (3) and probabilities of simultaneous occurrence of each interval of each indicator in each considered condition $P(K_{js})$ defined using formula (2) are given in Table 4.

As the table shows, the diagnostic weight $Z_{S_i}(K_{js})$ can be either positive or negative. A negative diagnostic weight means the negation of the diagnosis. For example, $Z_{S_3}(K_{13}) = -0{,}38$ means the negation of diagnosis S_3 for the third interval of the first indicator. Thus are identified the intervals and characteristics that are the most valuable for uncovering defects and undependable relays.

Table 3

No	Diagnostic indicators	K_{js}	Indicator intervals	$P(K_{js})$	S_1	S_2	S_3	S_4
					$P(S_1) = 0{,}19$	$P(S_2) = 0{,}28$	$P(S_3) = 0{,}39$	$P(S_4) = 0{,}14$
					$P(K_{js}/S_1)$	$P(K_{js}/S_2)$	$P(K_{js}/S_3)$	$P(K_{js}/S_4)$
1	Pick-up voltage *Upu, V*	K_{11}	6,8-7,5	$P(K_{11})$	0,12	0,16	0,26	0,38
		K_{12}	7,5-8,4	$P(K_{12})$	0,82	0,82	0,73	0,61
		K_{13}	8,4-9,4	$P(K_{13})$	0,06	0,02	0,01	0,01
2	Return voltagea *Ureturn, V*	K_{21}	2,5-3,1	$P(K_{21})$	0,05	0,16	0,17	0,24
		K_{22}	3,1-3,9	$P(K_{22})$	0,93	0,72	0,71	0,6
		K_{23}	>3,9	$P(K_{23})$	0,02	0,12	0,12	0,16
3	Resistance of contact circuits, *Rc, mOhm*	K_{31}	13-36	$P(K_{31})$	0,9	0,96	1.0	1,0
		K_{32}	36-960	$P(K_{32})$	0,1	0,04	-	-
4	Action time, *tact, ms*	K_{41}	1,3-1,9	$P(K_{41})$	0.73	0,76	0,86	0,84
		K_{42}	>1,9	$P(K_{42})$	0,27	0,24	0,14	0,16
5	Return time, *treturn, ms*	K_{51}	0,9-1,2	$P(K_{51})$	0,81	0,73	0,71	0.69
		K_{52}	1,2-1,8	$P(K_{52})$	0,19	0,27	0,29	0,31
6	Flyover time, *tfly, ms*	K_{61}	0,08-0,18	$P(K_{61})$	0.54	0.63	0,9	0,89
		K_{62}	0,18-0,8	$P(K_{62})$	0,46	0,37	0,1	0,11
7	Bounce time, *tb, ms*	K_{71}	0,01-0,1	$P(K_{71})$	0,02	0,07	0,24	0,22
		K_{72}	0,1-0,3	$P(K_{72})$	0,06	0,09	0,38	0,43
		K_{73}	0,3-0,7	$P(K_{73})$	0,08	0,16	0,26	0,24
		K_{74}	0,7-1,4	$P(K_{74})$	0,84	0,68	0,12	0,11
8	Deviation of pick-up voltages from minimal values, ДUpu, V	K_{81}	0,1-0,3	$P(K_{81})$	0,56	0,48	0,51	0,43
		K_{82}	0,3-0,6	$P(K_{82})$	0,44	0,52	0,49	0,57
9	Deviation of return voltages from minimal values, Д*Ureturn, V*	K_{91}	0,01-0,1	$P(K_{91})$	0,24	0,48	0,65	0,73
		K_{92}	0,1-0,25	$P(K_{92})$	0,76	0,52	0,35	0,27
10	Deviation of contact circuit resistance from minimal value, Д*Rc, mOhm*	K_{101}	1-10	$P(K_{101})$	0,03	0,08	0,31	0,17
		K_{102}	11-20	$P(K_{102})$	0,09	0,24	0,58	0,69
		K_{103}	20-949	$P(K_{103})$	0,88	0,68	0,11	0,14
11	Follow time, *tfol, ms*	K_{111}	0,03-0,12	$P(K_{111})$	0,86	0,75	0,38	0,16
		K_{112}	0,12-0,3	$P(K_{112})$	0,14	0,25	0,62	0,84
12	Armature start time, *tstart, ms*	K_{121}	0.67-0,9	$P(K_{121})$	0,72	0,78	0,84	0,83
		K_{122}	0,9-1,5	$P(K_{122})$	0,28	0,22	0,16	0,17

Table 4

№	Diagnostic indicators	K_{js}	Indicator intervals	$P(K_{js})$	S_1 / Z_{S1}	S_2 / Z_{S2}	S_3 / Z_{S3}	S_4 / Z_{S4}
1	Pick-up voltage *Upu, V*	K_{11}	6,8-7,5	0,222	-0,653	-0,142	0,068	0,233
		K_{12}	7.5-8,4	0,756	0,035	0,355	-0,015	0,093
		K_{13}	8,4-9,4	0,022	0,429	-0,047	-0,348	-0,348
2	Return voltagea *Ureturn, V*	K_{21}	2,5-3,1	0,153	-0,485	0,019	0,046	0,196
		K_{22}	3,1-3,9	0,747	0,113	-0,015	-0,022	-0,095
		K_{23}	>3,9	0,101	-0,705	0,051	0,051	0,176
3	Resistance of contact circuits, *Rc, mOhm*	K_{31}	13-36	0,969	-0,032	-0,004	0.013	0,013
		K_{32}	36-960	0,031	0,519	0,122	-	-
4	Action time, *tact, ms*	K_{41}	1,3-1,9	0,804	-0.042	-0,024	0,028	0,018
		K_{42}	>1,9	0,196	0,140	0,089	-0,14	-0,08
5	Return time, *treturn, ms*	K_{51}	0,9-1,2	0,732	0,044	-0,001	-0,03	-0.025
		K_{52}	1,2-1,8	0,268	-0,149	0,003	0,073	0,102
6	Flyover time, *tfly, ms*	K_{61}	0,08-0,18	0,755	-0.145	-0.078	0,076	0,071
		K_{62}	0,18-0,8	0,245	0,272	0,178	0,407	-0,348
7	Bounce time, *tb, ms*	K_{71}	0,02-0,1	0,148	-0,86	-0,32	0,21	0,172
		K_{72}	0,1-0,3	0,245	-0,611	-0,43	0,19	0,244
		K_{73}	0,3-0,7	0,195	-0,386	-0,085	0,125	0,09
		K_{74}	0,7-1,4	0,412	0,309	0,217	-0,53	-0,575
8	Deviation of pick-up voltages from minimal values, ДUpu, V	K_{81}	0,1-0,3	0,499	0,05	-0,017	0,0173	0,065
		K_{82}	0,3-0,6	0,501	-0,055	0,017	-0,008	0,056
9	Deviation of return voltages from minimal values, *ДUreturn, V*	K_{91}	0,01-0,1	0,535	-0,348	-0,012	0,088	0,134
		K_{92}	0,1-0,25	0,465	-0,214	0,014	-0,02	-0,235
10	Deviation of contact circuit resistance from minimal value, *ДRc, mOhm*	K_{101}	1-10	0,173	-0,757	-0,33	0,253	-0,007
		K_{102}	11-20	0,407	-0,655	-0,229	0,153	0,229
		K_{103}	20-949	0,420	0,321	0,209	-0,58	-0,477
11	Follow time, *tfol, ms*	K_{111}	0,03-0,12	0,544	0,198	0,139	-0,155	-0,531
		K_{112}	0,12-0,3	0,456	-0,512	-0,26	0,133	0,265
12	Armature start time, *tstart, ms*	K_{121}	0.67-0,9	0,79	0,04	-0,005	0,027	0,026
		K_{122}	0,9-1,5	0,21	0,125	0,02	-0,118	-0,041

According to [9], the concept of diagnostic weight of realization of each particular indicator is applicable only to the given diagnosis as its confirmation or negation, which does not yet indicate the diagnostic value of studies based on that indicator. The diagnostic value of studies according to indicator K_j for diagnosis S_i that is characterized by the amount of information introduced by all realizations of indicator K_j in the establishment of diagnosis S_i (4)

$$Z_{S_i}(K_j) = \sum_{s=1}^{m} Z_{S_i}(K_{js}) P(K_{js} / S_i)$$

$$Z_{S_i}(K_j) = \sum_{s=1}^{m} P(K_{js} / S_i) \log \frac{P(K_{js} / S_i)}{\sum_{i=1}^{n} P(S_i) P(K_{js} / S_i)}, \quad (4)$$

where m is the resolution of the indicator.

$Z_{S_i}(K_j)$ is a specific diagnostic value of study based on indicator K_j, because it refers to a single specific condition.

The overall diagnostic value of study [6] or the amount of information introduced by the study in the system of diagnoses is calculated according to formula (5):

$$Z_s(K_j) = \sum_{i=1}^{n} Z_{S_i}(K_{js}) P(S_i). \quad (5)$$

In other words, that is the average value of information introduced by the study for the purpose of establishing the a-priori unknown diagnosis. The specific and general diagnostic values of study of an experimental batch of relays are given in Table 5

Based on general and specific diagnostic values of a study the conclusion can be made that the most informative indicators for the considered case are *tb, ΔRc and tfol.*

It should be noted that values $Z_{S_i}(K_j)$ can be used to identify the diagnostic value of the study depending on the number of intervals.

Now when realizations of a complex of indicators are known, relays can be classified using the Bayesian approach K_{compl} [9]. For the considered case let us take a relay to be classified that has the following values of the most informative parameters (set of indicators):

tb = 0,26 ms; ΔRc= 19 mOhm; tfol =0,06 ms.

The probability of occurrence of the set of indicators $K_{compl} = (K_{72}, K_{122}, K_{132})$ given the presence of diagnosis S_i is calculated using formula 6) [9].

Table 5

№	Indicatiors	$Z_{S_1}(K_j)$	$Z_{S_2}(K_j)$	$Z_{S_3}(K_j)$	$Z_{S_4}(K_j)$	$Z_{S_5}(K_j)$
1	Pick-up voltage,*Upu*	0,023	0,222	0,0033	0,036	0,072
2	Return voltage,*Ureturn*	0,071	0,0012	0,0015	0,018	0,019
3	Resistance of contact circuits, *Rc,*	0,023	0,00065	0,013	0,013	0,011
4	Action time, *tact*	0,023	0,00312	0,0045	0,023	0,01
5	Return time, *treturn*	0,0075	0,00005	0,012	0,014	0,02
6	Flyover time, *tfly*	0,047	0,017	0,011	0,024	0,059
7	Bounce time, *tb*	0,259	0,076	0,22	0,101	0,166
8	Deviation of pick-up voltages from minimal values, *ДUpu*	0,004	0,00077	0,005	0,06	0,035
9	Deviation of drop-off voltages from minimal values, Δ*Ureturn*	0,099	0.0029	0,005	0,034	0,005
10	Deviation of contact circuit resistance from minimal value, *ДRc*	0,2	0,068	0,103	0,09	0,107
11	Follow time, *tfol*	0,098	0,039	0,141	0,138	0,103
12	Armature start time, *tstart*	0,064	0,00011	0,003	0,01	0,014

$$P(K_{compl} / S_i) = \\ = P(K_{compl1} / S_i)P(K_{compl2} / S_i).....P(K_{complN} / S_i). \quad (6)$$

Then the generalized Bayesian formula is as (7)

$$P(S_i / K_{compl}) = \frac{P(S_i)P(K_{compl} / S_i)}{\sum_{s=1}^{n} P(S_i)P(K_{compl} / S_i)}, \quad (7)$$

For the considered case formula (6) is as:

$$P(K_{compl} / S_i) = P(K_{72} / S_i)P(K_{122} / S_i)P(K_{132} / S_i)$$

By inserting the numerical values we will find the probability of set of indicators occurring for each diagnosis

$P(K_{compl}/S_1) = 0,06 \cdot 0,09 \cdot 0,14 = 0,00076,$

$P(K_{compl}/S_2) = 0,09 \cdot 0,24 \cdot 0,25 = 0,0054,$

$P(K_{compl}/S_3) = 0,38 \cdot 0,58 \cdot 0,62 = 0,137,$

$P(K_{compl}/S_4) = 0,43 \cdot 0,69 \cdot 0,84 = 0,249.$

As the result of calculation using the generalized Bayesian formula (6) we deduce the following values of a-posteriori probabilities of the four considered conditions $P(S_1/K_{compl}) = 0,00159$; $P(S_2/K_{compl}) = 0,0168$; $P(S_3/K_{compl}) = 0,594$; $P(S_4/K_{compl}) = 0,387$.

The maximum value of entropy (initial) of the a-priori entropy of the diagnoses can be calculated according to formula 8).

$$H(S) = -\sum_{i=1}^{n} P(S_i) \log P(S_i), \quad (8)$$

Then it is not difficult to calculate that for this case

$H(S) = -((0,19) \times (-0,721) + 0,28 \times (-0,552) + 0,39 \times \times (-0,408) + 0,14 \times (-0,853) = 0,137 + 0,154 + 0,159 + 0,149 = 0,569.$

After the realization of the set of indicators the entropy of such element will be as follows:

$$H(S / K) = -\sum_{i=1}^{n} P(S_i / K_i) \log P(S_i / K_{compl}).$$

$$H(S / K) = -(0,00159 \cdot \log 0,00159 + 0,0168 \cdot \log 0,0168 + \\ + 0,594 \cdot \log 0,594 + 0,387 \cdot \log 0,387 = 0,00444 + 0,03 + \\ + 0,1343 + 0,16 = 0,328$$

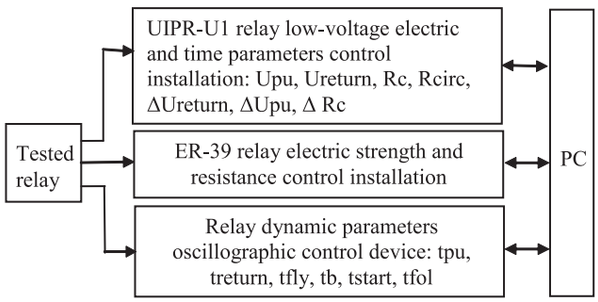


Fig. 1. Architecture of relay electric and time parameters identification system

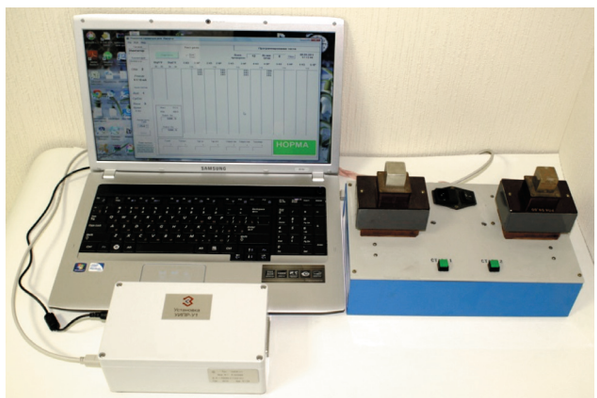


Fig. 2. UIPR-U1 relay low-voltage parameters control installation

The degree of uncertainty or residual entropy will amount to 0,569-0,328=0,241. Thus, we can conclude that the system is quite determined and the relay must be included in the third category of technical condition .

The measurement of electric and time parameters determined through relay diagnostics is performed using purpose-designed monitoring and measuring devices (fig.1): UIPR-U1 and ER-40 installations and the automated device for relay dynamic characteristics control depicted in fig. 2 – 4[11].

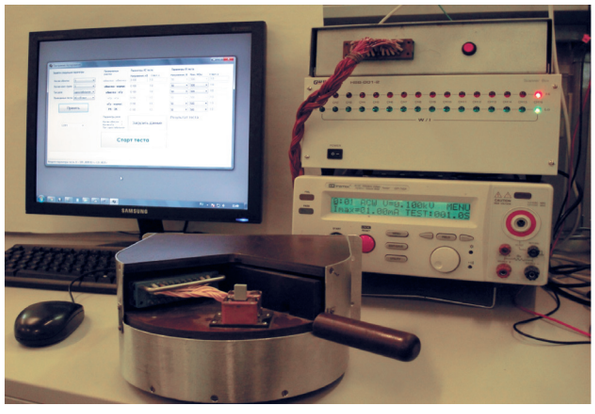


Fig. 3. ER-40 relay high-voltage parameters control installation

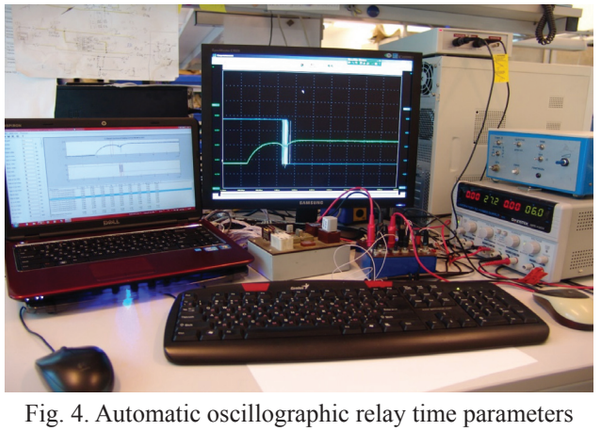


Fig. 4. Automatic oscillographic relay time parameters control device

It should be noted that the above installations are automated and have a PC interface. Their operating principle is a topic apart that is beyond the subject area of this article.

Software has been developed for relay classification and selection of the most informative parameters. Fig. 5 shows the relay classification window.

There are three logical parts: classification coefficients, calculation data and summary table with relay parameters and control results.

The software downloads and displays in the window the classification algorithm data obtained as the result of training, then fills it with measured parameter values. The program also performs calculations for relay classification and saves the results in an Excel file. It is possible to modify the list of parameters used in the classification operation (fig. 6).

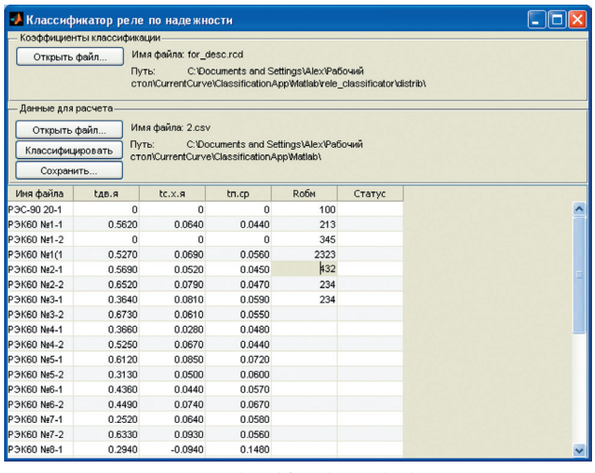


Fig. 5. Classification window

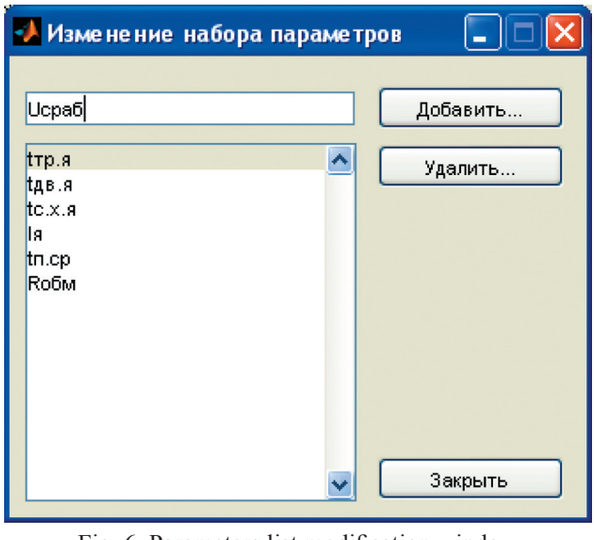


Fig. 6. Parameters list modification window

In this window the list of relay parameters for calculation can be modified, highlighted parameters can be deleted and new ones added. The parameters table in the classification window will change according to the new list.

In order to establish the diagnosis, RES47 relays were classified based on the most informative parameters with subsequent durability testing. The errors (first type), misclassifications of fit relays amounted to and the errors (second type) did not exceed 4%.

The experimental studies have shown that the use of automated installations and control devices allows classifying relays with the required level of accuracy, as well as reduces the overall labor intensiveness of control operations and relay diagnostics. It should also be noted that this equipment can be used for classification of relays by

electrical and time parameters using either the probabilistic or deterministic approach to relay technical condition identification.

References

1. Malashchenko A.A. Electromagnetic relays. Elektonnie komponenti. 2003. No. 7, p. 17 – 29.

2. Borisov Yu.I. Russian electronic industry and components. Development outlooks. Electronika: Nauka. Tekhnologia. Biznes. 2006. No.8, p. 4 – 10.

3. Malashchenko A.A. Abrupt converter installations. Elektronnie komponenti. 2004. No. 9, p. 1 – 3.

4. Gurevich V.I. Electric relays: design, operating principle and application. Moscow. Solon-Press. 2011, 688 p.

5. Semenikhin V.N., Kamyshny V.P. Problems and practice of electromagnetic relays diagnostics. Tekhnika sredstv sviazi, seria TPS. 1985. Issue 5, p. 7 – 17.

6. GOST 16121-86 Low-current electromagnetic relays. General technical requirements. Moscow: Izdatelstvo standartov. 1987, 56 p.

7. GOST 24297-87 Incoming products inspection. General provisions. Moscow: Izdatelstvo standartov. 1987, 9 p.

8. Fomin Yu.A., Tarlovsky G.D. Statistical theory of pattern recognition. Moscow. Radio i sviaz. 1986, 264 p.

9. Birger I.A. Technical diagnostics. Moscow. Mashinostroenie. 1978, 240 p.

10. Selection of the most informative parameters of low-current relays for dependability forecasting. Vetrov, L.G., Krasinsky, Yu.V., Mironenko, A.F., Timonin, V.N. Tekhnika sredstv sviazi, seria TPS. 1991. Issue 9, p. 21 – 26.

11. Technical requirements. UIPR-U1 RVIM. 411259.001TU relays perameters measurement installation.

Потапов И. В.

ПРОБЛЕМАТИКА В ОБЛАСТИ НАДЕЖНОСТИ ПРОГРАММНЫХ СИСТЕМ

В рамках методологии системного анализа в области изучения надежности программных систем рассматриваются основные проблемы, задачи и способы их решения. Представлены мнения о решении проблем надежности программных систем. Рассматриваемые проблемы упорядочены и систематизированы.

Ключевые слова: надежность, программное средство, программная система.

Введение

Уже в конце прошлого века наметилась тенденция к существенному перераспределению мирового рынка информационных технологий в пользу программного обеспечения (ПО). Сейчас средства вычислительной техники используются повсеместно. Это обусловливает интерес пользователей и разработчиков программных систем (ПС) к созданию качественной программной продукции, отвечающей требованиям современных мировых стандартов. Не останавливаясь подробно на общих вопросах, отметим одну важную особенность: в тех случаях, когда к функционированию систем с использованием вычислительной техники предъявляются повышенные требования по качеству, часто подразумевают такие свойства как надежность и безопасность ПО. В данной работе речь пойдет именно о надежности, как она понимается в технике, а не о других свойствах, характеризуемых близкими по смыслу понятиями — «точность», «достоверность», «правдоподобие» и т. п.

В технологии разработки ПС при описании, изучении и проектировании широко используется методология системного анализа. Изучение надежности ПС тоже может опираться на эту методологию. Одной из важнейших стадий системного анализа является формирование проблематики [1]. В данной работе делается попытка обобщения проблем и задач пользователей и разработчиков надежного ПО. Формат журнальной публикации требует некоторого преобразования информации, получаемой при формировании проблематики, представленной в исходном виде «клубком» проблем. Можно рассматривать это преобразование как некоторую адаптацию исходного набора данных, сообщаемых заинтересованными сторонами. В литературе по системному анализу рекомендуется проводить упорядочение, классификацию и структурирование проблематики, что отчасти сделано в данной работе. В качестве цитируемых печатных источников выбраны основополагающие работы, отражающие важные идеи и тенденции, характерные для проблематики в области надежности ПС. Многие проблемы и задачи, возникающие перед современными исследователями, разработчиками и пользователями, являются фундаментальными в данной области знаний, поэтому цитируемые авторы и их публикации, включая самые ранние, вполне могут рассматриваться в качестве источников формирования основ проблематики. В качестве дополнительной цели данной работы можно указать

необходимость систематизации и анализа публикаций в области надежности программных систем.

Формирование проблематики

Специалисты часто указывают на то, что программные системы (например, в работе [2] — комплексы программ) являются сложными в том смысле, который вкладывают в это понятие исследователи в области теории систем и системного анализа. Это во многом определяет базовые проблемы и задачи разработки надежных ПС, среди которых основное внимание уделяется проектированию, отладке программ и диагностированию программных ошибок, контролю правильности функционирования отдельных компонентов и всей системы в целом. В [3] сложность считается одним из важнейших условий, определяющих ненадежность ПС. В работе [4] указывается на взаимосвязь сложности и качества ПО, управление которыми дополняет проблематику надежности. Согласно мнению авторов книги [5] проблематика теории надежности ПО опирается на вопросы, связанные с изучением работоспособности сложных ПС.

Важную часть проблематики надежности ПС составляют вопросы изучения ошибок в программах [3, 5, 6], поскольку их наличие — одна из главных причин появления отказов в работе ПС. Само определение терминов «ошибка» и «отказ» ПС является отдельной проблемой.

В [2] проанализированы понятия корректности программ и программных ошибок. В проблематику может включаться разработка методики оценки корректности и отсутствия ошибок. При этом самостоятельными проблемами являются точное определение понятия ошибки для достоверного выявления наличия и причин их появления и разработка методов их обнаружения, поскольку наличие ошибок во многом определяется ожиданиями пользователей и не всегда точно формализуется [2, 3, 7]. Учет пользовательских ожиданий в проектировании ПС [3] вполне может рассматриваться как заметная часть проблематики надежности. В этой же книге много внимания уделено той части проблематики, которая связана с появлением ошибок в программах и проявлением их в виде отказов ПС. В [2] указывается на важность задач классификации, выявления характеристик и анализа статистики ошибок, статистического определения полного числа ошибок в программе. Эта проблема и некоторые подходы к ее решению обсуждаются в работах [8, 9], авторы которых делятся своим опытом по разработке методологии и практическому выполнению классификации и статистической обработки программных ошибок. При этом значимыми проблемами являются организация сбора данных для изучения и классификация ошибок [7, 9].

Эту часть проблематики можно дополнить вопросами изучения структуры текстов программ для получения статистических характеристик, по которым можно попытаться сделать выводы о тех или иных свойствах ПС, в том числе о надежности [4]. Можно предполагать, что применение подходящих методик составления структурных моделей позволит получать сведения о закономерностях в появлении программных ошибок.

Важной частью проблематики, определяющей применение традиционных подходов теории надежности, является выявление того, что является случайной величиной, случайным процессом и т. д. Здесь важно, что программные ошибки сами по себе не являются случайными величинами. Специалисты указывают на то, что случайными событиями являются проявления ошибок при функционировании ПС [2, 8, 10, 11]. Случайность объясняется тем, что для проявления ошибки необходимо возникновение соответствующей ситуации — комбинации некоторого состояния системы и входного воздействия. Поскольку эти комбинации достаточно редки и плохо предсказуемы, появляются основания для рассмотрения момента проявления программной ошибки в качестве случайной величины. Иными словами, в рамках проблематики надежности ПС возможно рассмотрение характеристик потоков входных воздействий.

В проблематике ошибок содержатся и вопросы, возникающие в связи с необходимостью уменьшения числа ошибок проектирования ПС [2, 10]. В работе [8] подчеркивается необходимость предупреждения ошибок и контроля надежности в ходе проектирования, создания и внесения изменений в ПС, а в ходе эксплуатации — применения специальных систем защиты от нарушений функционирования. В [7] сформулированы и детализированы проблемы обоснования требований к надежности ПС и организации проектирования систем с требуемой надежностью. Там же приведена подробная классификация факторов, определяющих проблематику в области надежности ПС.

Важное место в проблематике надежности занимает совокупность вопросов функциональной безопасности ПС, изучаемых схожими методами. Одно из основных отличий, требующее терминологического разделения этих понятий, состоит в том, что при анализе функционирования ПС рассматриваются не все отказы, как это принято в теории надежности, а только те, что приводят к последствиям, отражающимся на безопасности [10]. О надежности ПО, измеряемой потерями, которые несет пользователь из-за ошибок в проектировании и функционировании систем, говорится в [7]. Там же определена важная часть проблематики надежности — необходимость учета особенностей эксплуатации ПС.

Одной из центральных проблем в области надежности ПС является существенное отличие компьютерной программы от технического устройства. Требования по надежности формируются специалистами, ориентирующимися на традиционные понятия теории надежности и действующий стандарт, разработанный для технических систем. Между тем, программные системы отличаются от технических настолько значимо, что традиционные подходы могут оказываться либо вовсе неприменимы,

либо могут применяться ограниченно. Например, в [8] прямо говорится о том, что изучение надежности ПС должно быть преимущественно ориентировано на системы реального времени и там же отмечается невозможность расчета надежности ПС обычными методами (данное высказывание несколько смягчается в том смысле, что обычные подходы ограниченно применимы только для систем реального времени). Трудности аналитических расчетов надежности и функциональной безопасности ПС отмечены также и в [10]. Это позволяет дополнить проблематику, указав необходимость в определении соответствующих терминов, показателей надежности и подходов к аналитическим, статистическим и экспериментальным исследованиям надежности ПС. При этом необходимо точно представлять отличия ПС от других технических систем с точки зрения надежности. Они достаточно объемно сформулированы в нескольких основополагающих работах, среди которых можно отметить [3, 5, 8, 10, 12–14]. Эти отличия во многом определяют и дополняют соответствующие компоненты проблематики: необходимо разрабатывать специальные подходы к исследованию надежности ПС, уделять особое внимание стадии проектирования, четко определить терминологию и критерии применения терминов. Например, большое значение [3, 5, 12] имеет определение понятий «ошибка», «надежность» и т. д.

В [2, 10] рассматриваются две разновидности программных систем, первая из которых характеризуется тем, что исполнители могут уделять меньше внимания вопросам надежности, поскольку качество этих ПС имеет значение в основном только для самих разработчиков. Автор указывает на то, что вопросы надежности приобретают смысл в основном для ПС второго типа, более похожих на другие промышленно выпускаемые продукты.

В [2, 8, 10] обсуждается использование показателей надежности технических систем. В качестве пригодных для анализа ПС предложено рассматривать наработку на отказ и коэффициент готовности. Классификация моделей, предназначенных для расчета показателей надежности ПС, вместе с обсуждением соответствующей проблематики приводится в [5]. Например, известна проблема определения показателей надежности ПС, поскольку некоторые важные характеристики качества (число программных ошибок и т. п.) не вполне годятся для оценки надежности. Дополняет эту часть проблематики необходимость учета особенностей, отличающих программы от других технических изделий. В работе [12], например, рассматриваются некоторые показатели надежности, учитывающие специфику отказов ПС.

Существуют разные подходы к оценке надежности ПО в составе информационных систем [7, 14]. С одной стороны, ПО является чрезвычайно важным компонентом и его надежность необходимо оценивать самостоятельно. С другой стороны, при рассмотрении информационных систем предполагается, что отказы вычислительной техники и ПО взаимозависимы, то есть надежность таких систем должна оцениваться комплексно.

Отказы ПС могут возникать при появлении данных, которые не были учтены при отладке и тестировании [2, 6]. Существует проблема регистрации отказов в ходе испытаний ПС на надежность, поскольку они сравнительно редко проявляются, проведение экспериментов над ПО является сравнительно трудоемкой задачей, а стоимость таких экспериментальных исследований, особенно при изучении функциональной безопасности, может быть достаточно высокой [7, 8, 10].

Может возникнуть необходимость в решении задачи классификации отказов и сбоев по длительности восстановления, поскольку от этого зависит фиксация нарушения работоспособности ПС. Для повышения надежности важно правильно организовать процедуру восстановления системы после отказов. В некоторых случаях, с учетом соответствующих временных показателей, восстановление позволяет преобразовывать отказы в менее значительные по своим последствиям сбои — данные идеи и терминология характерны для [2, 10]. В этих же работах помимо классификации отказов и сбоев уточняется и детализируется проблематика по вопросам восстановления ПС и использованию для этих целей различных видов избыточности.

Проблематика целесообразности введения и соответствующего использования избыточности в программы, данные и процессы функционирования ПС обсуждается многими авторами, например [2, 4, 13]. Как правило, смысловое наполнение терминов в этом вопросе вполне соответствует традиционному для теории надежности. В основном рассматриваются программная (алгоритмическая), информационная и временная избыточности. В этом контексте появляются традиционные вопросы о постановке оптимизационных задач [2], то есть проблематика дополняется базовой проблемой оптимизации использования избыточных ресурсов. При этом, однако, не вполне ясно как количественно оценивать уровень надежности ПС при соответствующих затратах. На основе [4] можно предложить рассматривать эту проблему совместно с группой вопросов о сборе и анализе статистической информации. С другой стороны дополняет эту часть проблематики мнение о недостаточной эффективности введения избыточности и резервирования [13].

В книге [14] и цитируемых в ней работах при рассмотрении вопросов о классификации и причинах появления программных ошибок, что само по себе является частью проблематики надежности ПС, затрагивается еще одна важная тема — влияние человеческого фактора на надежность ПС, точнее, проблема оценки этого влияния и свойств программиста (или коллектива программистов). Некоторые аспекты данной области проблематики также обсуждаются в работах [3, 5, 9, 12, 15].

Особое значение в проблематике надежности ПС приобретает необходимость построения моделей исследуемых систем и процессов ввиду их сложности. Существенную роль играют допущения [2], в рамках которых

строятся математические модели. Важно, что время, как параметр математических моделей, не имеет того значения, которое присуще исследованиям надежности других технических систем [5], за исключением, возможно, ПС реального времени [2, 8, 10]. В качестве недостатков, дополняющих проблематику моделей надежности ПС, в [8] отмечено, что модели прогнозирования надежности, построенные с применением классических подходов, могут оказаться пригодны только в условиях большого числа отказов, а попытки их применения к хорошо отлаженным и высоконадежным ПС не дают приемлемых результатов. В литературе приведено описание большого числа разработанных для исследования надежности ПО математических моделей, классифицируемых по различным основаниям [6, 11, 13].

Важную часть проблематики надежности составляют смежные вопросы качества ПС. Действующие в настоящее время стандарты в этой области, определяющие надежность как одну из характеристик качества, могут считаться устаревшими. Специалисты обращаются к более современным редакциям международных стандартов или аккуратно обходят эти вопросы стороной. В любом случае вопросы качества — это тема для отдельной работы. Поскольку здесь задача анализа качества не является основной, далее коротко будут отмечены несколько более общих вопросов, которые могут быть важны для дальнейших исследований.

Надежность рассматривается специалистами как одна из характеристик качества ПС [8, 10, 14]. Проблематика качества, как и проблематика надежности, может включать вопросы, связанные с определением показателей качества и соответствующим управлением. В [4] с качеством ПС связывается ряд вопросов, касающихся сложности их структуры. Рассматриваются специальные показатели сложности ПС и отдельных компонентов. В [9] к проблематике надежности добавляется задача анализа структурных особенностей программ. Проблема оценки сложности ПС и взаимосвязи сложности с надежностью описана в [5], где, в частности, указывается на зависимость ошибок не от объемов программного кода, а от структуры ПС, исключается возможность обобщения результатов исследования ошибок, в том числе и при сохранении постоянных условий разработки, и предполагается индивидуальный подход в этом вопросе к каждой вновь создаваемой ПС. В [14] определение качества связывается с полезностью программ, что согласуется с той вышеописанной частью проблематики надежности и качества ПС, в которой рассматриваются программные ошибки и отказы функционирования в контексте пользовательских ожиданий.

Заканчивая формирование проблематики, необходимо вернуться к вышеупомянутому вопросу совершенствования стандартов в области надежности и качества ПС [8, 10]. Возможно, решение данных проблем находится в одной плоскости с общими проблемами стандарта в области надежности, описанными в [16]. Важнейшими проблемами для надежности программных систем являются стандартизация терминологии [10] (особенно в отношении базовых понятий — отказа, работоспособного состояния ПС и т. д.), формализация показателей надежности и качества, совершенствование технологии создания и сопровождения. Вопросы стандартов здесь подробно рассматриваться не будут, поскольку это большая тема для отдельной работы.

Обсуждение и выводы

Формирование проблематики — это только начало в анализе проблемной области. На данной стадии еще рано делать окончательные выводы и принимать решения, но можно сделать некоторые предположения относительно дальнейшего направления усилий исследователей, работающих в этой области знаний.

Например, можно утверждать, что для комплексного изучения и решения перечисленных проблем необходимо применять системноаналитические методы. Это высказывание имеет следующие основания. Во-первых, отмечаются сложности в применении традиционных формальных методов, что вызвано очевидными трудностями формализации рассматриваемых процессов, громоздкостью описания объектов, многокритериальностью задач принятия решений и т. д. Во-вторых, частные задачи, полученные в результате декомпозиции общей проблемы, характеризуются меньшей неопределенностью и, вероятно, могут быть решаемы с учетом необходимости их дальнейшего объединения для получения общесистемных результатов.

Можно отметить, что выполненные здесь в простейшем виде классификация и упорядочение проблем не являются единственными. Практика системноаналитического исследования предполагает рассмотрение различных способов переработки проблематики. Возможно, один из вариантов лучше других позволит приблизиться к вышеописанному подходу в получении комплексного решения.

Рассмотрение почти каждой отдельной из перечисленных в данной работе проблем может привести к пессимистическим выводам о том, что универсального решения не существует. Это становится ясно, например, в тот момент, когда возникает необходимость принять решение об исследовании надежности ПО как составной части программно-аппаратных комплексов или как самостоятельного объекта. Аналогично затруднено принятие решений и по многим другим ключевым вопросам. Вероятно, улучшение в данном вопросе может быть достигнуто через развитие самостоятельной теории надежности ПС при рассмотрении всего комплекса проблем методами системного анализа.

Еще одним возможным направлением в решении проблем надежности является изучение качества ПС. С одной стороны, качество характеризуется через показатели надежности, а с другой — надежное функционирование возможно только в случае достижения высокого качества проектирования, реализации и сопровождения

ПС. Особое внимание исследователей должно быть уделено вопросам, связанным с учетом человеческого фактора, поскольку разработка ПС — это трудно формализуемый творческий процесс.

Обобщая вышеизложенное, отметим, что в данной области исследования, возможно, необходимо разрабатывать самостоятельную теорию, а не опираться на традиционную теорию надежности технических систем. Это обусловлено спецификой ПС, усложняющей изучение их надежности через рассмотрение надежности отдельных компонент. Здесь же добавим, что методология системного анализа предполагает участие в изучении и решении поставленных задач специалистов из разных областей знаний. Этому способствует появление печатных работ, в том числе обобщающих, направленных на систематизацию знаний, стимулирующих дальнейшее продвижение в данном исследовании. Возможно, в этом направлении может быть найден подход к решению упомянутых в [17] на стр. 4 инженерных задач.

Литература

1. **Перегудов Ф.И., Тарасенко Ф.П.** Основы системного анализа : 3-е изд. Томск: Изд-во НТЛ, 2001. 396 с.

2. **Липаев В.В.** Проектирование программных средств: М.: Высш. шк., 1990. 303 с.

3. **Майерс Г.** Надежность программного обеспечения: пер. с англ. М.: «Мир», 1980. 360 с.

4. **Штрик А.А., Осовецкий Л.Г., Мессих И.Г.** Структурное проектирование надежных программ встроенных ЭВМ. Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1989. 296 с.

5. **Пальчун Б.П., Юсупов Р.М.** Оценка надежности программного обеспечения. СПб.: Наука, 1994. 84 с.

6. **Полонников Р.И., Никандров А.В.** Методы оценки показателей надежности программного обеспечения. СПб.: Политехника, 1992. 78 с.

7. **Шураков В.В.** Надежность программного обеспечения систем обработки данных : 2-е изд., перераб. и доп. М.: Финансы и статистика, 1987. 272 с.

8. **Липаев В.В.** Надежность программных средств. М.: СИНТЕГ, 1998. 232 с.

9. **Тейер Т., Липов М., Нельсон Э.** Надежность программного обеспечения : пер. с англ. М.: Мир, 1981. 323 с.

10. **Липаев В.В.** Надежность и функциональная безопасность комплексов программ реального времени. М.: ЗАО «Светлица», 2013. 192 с.

11. **Черкесов Г.Н.** Надежность аппаратно-программных комплексов : СПб.: Питер, 2005. 480 с.

12. **Карповский Е.Я., Чижов С.А.** Надежность программной продукции. К.: Тэхника, 1990. 160 с.

13. **Смагин В.А., Дорохов А.Н.** Основы теории надежности программного обеспечения : СПб.: Балт. гос. техн. ун-т., 2009. 304 с.

14. **Шубинский И.Б.** Функциональная надежность информационных систем. Методы анализа. М.: ООО «Журнал «Надежность», 2012. 296 с.

15. **Абрамова Н.А.** О некоторых мифах в оценке качества программного обеспечения // Надежность. 2004. № 1. С. 38–63.

16. **Нетес В.А., Тарасьев Ю.И., Шпер В.Л.** Актуальные вопросы стандартизации терминологии в области надежности // Надежность. 2014. № 2. С. 116–119.

17. **Ушаков И.А., Шубинский И.Б.** Насущные проблемы инженерной надежности (Кто мы? Откуда мы? Куда мы идем?) // Надежность. 2012. № 1. С. 3–4.

Potapov I.V.

ISSUES OF SOFTWARE SYSTEMS DEPENDABILITY

The article addresses the key problems, tasks and solutions within the system analysis methodology of software systems dependability. The author presents opinions regarding the solution of software systems dependability problems. The problems in question are classified and organized.

Keywords: *dependability, software tool, software system.*

Introduction

As early as the end of the last century there was a visible trend of significant redistribution of the global IT market in favor of software. As of today, computer technology is used everywhere. Due to that fact software systems users and developers alike are interested in the development of quality software products compliant with current global standards. Let us not dwell upon the general matters while noting one important detail: in those cases when higher quality requirements are imposed on computer-assisted systems, such properties as software dependability and safety are often involved. The article specifically deals with the dependability as it is understood in engineering, and not other properties defined with similar terms like precision, authenticity, plausibility, etc.

System analysis methods are widely used in software systems development for description, analysis and design. This method can be used in the software systems dependability studies. Problem definition is one of the key stages of system analysis [1]. The author tentatively summarizes the problems and tasks the users and developers of dependable software systems face. The constraints of a journal publication call for a certain transformation of the information acquired in the process of problem definition and originally represented in a "knot" of problems. This transformation can be considered as an adaptation of the input data supplied by the involved parties. System analysis literature recommends classifying and structuring problems, which is what this article aims to do. Referenced are the fundamental works that reflect major ideas and trends that characterize the problems of software systems dependability. Many problems and tasks that today's researchers, developers and users face are fundamental to this field of knowledge, therefore the authors and publications referenced in this article, including the very earliest ones, can quite be considered as the foundation for problems definition. This article also aims to classify and analyze publications on software systems dependability.

Problems definition

Experts often point out the fact that software systems (e.g. in [2]) are complex as it is understood by system theory and system analysis researchers. That fact largely defines the key problems and tasks of dependable software systems development, most notably the design, debugging and errors diagnostics, individual components and whole system fault detection. In [3], the complexity is considered to be one of the key factors that define software system undependability. In [4], the authors point out the correlation between the complexity and

the software system quality, while managing those factors represents an additional dependability problem. According to the authors of [5], the problems of the software systems dependability theory rely on the matters relating to complex software systems dependability research.

One of the important software systems dependability problems is the software errors research [3, 5, 6], as their presence is a key reasons of software systems failures. The very definition of the terms "error" and "failure" of a software system is a problem of its own.

In [2], the author analyses the concepts of program correctness and program errors. The problems may include the development of correctness and absence of errors evaluation method. Apart stand the problems of precise definition of the error for their reliable identification and cause isolation, as well as the development of methods for their detection, as the presence of errors is largely determined by the user's expectation and is not always strictly formalized [2, 3, 7]. Taking user's expectation into consideration in the design of software systems [3] can be regarded as a significant part of the dependability agenda. The same book dwells upon the problems related to the introduction of errors into software and their manifestation in the form of software system failure. [2] points out the importance of classification, identification of characteristics and error statistics analysis, as well as statistical determination of the total number of errors in a program. This problem along with a number of solutions is discussed in [8, 9]. The authors share their experience of methodology development and practical execution of software errors classification and statistical processing. Organizing data collection for error analysis and classification is a significant problem as well [7, 9].

This aspect should also include the matters of program code analysis for identification of statistical characteristics that would allow for a tentative evaluation of software system properties including dependability [4]. It can be assumed that using appropriate structural model generation methods would allow revealing the patterns of program errors introduction.

Identifying what is a random value, random process, etc. is one of important problems that define the applicability of conventional methods of the dependability theory. It should be noted that software errors themselves are not random values. Experts point out that random events are manifestations of errors occurring during the software systems operation [2, 8, 10, 11]. The random nature of the events is explained by the fact that in order for the error to manifest itself, a specific situation must occur (a combination of a certain condition of the system and an input action). As such combinations are fairly rare and hardly predictable the moment of software error can be deemed a random value. In other words, within the software dependability problem field it is possible to consider the characteristics of input action flows.

Among the error problems are the matters related to the requirement to reduce the number of software system design errors [2, 10]. In [8], the author stresses the requirement to prevent errors and manage the dependability during the design, development and modification of software systems, as well as to use functional failure protection systems during the operation. [7] defines and specifies the problems of software system dependability requirements justification, as well as organization of system design with the required level of dependability. The paper also sets forth a detailed classification of factors that define the software system dependability problematics.

A number of issues of software system functional safety that are studied using the same methods are an important part of the dependability problematics. Ony of the key differences that requires a terminological delimitation of these concepts consists in the fact that an analysis of software system operation does not include all failures as in the dependability theory, but only those that entail safety-specific consequences [10]. Paper [7] details the dependability of software measured in terms of losses incurred by the user due to design and operation flaws. The same paper defines an important part of the dependability problematics, the requirement to take into consideration the software system operational environment.

One of the central problems of software system dependability is the significant difference between a computer program and a technical device. Dependability requirements are defined by experts who are guided by conventional concepts of the dependability theory and the current standard developed for engineering systems. At the same time, software systems differ from technical system so significantly that conventional approaches may turn out to be completely or partially inapplicable. For example, in [8] it is clearly stated that the research of software system dependability should primarily focus on real-time systems. The author notes the impossibility to calculate software system dependability using conventional methods (that statement is somewhat attenuated in the sense that the conventional approaches are limitedly applicable only to real-time systems). The difficulties of analytical calculation of software system dependability and functional safety are also noted in [10]. That allows extending the problematics indicating the requirement to define appropriate concepts, dependability indicators and approaches to analytical, statistical and experimental studies of software system dependability. At the same time, it is highly important to clearly understand the differences between software systems and other types of technical equipment in terms of dependability. Those are detailed in several fundamental papers, of which we should note [3, 5, 8, 10, 12-14]. Those differences largely define and compliment the respective aspects of the problematics. Special methods of software system dependability studies must be developed. A particular attention should be given to the design stage, definitions and terms application criteria must be made clear. For instance, it is very important [3, 5, 12] to define the terms "error", "dependability»", etc.

In [2, 10], the authors look at two varieties of software systems, the first of which is characterized by the fact that the developers can give less attention to the matters of dependability, as the quality of the software system mostly matters only to the developers themselves. The author points

out that the matter of dependability is mostly relevant to software systems of the second type that are more similar to other industrial products.

In [2, 8, 10], technical systems dependability indicators are covered. It is suggested to regard time to failure and availability factor as usable for the purpose of software system analysis. The classification of models for software system dependability indicators calculation, as well as a discussion of the related problems is given in [5]. For example, there is a well-known problem of software system dependability indicators identification that is due to the fact that some important quality characteristics (number of software errors, etc.) are not perfectly suited for dependability evaluation. This part of the problematics includes the requirement to take into consideration the specific features of software as compared to other engineering products. In [12], for instance some dependability indicators are covered that take into consideration the specificity of software system failure.

There are several ways to evaluate the dependability of software as part of information systems [7, 14]. On the one hand, software is an extremely important component and its dependability must be evaluated separately. On the other hand, when information systems are considered, it is assumed that computer systems and software failures are interconnected, which means that the dependability of such systems must be evaluated as a whole.

Software systems failures may occur upon introduction of data that was not taken into consideration during debugging and testing [2, 6]. There is a problem of failure recording during software system dependability testing that is due to their relatively rare occurrence, the high labor cost of software testing and significant expenditures, especially in case of functional safety research [7, 8, 10].

It may become necessary to ensure classification of failures and faults according to recovery time, as that affects the software system malfunctions registration. In order to improve dependability it is required to properly organize the procedure of system recovery after failures. In some cases subject to time parameters the recovery allows transforming failures into less severe faults. Those ideas and concepts are covered in [2, 10]. Those papers, beside the classification of failures and faults, specify and detail software system recovery and utilization of various types of redundancy for that purpose.

The matters of applicability of redundancy in software, as well as software system data and operating processes have been discussed by many authors, namely [2, 4, 13]. In most cases, the definitions subject matter terms complies with dependability theory conventions. The main focus is on software (algorithmic), information and time redundancy. In this context, we must deal with the traditional issues of optimization problem definition [2], i.e. the problematics are extended with the management of redundant resources management. At the same time, it is not completely clear how to quantify the software system dependability subject to expenditures. Based on [4], it can be suggested to consider this problem along with a group of questions regarding the collection and analysis of statistical information. The opinion regarding the insufficient efficiency of redundancy is also part of the problematics [13].

In [14] and papers referred in it, the authors, while examining the matters of classifications and causes of software errors (which in turn is part of the software system dependability problematics), touch upon another important issue, the influence of the human factor on software systems dependability or rather the problem of evaluating this influence and the properties of the programmer (or team of programmers). Some of the related issues are covered in [3, 5, 9, 12, 15].

The requirement to develop models of the studied systems and processes due to their complexity becomes an increasingly important part of software systems dependability problematics. A significant role is played by the tolerances and assumptions [2] used in the development of mathematical models. Note that time as a parameter of a mathematical model does not have the meaning typical to dependability studies of other engineering systems [5], excluding perhaps real-time software systems [2, 8, 10]. Among the disadvantages that complement the problematics of software system dependability models [8] notes, that dependability prediction models designed using conventional methods may be usable only if the number of failures is high, while attempts to apply them to well debugged and highly dependable software systems do not yield acceptable results. In literature, we can find a great number of mathematical models developed for software dependability research that are classified by different criteria [6, 11, 13].

Related matters of software system quality constitute an important part of the problematics. Current standards in this area that define dependability as a quality characteristic can be considered obsolete. Experts turn to more recent versions of international standards or gently avoid those matters. In any case, the matters of quality are a topic apart. As quality analysis is not the focus of this paper, below will be covered a number more general issues that may be relevant to further research.

Experts regard dependability as one of the quality characteristics of software systems [8, 10, 14]. Both quality and dependability problematics may include matters related to quality evaluation and management. In [4], software system quality is associated to some aspects of structural complexity. Special complexity factors of software systems and components are analyzed. In [9], dependability problematics includes the analysis of the structural features of software. The problem of software system complexity evaluation and correlation between complexity and dependability is described in [5], where, among other things, the authors point out the dependence of the errors on not the size of program code, but on the software system structure, rule out the possibility of generalizing the error research results even in case of constant development environment and suggest an individual approach to each particular newly developed software system. In [14], certain qualities are associated with program usability, which corresponds with the above part of the software system dependability and quality problematics, where software errors and functional failures are considered in the context of user expectations.

While finalizing the problematics we need to return to the above question of improvement of the standards of software system dependability and quality [8, 10]. Probably, the solution to those problems is closely related to the general dependability issues of the standard, as described in [16]. The main problems in software system dependability are the standardization of terminology [10] (especially the basic concepts of failure, operational condition, etc.), formalization of dependability and quality indicators, improvement of design and maintenance processes. Standardization will not be covered here, as it is a major topic of a separate paper.

Discussion and conclusions

The development of the problematics is only the beginning of a problem domain analysis. At this stage it is too early to make the final conclusions and take decisions, but we can make some assumptions regarding the further efforts of the researchers in this area of knowledge.

For instance, it can be said that a comprehensive study and solution of the problems described above requires the use of system analysis methods. That statement is based on the following. First, there are difficulties in applying conventional formal methods due to obvious problems of formalization of the processes in question, awkwardness of object descriptions, multicriteriality of the decision-making tasks, etc. Second, the specific tasks resulting from the decomposition of the general task have less uncertainty and can probably be solved subject to their further integration for the purpose of obtaining system-wide results.

It can be noted that the simple classification and arrangement of problems given in this paper are not the only ones possible. The practice of system analysis research involves considering various ways of problematics elaboration. One of the solutions rather than all the others would probably allow implementing the above method in obtaining the comprehensive solution.

Examining almost each individual problem covered in this paper may yield a disappointing conclusion that a universal solution does not exist. That becomes clear when, for example, it is required to take the decision to study the dependability of a software system as a component of a hardware and software system or an independent object. Many of the other key matters have the same decision-making problems. Improvements can probably be achieved by developing an independent software system dependability theory and examination of the totality of problems by means of system analysis.

Software system quality research can also hold the solution to the dependability problems. On the one hand, quality is characterized by dependability indicators, on the other hand, dependable operation is possible only if the quality of design, implementation and maintenance is high. The researcher should pay a special attention to the human factor, as software systems development is a creative process that is not easily formalized.

In conclusion we should note that this area of research requires an independent theory that is not based on the conventional technology dependability theory. That is due to the special features of software systems that complicate the study of their dependability by means of individual components dependability examination. It should be added that the system analysis methodology involves experts in various areas of knowledge participating in the study and solution of tasks. That is simplified by the publication of papers that, among other things, summarize and systemize the knowledge that promotes further research in this area. Perhaps that would help find the solution to the engineering tasks referred to in [17] on page 4.

References

1. **Peregudov F.I., Tarasenko F.P.** Introduction to system analysis: 3rd edition. Tomsk: Publishing house NTL, 2001. 396 p.

2. **Lipaiev V.V.** Software design: Moscow. Vysshaya Shkola, 1990. 303 p.

3. **Myers G.** Software reliability: translation from English. Moscow. Mir, 1980. 360 p.

4. **Shtrik A.A., Osovetsky L.G., Messikh I.G.** Structured design of reliable embedded computer software. Leningrad: Mashinostroenie. Leningrad branch, 1989. 296 p.

5. **Palchiun B.P., Yusupov R.M.** Software reliability evaluation. Saint-Petersburg: Nauka, 1994. 84 p.

6. **Polonnikov R.I., Nikandrov A.V.** Methods of software reliability indicators evaluation. Saint-Petersburg: Politekhnika, 1992. 78 p.

7. **Shurakov V.V.** Reliability of data processing systems software: 2nd edition, revised and enlarged. Moscow. Finansy i statistika, 1987. 272 p.

8. **Lipaiev V.V.** Software reliability: Moscow. Sinteg, 1998. 232 p.

9. **Thayer T., Lipov M., Nelson E.** Software reliability: translation from English. Moscow. Mir, 1981. 323 p.

10. **Lipaiev V.V.** Reliability and functional safety of real-time software systems. Moscow. ZAO Svetlitsa, 2013. 192 p.

11. **Cherkesov G.N.** Reliability hardware and software systems: Saint-Petersburg: Piter, 2005. 480 p.

12. **Karpovsky E.Ya., Chizhov S.A.** Software products reliability. Kiev: Tekhnika, 1990. 160 p.

13. **Smagin V.A., Dorokhov A.N.** Introduction to the theory of software reliability: Saint-Petersburg: Baltic State Engineering University, 2009. 304 p.

14. **Shubinsky I.B.** Functional reliability of information systems. Analysis methods. Moscow. Dependability Journal, 2012. 296 p.

15. **Abramova N.A.** On some of the myths regarding the quality assessment of software. Dependability, 2004. Issue 1. P. 38–63.

16. **Netes V.A., Tarasyev Yu.I., Shper V.L.** Topical issues of reliability terminology standardization. Dependability. 2014. Issue 2. P. 116 – 119.

17. **Ushakov I.A., Shubinsky I.B.** Pressing problems of engineering dependability (Who are we? Where are we coming from? Where are we going?). Dependability. 2012. Issue 2. P. 3 – 4.

Ануашвили А.Н.

ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ УПРАВЛЕНИЯ ПЕРСОНАЛОМ НА ОСНОВЕ ОБЪЕКТИВНОЙ ПСИХОДИАГНОСТИКИ

В предлагаемой статье описан метод объективной психодиагностики, основанный на волновой модели мозга и функциональной асимметрии полушарий. Определение психологической характеристики личности осуществляется путем измерения доминирования одного из полушарий и согласованности между ними. Указанные параметры определяются двумя способами: измерением электромагнитного излучения полушарий в радиоволновом диапазоне и измерением фазового портрета лица исследуемого человека, на котором отражаются искомые параметры мозга. Разработанные аппаратно-программные комплексы применяются в оздоровительной медицине и управления персоналом, что приводит к повышению надежности определения психологической характеристики человека.

Ключевые слова: *управление персоналом, профессиональная надежность, видео-компьютерная психодиагностика, радиоволновая психодиагностика, волновая модель мозга, аппаратно-программный комплекс, профессиональная склонность, психологический комфорт.*

Введение

Управление персоналом подразумевает подбор, расстановку и ротацию кадров, формирование команд с учетом профессиональных склонностей и психологической совместимости.

Существующие методы решения задач управления персоналом основаны на применении психологических опросников и, в некоторых случаях, детектора лжи.

Психологические опросники содержат сотни вопросов, на которые должен ответить исследуемый человек. Поэтому результат зависит от субъективного мнения исследуемого человека о себе.

Детектор лжи определяет случай правильного ответа на поставленный вопрос. Набор таких случаев далее используется специалистом, чтобы определить свойства исследуемого человека, что является исключительно трудной задачей.

Предлагаемый метод и аппаратура объективной психодиагностики на основе определения доминирования одного из полушарий и когерентности между полушариями позволяет непосредственно определить свойства исследуемого человека. Метод реализован в двух вариантах: на основе радиоволновых датчиков и видео датчиков. При этом вариант реализации на основе видео датчиков позволяет проводить психодиагностику дистанционно и оперативно.

В результате психодиагностики аппаратно-программный комплекс выдает следующие характеристики, необходимые для решения задач управления персоналом:

- профессиональные склонности и психологическая комфортность при выполнении разного рода работ;

- прогноз поведения в экстремальной ситуации;
- вероятность проявления социально неодобряемых свойств;
- вероятность перехода социально неодобряемых свойств в социально опасные свойства;
- вероятность проявления свойства лживости и причины лживости;
- вероятность проявления свойства обвинять других или обвинять себя.

1. Научно-методологическая основа объективной психодиагностики на основе волновой модели мозга

Математическое описание волновой модели мозга приводится в статье [1].

Известно, что человеческий мозг генерирует волны (колебания). В частности, мозг излучает электромагнитные волны, и это явление используется в электроэнцефалографии.

В предлагаемой модели два полушария головного мозга человека рассматриваются как два самостоятельных генератора колебательных процессов (волн), излучения которых пересекаются в пространстве. С физической точки зрения, при пересечении двух когерентных колебаний возникают, так называемые, стоячие волны интенсивности. Эти волны представляют собой устойчивую пространственную интерференционную структуру, если колебания в них согласованы по времени, т.е. когерентны. Степень когерентности соответствует устойчивости психических процессов, позволяющих человеку делать адекватный прогноз будущего и строить реалистические стратегические планы, т.е. быть управленцем. При нарушении когерентности полушарий человек становится импульсивным. Он импульсивно реагирует на раздражители и не способен мыслить и действовать стратегически, но при этом у него развиваются исполнительские способности, и он может преуспеть в исполнительском мастерстве или иррациональном искусстве, в зависимости от доминирования полушарий.

Степень когерентности колебательных процессов в полушариях определяется как среднее значение интенсивности указанной интерференционной структуры (когерентная компонента).

$$C = \frac{\pi}{T}\left| \int_{t_o}^{t_o+T} A_l A_r \mathrm{e}^{i\Delta\varphi} \ \mathrm{dt}\right|, \qquad (1)$$

В (1) ***T*** есть время усреднения, значение которого соответствует времени экспозиции (времени формирования интерференционной структуры в чувствительной среде). ***T0 –*** начальное время, ***Ar*** и ***Al*** амплитуды волны правого и левого полушарий. $\Delta\varphi$ – разность фаз двух колебательных процессов.

Если в процессе формирования интерференционной структуры (за время усреднения T) параметры двух колебательных процессов не меняются и разность фаз является постоянной величиной – $\Delta\phi = const,$ то среднее значение интенсивности (когерентная компонента) будет равняться ее мгновенному значению, будет максимальной (для данного значения разности фаз) и постоянной:

$$C_{const} = A_l A_r \mathrm{e}^{i\Delta\varphi} = const,$$

Если же параметры двух колебательных процессов меняются за время усреднения (T), то когерентная компонента будет уменьшаться. Например, если фазы колебательных процессов в левом и правом полушариях меняются случайно, то разность фаз тоже будет случайной величиной.

Это обстоятельство может привести к случайному знакопеременному изменению выходного сигнала и когерентная компонента – C будет стремиться к нулю.

В статье [1] приведен вывод математической формулы, отражающей характер уменьшения когерентности (C) в зависимости от изменения разности фаз опорной и предметной волн за время экспозиции. Как следует из указанной статьи, когерентная компонента в результате изменения разности фаз будет уменьшаться от своего стабильного значения до значений, близких к нулю по синусоидальному закону:

$$C = C_{const}\left(\frac{Sin(\Delta\varphi)}{\Delta\varphi}\right)^2.$$

Изменение разности фаз, согласно данной модели, связано с движением источника колебаний внутри полушария. Максимальное значение C и стабильность разности фаз имеет место в том случае, когда источники колебаний обоих полушарий расположены стабильно. Из своего исходного положения источник колебаний может начать движение. При этом разность фаз будет меняться и значение C уменьшится вследствие нарушения когерентности колебаний в двух полушариях.

Доминирование одного из полушарий может быть определено величиной перемещения источника колебаний за время экспозиции или пропорциональной величиной – разностью амплитуд колебательных процессов, происходящих в полушариях (в области формирования стоячих волн интенсивности):

$\Delta A = A_l - A_r$.

Таким образом, в волновой модели мозга выделяются два основных параметра:

Доминирование одного из полушарий (разность амплитуд),

Согласованность между полушариями (когерентность).

2. Модель психики человека

В психике человека выделяются три основные части: сознание, сверхсознание, подсознание. При этом сознание относится к осознанному психическому, а сверхсознание и подсознание – неосознанному психическому. Выполнение этих функций связано с функциональной асимметрией головного мозга.

Как известно, два полушария головного мозга человека выполняют различные функции. Левое полушарие отвечает за сознание, логику, в основном за осознанную психическую деятельность. Правое полушарие отвечает за сверхсознание, интуицию, в основном за неосознанную психическую деятельность.

Логика и интуиция являются способами восприятия информации из внешнего мира. Это – общее между ними. Разница заключается в следующем. Логика есть способность восприятия информации из внешнего мира путем анализа деталей окружающего мира. Интуиция есть способность восприятия информации из внешнего мира в целом, без анализа деталей окружающего мира.

Более подробно под логикой понимается осознанное психическое, практический ум, конкретное мышление, способность восприятия информации помимо цензуры сверхсознания, позволяющей быстро и легко распознавать количественные характеристики и детали окружающего мира, провести дифференцированный анализ ситуации, проявить изощренность, изобретательность и изворотливость (связь с экстраверсией). Кроме того, логика позволяет человеку осознать интуитивно воспринятые образы и описать их на понятном другим людям языке. Логика определяет выживаемость человека в физической среде, поэтому ее условно можно назвать умом, сознанием. Логика, ум, практические навыки могут стать психологическим автоматизмом и частично могут быть вытеснены в подсознание и тогда они становятся неосознанным психическим. На основе психологического автоматизма человек способен воспринять детали окружающего мира и провести дифференцированный анализ ситуации с очень большой скоростью, практически мгновенно распознать нужный ему признак и совершить соответствующие действия. Поэтому это свойство ошибочно приписывают к интуиции, так как внешне оно выглядит как интуиция. На самом деле интуиция является функцией сверхсознания, а психологический автоматизм – функцией подсознания.

Более подробно под интуицией понимается часть неосознанного психического. Она проявляется как сверхсознание, образное мышление, а также – как способность распознавания ситуации в целом без анализа деталей, способность распознавания качества окружающего мира без дифференцированного анализа, через себя (связь с интроверсией). Интуиция определяет выживаемость человека в моральной (духовной) среде, поэтому ее условно можно назвать духом. Интуиция (интуитивно воспринятые образы) частично может быть осознана человеком своей логикой и тогда она становится осознанным психическим. Таким осознанием человек воспринимает качественную информацию от внешнего мира, закономерного начала природы. Интуиция ассоциируется с чувством, собственной эмоцией. На основе интуиции у человека возникают чувства и эмоции, связанные со сверхсознанием. Интуицию иногда путают с чувствительностью к раздражителям, импульсивностью. Чувствительность не есть эмоциональность. Чувствительность к раздражителям и импульсивность возникает при нарушении согласованности колебательных процессов в полушариях (дестабилизации психики), а эмоциональность (чувства, эмоции, интуиция, сверхсознание) есть свойство правого полушария и возрастает при его доминировании.

Подсознание относится к неосознанному психическому и является функцией обоих полушарий. Подсознание разгружает сознание и является хранилищем ненужной и невыносимой информации. В подсознании находится то, что было ранее осознанным и превратилось в психологический автоматизм – навыки, рефлексы, а также то, что стало невыносимым для психики и было вытеснено в подсознание. Психические травмы, вытесненные в подсознание, представляют собой скрытые чувства, страхи, которые человек не переживает в своих непосредственных ощущениях, но в экстремальной ситуации именно они управляют поведением человека (вместе с инстинктами, рефлексами).

Доминирование одного из полушарий (ΔА) и степень когерентности (согласованности) колебательных процессов в полушариях (С) определяют степень гармонии личности (Н). Степень гармонии личности является функцией указанных двух переменных и будет меняться также по синусоидальному закону [6].

Ниже приводится формула (2), которая отображает характер изменения степени гармонии личности в зависимости от доминирования одного из полушарий и стабильности связи между полушариями.

$$H = Sin\left(\frac{C}{2}\right)\left[1+\left(\frac{Sin\left(\frac{\Delta A}{C}\pi\right)}{\frac{\Delta A}{C}\pi}\right)^2\right], \qquad (2)$$

где:

Н – степень гармонии личности.

ΔА – разность амплитуд колебательных процессов в двух полушариях головного мозга (определяет доминирование одного из полушарий).

С – степень согласованности (когерентности) колебательных процессов в двух полушариях (стабильности связи между полушариями).

В (2) разность амплитуд и степень когерентности имеют условную размерность.

$$C \in [-\pi, \pi],$$
$$\Delta A \in [-\pi, \pi].$$

Необходимо отметить, что когерентность (согласованность) колебательных процессов в полушариях (С) соответствует стабильности психических процессов. Доминирование правого полушария соответствует преимущественному развитию интуиции, а левого полушария – логики. Степень гармонии личности соответствует адекватности человека.

Как видно из рисунка 1., из двух параметров, от которых зависит степень гармонии личности, главным является согласованность процессов в полушариях (стабильность связи между полушариями – С). Именно от этого параметра в сильной степени изменяется гармония личности (по оси – С). Второй параметр – доминирование одного из полушарий является менее значимым для гармонии личности. От доминирования полушария гармония личности изменяется в меньшей степени, а при средней стабильности не меняется совсем.

Следует отметить, что до сих пор для оценки психологического состояния человека учитывали только доминирование полушария, а согласованность процессов в полушариях не учитывалась, что не позволяло построить логически полную и однозначную систему типологии. Поэтому, полученная математическая зависимость для оценки степени гармонии личности имеет значение для дифференциации психологических типов и разработки однозначной и объективной системы определения психологического состояния человека.

3. Объективная психодиагностика на основе определения двух параметров мозга – доминирования одного из полушарий и когерентности между полушариями

Предложен метод диагностики, заключающийся в том, что измеряют доминирование одного из полушарий и согласованность колебательных процессов между полушариями головного мозга исследуемого человека и по измеренным значениям определяют его психологическую характеристику.

Разработаны два способа технической реализации предложенного метода в радио и оптическом диапазоне электромагнитных волн.

Первый способ, реализуемый в радиодиапазоне, отличается тем, что доминирование одного из полушарий определяют путем измерения разности амплитуд электромагнитного излучения левого и правого полушарий, а согласованность колебательный процессов определяют путем измерения уровня когерентности электромагнитных колебаний между полушариями.

При этом принято, что доминирование правого полушария пропорционально положительному значению разности амплитуд для правого полушария, доминирование левого полушария пропорционально положительному значению разности амплитуд для левого полушария, а согласованность колебательных процессов между полушариями пропорциональна когерентности этих колебательных процессов.

Ниже на рис. 2 приводится схема реализации предложенного метода в радио диапазоне волн. С помощью двух датчиков на частоте 60ГГц принимаются радиоволны, излучаемые двумя полушариями головного мозга исследуемого человека. Далее принятые волны по волноводам поступают в фазовый смеситель. На выходе фазового смесителя появляется сигнал, величина которого зависит от разности фаз двух колебательных процессов. Когерентность между полушариями определяется средним значение этого сигнала. Доминирование одного из полушарий определяется по разности средних амплитуд сигналов от указанных двух датчиков. Вычисляется также степень гармонии личности (Н) по нарушению когерентности.

Второй способ, реализуемый в оптическом диапазоне, отличается тем, что доминирование одного из полушарий и согласованность колебательных процессов между полушариями определяют путем вычисления разности углов и средних углов между чертами правой и левой половин лица исследуемого человека (глаз, носогубной складки и губ). При этом принято, что доминирование правого полушария пропорционально положительным углам разности на правой половине лица, доминирование левого полушария пропорционально положительным углам разности на левой половине лица, а согласованность колебательных процессов между полушариями пропорциональна величине средних углов между чертами правой и левой половин лица. Аппаратно-программное средство для реализации данного варианта технической реализации (рис.2) состоит из приемника изображения, вычислительного блока для анализа изображений и реализации алгоритма определения разности углов и средних углов наклона глаз, носогубной складки и губ на изображении левой и правой половин лица человека, блока формирования двух синтезированных портретов лица исследуемого человека, составленных из двух правых и из двух левых половин изображения его лица и экрана, отображающим указанные два портрета и диалоговое окно программного обеспечения для введения специалистом необходимых обозначений.

4. Определение профессиональной надежности на основе объективной психодиагностики

Определение профессиональной надежности человека возможно на основе доминирования полушарий и согласованности между полушариями, что в свою очередь можно определить с помощью видео-компьютерной системы психодиагностики.

Под профессиональной надежностью понимается психологическая комфортность человека при выполнении своей работы. Здесь не имеются в виду способности человека. Подразумевается, что способности у этого человека есть, и поэтому он работает по данной профессии. Однако наличие способностей не означает комфортность. Если работа комфортная, то человек не утомляется. Если же человек испытывает психологический дискомфорт при выполнении своих профессиональных обязанностей, то он будет утомляться. Чем

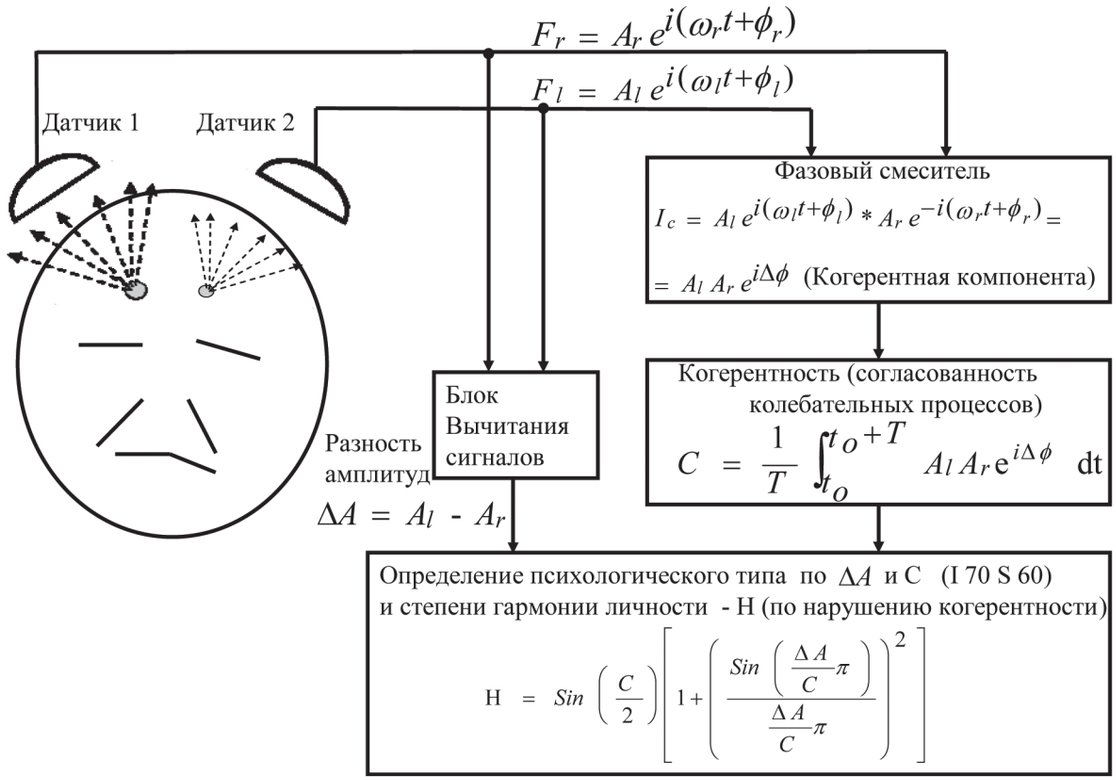


Рис. 1. Блок-схема устройства для определения доминирования одного из полушарий и согласованности между полушариями путем измерения электромагнитного излучения двух полушарий головного мозга и вычисления усредненных во времени разности амплитуд (доминирования) и когерентности (согласованности) между полушариями.

Рис. 2. Схема аппаратно-программного комплекса «ПОРТРЕТ» для реализации предложенного метода объективной психодиагностики

ниже комфортность, тем больше утомляемость. Если человек все время утомляется на своей работе, то его профессиональная надежность падает.

Профессиональная надежность определяется вероятностью психологической комфортности при выполнении различного рода работ.

Ниже (рис. 3) приводится психологическая комфортность при выполнении различного рода работ для 4-х основных психологических состояний в зависимости от доминирования полушария и когерентности между полушариями.

В каждой ячейке таблицы перечислены виды деятельности, которые комфортны для соответствующего

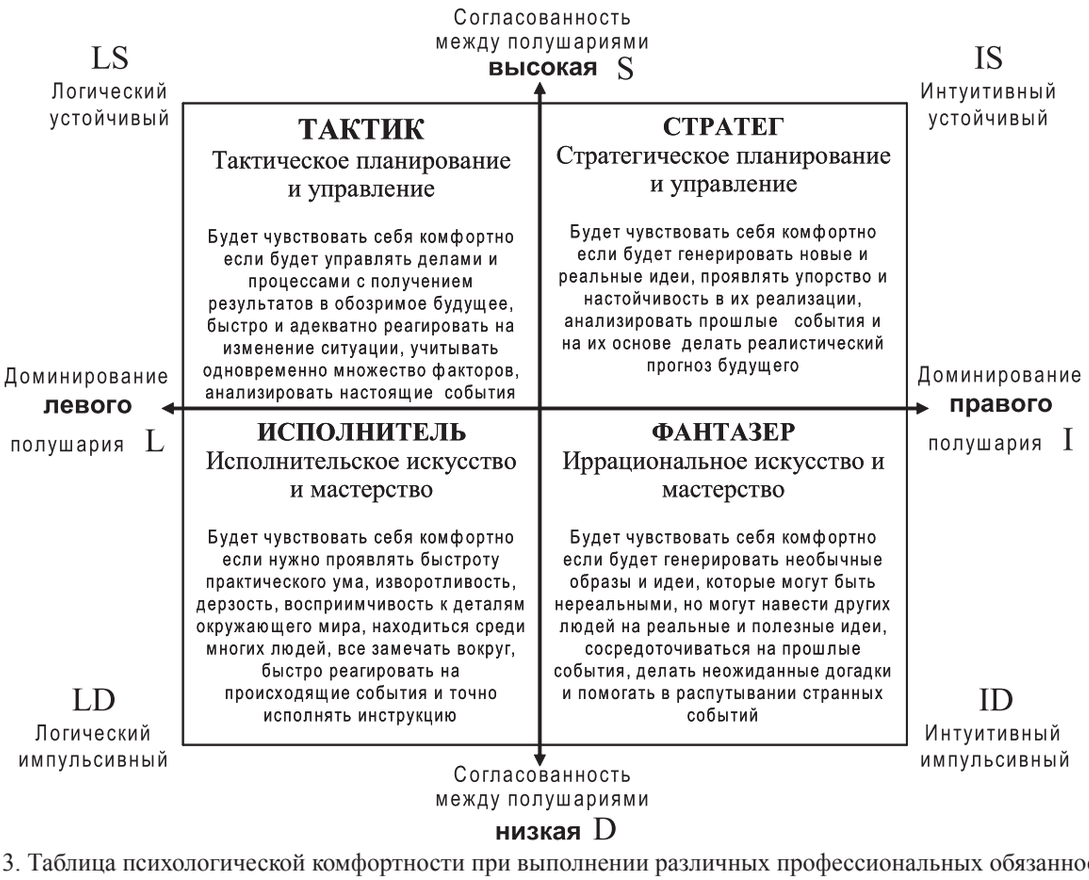


Рис. 3. Таблица психологической комфортности при выполнении различных профессиональных обязанностей для 4-х основных психологических типов

(ближайшего) психологического типа и, соответственно, при выполнении которых его профессиональная надежность высокая.

Необходимо отметить, что, согласно принятой модели, структура психики человека состоит из одинаковых составных частей, только веса разные. Поэтому в каждом человеке есть все 4 основные склонности, но в разных пропорциях.

Ниже в таблице приводится психологическая комфортность в процентах, при выполнении следующих 4-х основных профессиональных обязанностей для психологического типа «Интуитивный импульсивный I80D70»:

Стратегическое планирование и управление, реалистическое творчество **Стратег**	Тактическое планирование и управление делами **Тактик**	Иррациональное искусство **Фантазер**	Исполнительское искусство **Исполнитель**
55 %	**25** %	**75** %	**45** %

Этому человеку больше подходит профессиональный тип «Фантазер» с вероятностью психологической совместимости – **75%.** Это – профессии связанные с иррациональным искусством, индивидуальным творчеством абстрактного, иллюзорного, непрактичного характера. В этих случаях он будет проявлять упрямство и оригинальность, так как для него важно сделать все по-своему, необычно красиво, даже в ущерб логичности, здравого смысла, рациональности и практической пользы.

В меньшей степени – вероятностью **55%** подходят ему профессиональный тип **«Стратег».** Это – стратегическое планирование и управление, реалистическое творчество (научное и художественное).

Еще в меньшей степени – вероятностью **45%** подходит ему профессиональный тип **«Исполнитель».** Это профессии, для которых требуется быстрота ума, изощренность, подвижность, в сочетании с изворотливостью, дерзостью и импровизацией в общественных местах.

Меньше других – вероятностью **25%** подходит профессиональный тип **«Тактик»** и соответствующий род деятельности: управление, менеджмент в рациональной сфере, тактическое планирование и управление.

5. Совместное применение аппаратно-программного комплекса «Портрет» и детектора лжи «Полиграф»

Если, видео-компьютерную психодиагностику (ВКП) в виде АПК **«Портрет»** применять вместе с **«Полигра-**

фом» (детектором лжи), то может быть положительный эффект. Детектор лжи определяет случай, а ВКП – свойство. Нужно и то, и другое.

Возможен такой вариант, когда при опросе на детекторе лжи исследуемый человек не дает правильного ответа на данный конкретный вопрос, т.к. он просто не хочет давать информацию на данную тему, которая может и не иметь прямого отношения к делу. Но ему этот ответ засчитают как лживость. Хотя в целом он может быть нелживым человеком и в определенных условиях легко может пойти на соглашение.

В то же время возможен другой вариант, когда человек может давать большинство правильных ответов, но скрыть самое главное, т.к. он в целом лживый человек и не пойдет на соглашение, будет уклоняться до конца или даст признание, а потом откажется.

Поэтому целесообразно совместное применение видео-компьютерной психодиагностики («Портрет») и детектора лжи («Полиграф»).

Необходимо отметить, что такое применение уже происходит в некоторых госслужбах и частных организациях. Например, в ООО «Юридическая безопасность» (http://www.poligraf35.ru/pricelist.html), применяют «Полиграф» и «Портрет» совместно для проверки персонала, решения служебных конфликтов и формирования команд.

Заключение

Приведенный выше метод предназначен в основном для подбора высших управленческих кадров, а также кадров, которым приходится работать в экстремальных условиях, на важных объектах, где профессиональная и человеческая надежность играет решающую роль.

Разработанная компьютерная программа позволяет по изображению лица человека (по фотографии) за одну минуту выдать полную личностную характеристику, мотивацию и прогнозы его поведения в различных ситуациях. Эта программа позволяет: производить точную диагностику, исключать грубые ошибки, облегчить процесс диагностики, произвести диагностику помимо 49 обычных психотипов еще 14 сверхтипов – необычных людей. Для правильной диагностики специалисту требуется меньше тренировки, навыков и обучения, чем раньше. Это происходит за счет автоматического усреднения данных, вводимых специалистом.

Литература

1. Ануашвили А.Н. Волновая модель мозга на основе когерентности полушарий. Журнал «Наука и бизнес: пути развития». Раздел: Математические методы и модели, № 8(26), 2013, с. 45-49.

2. Ануашвили А.Н., Кукина И.М. Алгоритм психодиагностики по асимметрии лица. Журнал: «Перспективы науки», № 8 (47), 2013, с. 17-20.

3. Ануашвили А.Н. Аппаратно-программный комплекс обнаружения малозаметных подвижных объектов на основе когерентного приема излучения неподвижного фона. Журнал: «Глобальный научный потенциал», раздел: электроника, измерительная техника, радиотехника и связь, №8, 2013, с.77-81.

4. Ануашвили А.Н. Математическое описание процессов когерентного приема излучения, отраженного от неподвижного фона для обнаружения малозаметных подвижных объектов. Журнал: Инновации и инвестиции, №6, 2013, с. 142-145.

5. Ануашвили А.Н. Способ определения психологического типа. Патент РФ № 2201131, 2003, приоритет 2001.

6. Ануашвили А.Н. Объективная психология на основе волновой модели мозга. М., Экон-Информ, 2008, с.292

Anuashvily A.N.

ENHANCEMENT OF RELIABILITY OF HUMAN RESOURCE MANAGEMENT BASED ON OBJECTIVE PSYCHODIAGNOSTICS

The offered paper describes a method of objective psychodiagnostics based on a wave model of brain and functional asymmetry of cerebral hemisphere. The definition of an individual psychological characteristic is carried out by measuring the domination of one of the hemispheres and coordination between them. The stated parameters are defined by two methods: measurement of electromagnetic radiation of cerebral hemispheres in a radio-wave range and measurement of a face phase portrait of the researched individual, in which required brain parameters are reflected. The developed hardware-software complexes are applied in health-improving medicine and human resource management, which leads to increase of reliability in definition of an individual psychological characteristic.

Keywords: *human resource management, occupational reliability, wave model of brain, radio wave psychodiagnostics, video-computer psychodiagnostics, hardware-software complex, occupational inclination, psychological comfort.*

Introduction

Human resource management means selection, arrangement and staff rotation, formation of teams in view of occupational inclination and psychological compatibility.

Existing methods for solving problems of human resource management are based on application of psychological questionnaires and, in some cases, on a lie detector.

Psychological questionnaires contain hundreds questions, which should be answered by an individual. Therefore, the result depends on a subjective opinion of the researched individual about himself.

A lie detector defines the case of the correct answer on the formulated question. The collection of such cases is further used by an expert to define the behavior of the researched individual that is an extremely difficult problem.

The offered method and the equipment of objective psychodiagnostics based on the definition of domination of one of the brain hemispheres and coherence between the hemispheres allows defining behaviors of the researched individual directly. The method is realized in two versions: on the basis of radio-wave gauges and video sensor. At the same time the version realization based on video sensors allows carrying out psychodiagnostics remotely and efficiently.

As a result of psychodiagnostics, the hardware-software complex gives out the following characteristics, necessary for the solution of human resource management tasks:

- Occupational inclinations and psychological comfort at performance of different sorts of works;
- Behavior prediction in extreme situations;
- Probability of socially disapproved behavior demonstration;

- Probability of transition of socially disapproved behavior into socially dangerous behavior;
- Probability of deceit demonstration and reasons of deceit;
- Probability of behavior demonstration to accuse others or to accuse himself.

1. Scientific and methodological basis of objective psychodiagnostics based on the brain wave model

The mathematical description of the brain wave model is presented in [1]. It is known that the human brain generates waves (oscillations). In particular, brain radiates electromagnetic waves, and this phenomenon is used in electroencephalography.

The offered model considers two brain hemispheres of an individual as two independent generators of oscillatory processes (waves) whose radiations intersect in space. From the physical point of view, at intersection of two coherent oscillations so-called intensity standing waves arise. These waves represent steady spatial interference structure if oscillations in them are coordinated in time, i.e. coherent. The coherence degree corresponds to stability of mental processes allowing an individual to make the adequate prediction of the future and to create realistic strategic plans, i.e. to be a manager. At violation of hemispheres' coherence the individual becomes impulsive. He impulsively reacts to irritants and is not able to think and operate strategically, but at the same time he develops masterly performance and executive ability and can succeed in mastery or irrational art, depending on hemispheres' dominance.

The coherence degree of oscillating processes in hemispheres is defined as intensity average value of stated interference structure (coherent component).

$$C = \frac{\pi}{T}\left| \int_{t_o}^{t_o+T} A_l A_r e^{i\Delta\varphi} \; dt \right| \qquad (1)$$

In expression (1) T is the time of averaging whose value corresponds to the time of an exposition (time of interference structure generation in sensitive environment). $\boldsymbol{T_0}$ is the initial time; $\boldsymbol{Ar}$ and $\boldsymbol{Al}$ are wave amplitudes in the right and left hemispheres. $\Delta\varphi$ is the difference of phases of two oscillating processes.

If during interferences structure generation (during averaging T) parameters of two oscillating processes do not vary and the difference of phases is a constant ($\Delta\phi = const$), then the average value of intensity (coherent component) will be equal to its instant value and will be maximal (for the given value of phases' difference) and constant:

$$C_{const} = A_l A_r e^{i\Delta\varphi} = const$$

If parameters of two oscillatory processes vary during averaging time (T), then the coherent component will decrease. For example, if phases of oscillatory processes in left and right hemispheres vary casually, the difference of phases will be a random variable too.

This circumstance can lead to casual sign-variable integrand change in (4) and coherent component C will vanish.

The paper [1] has presented the mathematical formula derivation reflecting nature character of coherence (C) reduction depending on change of phases' difference in reference and subject waves during the exposition. As it follows from mentioned paper, coherent component as a result of phases' difference change will decrease from its stable value up to the values close to zero under the sine wave law:

$$C = C_{const}\left(\frac{Sin(\Delta\varphi)}{\Delta\varphi}\right)^2.$$

Change of phases' difference, according to the given model, is connected to movement of oscillation source inside a hemisphere. The maximal value C and stability of phases' difference takes place in that case when oscillation sources of both hemispheres are located invariably. From the starting position the oscillation source is able to begin movement. At the same time the phases' difference will change also and the value C will decrease as a result of oscillation coherence disturbance in two hemispheres.

Domination of one of the hemispheres can be determined by the value of oscillation source moving during exposition or by the proportional value, which is the difference of amplitudes of oscillation processes occurring in hemispheres (in the field of generation of intensity standing waves):

$$\Delta A = A_l - A_r.$$

Thus, in the brain wave model two key parameters are distinguished:

1) Domination of one of the hemispheres (difference of amplitudes),

2) Coordination between the hemispheres (coherence).

2. Model of human mentality

Three basic parts are distinguished in an individual's mentality: consciousness, superconsciousness, subconsciousness. Wherein consciousness relates to conscious mental activity and superconsciousness and subconsciousness relates to unconscious mental activity. Performance of these functions is connected with the functional asymmetry of the brain.

As is known, two brain hemispheres of an individual carry out various functions. The left hemisphere is responsible for consciousness, logic, basically for the conscious mental activity. The right hemisphere is responsible for superconsciousness, intuition, basically for unconscious mental activity.

The logic and the intuition are ways of information perception from an external world. This is what is common between them. The difference consists in the following. The logic is the ability of information perception from an external world by the analysis of surrounding world details.

The intuition is the ability of information perception from an external world as a whole, without the analysis of surrounding world details.

In more detail the logic is understood as conscious mentality, as practical mind, concrete thinking, ability of information perception without the censorship of superconsciousness allowing quickly and easily distinguishing the quantitative characteristic and details of surrounding world, carrying out of the differentiated analysis of a situation, revealing sophistication, inventive power and resourcefulness (connection with extraversion). In addition to that, the logic allows the individual to be aware of intuitively perceived images and describe them in the language understandable to other people. The logic governs the survival rate of an individual in the physical environment, therefore conditionally it can be named as mind or consciousness. The logic, mind, practical skills can become psychological automatism and can be in part superseded into subconsciousness and then they become unconscious mental abilities.

On the basis of the psychological automatism the individual is able to perceive details of surrounding world and conduct the differentiated analysis of a situation with very high speed, practically instantly to distinguish the attribute necessary to him and to make corresponding actions. Therefore, this behavior is wrongly attributed to intuition as externally it looks like intuition. Actually, the intuition is superconsciousness function, and psychological automatism is a function of subconsciousness.

In more detail the intuition is understood as part of unconscious mentality. It is manifested as superconsciousness, imaginative thinking, and also as ability of a situation recognition as a whole, without the analysis of details, ability of surrounding world quality recognition without the differentiated analysis, through itself (connection with introversion). The intuition defines the survival rate of an individual in the moral (spiritual) environment; therefore it can be named as spirit. The intuition (intuitively perceived images) can be in part recognized by the individual with the help of his logic and then it becomes conscious mentality. By such awareness the individual perceives the qualitative information from an external world, the normal beginning of the nature. The intuition associates with feeling, own emotion. Based on intuition the individual has feelings and emotions connected to superconsciousness. Intuition sometimes is confused with sensitivity to irritants, impulsiveness. Sensitivity not is emotionality. Sensitivity to irritants and impulsiveness arises at violation of oscillation processes' coordination in the hemispheres (destabilization of mentality), and emotionality (feelings, emotions, intuition, superconsciousness) is the behavior of the right hemisphere and it increases at its domination.

Subconsciousness relates to unconscious mental state and it is a function of both hemispheres. Subconsciousness relieves consciousness and it is a storehouse of the unnecessary and unbearable information. Subconsciousness contains what was conscious earlier and has turned into psychological automatism – skills, reflexes, and also what has become unbearable for mentality and has been forced out into subconsciousness. The mental traumas forced out into subconsciousness represent the latent feelings, fears, which the individual does not experience in direct sensations, but in an extreme situation they influence the behavior of an individual (together with instincts, reflexes).

The domination of one of the hemispheres (ΔA) and the coherence degree of oscillation processes in the hemispheres (C) define the degree of an individual harmony (H). The degree of an individual harmony is a function of the above two variables and the degree will vary also under the sine wave law [6].

Below you can see formula (2), which reflects an individual harmony degree nature depending on the domination of one of the hemispheres and the stability of connection between the hemispheres.

$$H = Sin\left(\frac{C}{2}\right)\left[1+\left(\frac{Sin\left(\frac{\Delta A}{C}\pi\right)}{\frac{\Delta A}{C}\pi}\right)^2\right], \qquad (2)$$

where:

H is the degree of an individual harmony.

ΔA is the difference of oscillation processes' amplitudes in two hemispheres of the brain (defines domination of one of the hemispheres).

C is the degree of coordination (coherence) of oscillation processes in two hemispheres (stability of connection between the hemispheres).

In expression (2) the difference of amplitudes and coherence degree have conditional dimension.

It should be noted that coherence (coordination) of oscillation processes in the hemispheres (C) relates to the stability of mental processes. The domination of the right hemisphere corresponds to primary development of intuition, and the left hemisphere corresponds to logic. The degree of an individual harmony corresponds to the individual adequacy.

From fig. 1 it is apparent that from two parameters on which the individual harmony degree depends, the main thing is the coordination of processes in the hemispheres (stability of connection between the hemispheres – C). An individual harmony changes exactly considerably due to this parameter (along axis C). The second parameter, the domination of one of the hemispheres is less significant for an individual harmony. An individual harmony changes to a lesser degree due to hemisphere domination, and in case of average stability it does not change at all.

It should be noted that till now only hemisphere domination has been taken into account for estimation of an individual psychological state, and the coordination of processes in the hemispheres has not been taken into account, what has not allowed constructing a logically full and unambiguous typology system. Therefore, the obtained mathematical dependence for estimation of an individual harmony degree matters for differentiation of psychological types and devel-

opment of unambiguous and objective system for definition of an individual psychological state.

3. Objective psychodiagnostics based on the definition of two brain parameters that is domination of one of hemispheres and coherence between hemispheres

The paper offers the method of diagnostics consisting in the fact that it is necessary to measure the domination of one of the hemispheres and the coordination of oscillation processes between the brain hemispheres of the investigated individual and on the measured values to define his psychological characteristics.

Two methods of technical implementation of the offered method are developed in radio and optical range of electromagnetic waves.

The first method implemented in radio range differs by the fact that the domination of one of the hemispheres is defined by difference measurement of electromagnetic radiation amplitudes of the left and right hemispheres, and oscillation processes' coordination is defined by measurement of coherence level in electromagnetic oscillations between the hemispheres. At the same time it is accepted that the domination of the right hemisphere is proportional to positive value of amplitudes' difference for the right hemisphere, while the domination of the left hemisphere is proportional to positive value of amplitudes' difference for the left hemisphere, and the coordination of oscillation processes between hemispheres is proportional to coherence of these oscillation processes.

Fig. 2 below presents the diagram of the offered method implementation in radio frequency band. With the help of two sensors, radio waves radiated by two hemispheres of the brain of the investigated individual are received at the frequency of 60 GHz. Further the received waves arrive into the phase mixer via wave conductor. On the phase mixer output there is a signal whose size depends on the difference of phases of two oscillation processes. Coherence between the hemispheres is defined by the average value of this signal. Domination of one of hemispheres is defined

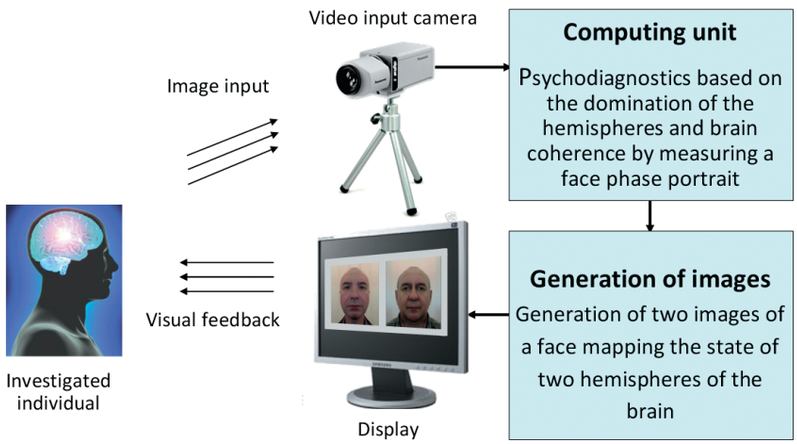


Fig. 2. The block-diagram of hardware-software complex «PORTRAIT» for implementation of the offered method in objective psychodiagnostics

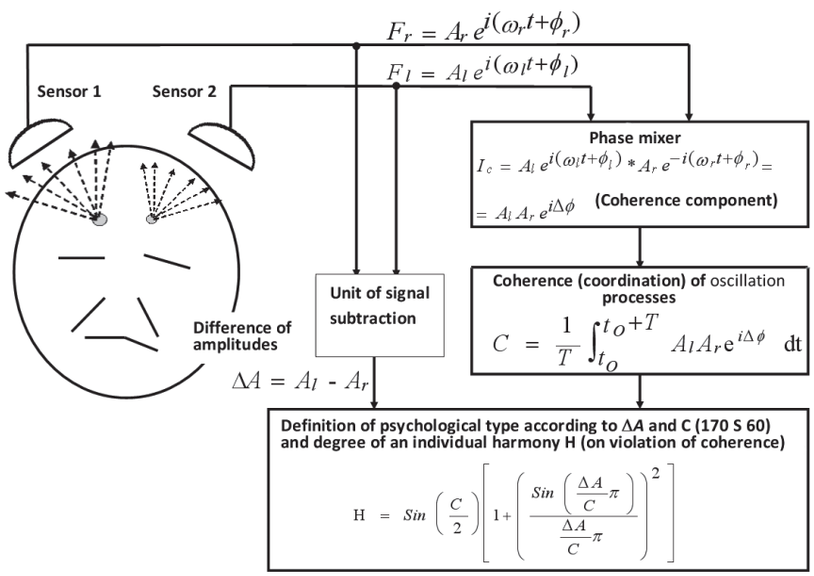


Fig. 1. The block diagram of the device for domination definition of one of the hemispheres and the coordination between the hemispheres by measurement of electromagnetic radiation of two hemispheres of the brain and calculation of amplitudes' difference averaged in time (domination) and coherence (coordination) between the hemispheres

according to the difference of signals' average amplitudes from the specified two sensors. The degree of the individual harmony (H) is calculated also according to the coherence violation.

The second way implemented in the optical range, differs by the fact that domination of one of hemispheres and a coordination of oscillation processes between hemispheres is defined by calculation of angles' difference and average angles between face features of the right and left half of the investigated individual (eye, nasolabial folds and lips). At the same time it is accepted that domination of the right hemisphere is proportional to positive angles of difference on the right face half, domination of the left hemisphere is proportional to positive angles of difference on the left face half, and the coordination of oscillation processes between hemispheres is proportional to the value of average angles between face

features of the right and left half of individual. Hardware-software means for execution of the given version in the offered method (Fig. 2) consist of the image receiver, the computing unit for the analysis of images and algorithm realization for definition of angles' difference and average angles of inclination of eyes, nasolabial folds and lips on the image of the left and right half of an individual face, the unit for generation of two synthesized portraits of the investigated individual face, made of two right and from two left half of image of his face, and the screen, displaying the specified two portraits and a software dialogue window for introduction of necessary designations by an expert.

4. Definition of occupational reliability based on objective psychodiagnostics

Definition of an individual's occupational reliability is possible on the basis of the domination of the hemispheres and the coordination between the hemispheres, which in turn are possible to define with the help of a psychodiagnostics video – computer system.

Occupational reliability is understood as psychological comfort of an individual at work performance. Here we do not mean abilities of an individual. It is meant that the individual has abilities and consequently works in the given occupation. However, presence of abilities does not mean comfort. If work is comfortable, the individual is not tired. If the individual experiences psychological discomfort at performance of the occupational duties he will be tired. The lower comfort there is, the more fatigue there is. If the individual is tired all the time performing the work, his occupational reliability decreases.

Occupational reliability is defined by probability of psychological comfort at performance of various sorts of works.

Fig. 3 below shows psychological comfort at performance of various sort of works for 4 basic psychological conditions depending on hemisphere domination and coherence between the hemispheres.

Each cell of the table lists the kinds of activity, which are comfortable for a corresponding (nearest) psychological type and, accordingly, at whose performance his occupational reliability is high.

It is necessary to note that, according to the accepted model, the structure of mentality of the individual consists of identical components, and only weighting coefficients are different. Therefore, in each individual there is all 4 basic inclinations, but in different proportions.

Psychological comfort in percentage of the individual is presented below in the table at performance of the following 4 basic occupational duties of the psychological type "Intuitive impulsive I80D70"

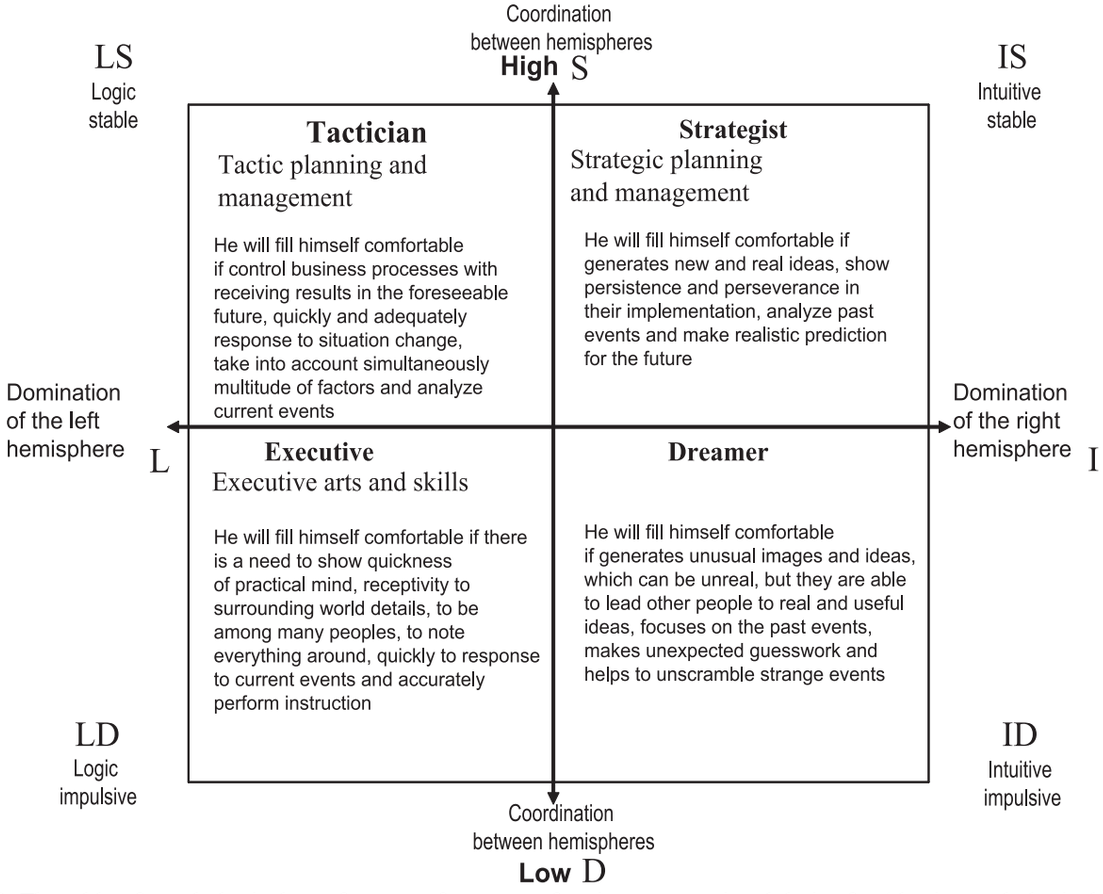


Fig. 3. The table of psychological comfort at performance of various occupational duties for 4 basic psychological types

Strategic planning and management, realistic creativity **Strategist**	Tactical planning and business management **Tactician**	Irrational art **Dreamer**	Performing art **Executive**
55 %	**25 %**	**75** %	**45** %

This individual is more suited to occupational type «Dreamer» with probability of psychological compatibility – **75 %.** These are occupations connected to irrational skill, individual creativity of abstract, illusory and impractical nature. In these cases it will show stubbornness and originality as for him it is important to make everything in own way, unusually and beautifully, even to the detriment of logicality, common sense, rationality and practical benefit.

To a lesser degree with the probability **55 %** he is suited to occupational type **"Strategist".** It is strategic planning and management, realistic creativity (scientific and art).

Still to a lesser degree with the probability **45 %** he is suited to occupational type **"Executive".** These are occupations which require quickness of mind, sophistication, mobility in with resourcefulness, impudence and improvisation in public places.

It is less than others, with the probability **25 %** he is suited to occupational type **"Tactician"** and a corresponding variety of activity: control, management in rational sphere, tactical planning and administration.

5. Joint application of the hardware-software complex "Portrait" and a lie detector "Polygraph"

If video-computer psychodiagnostics (VCP) is applied in the form of hardware-software complex (HSC) **"Portrait"** together with **"Polygraph"** (lie detector), there can be a positive effect. The lie detector defines a case, and VCP – behavior.

There is a possibility to have such a situation when during interrogation on a lie detector the investigated individual does not give the correct answer on the given specific question since he simply does not want to give information on the given subject, which may not have the direct relation to the issue. But this answer will be considered as his lie. Though as a whole he may be not a lying individual and in the certain conditions can easily go to agreement.

At the same time the other alternative is possible when the individual can give correct answers to majority of questions, but hide the most important issue since he as a whole is the lying individual and will not go to agreement, will digress the issue up to the end or will give a confession, and then refuse.

Therefore, it is reasonable to apply jointly video-computer psychodiagnostics ("Portrait") and a lie detector ("Polygraph").

It is necessary to note that such application already occurs in some civil services and private organizations. For example, Ltd "Legal Safety" (http://www.poligraf35.ru/pricelist.html) applies "Polygraph" и "Portrait" jointly for testing individuals, solving service quarrelling and forming teams.

Conclusion

The above mentioned method is intended basically for selection of top administrative staff as well as the staff who should work in extreme conditions, at important facilities, where occupational and human reliability plays a crucial role.

The developed computer program makes it possible to produce in one minute the full individual characteristic, motivation and forecasts of his behavior in various situations with the help of an individual's face (photo). This program gives a possibility to make exact diagnostics, to exclude rough blunders, to facilitate process of diagnostics, to make diagnostics of 14 more super types of unusual people in addition to 49 ordinary psychological types. An expert requires less training, skills and teaching for correct diagnostics, than it has been earlier. It takes place due to automatic averaging of data entered by an expert.

References

1. **Anuashvily A.N.** Wave brain model based on coherence of hemispheres. The journal "Science and business: ways of development". Section: Mathematical methods and models, No. 8 (26), 2013, pp. 45-49

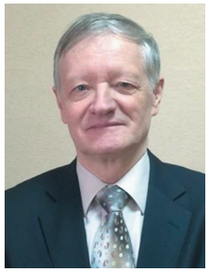
2. **Anuashvily A.N., Kukin I.M.** Psychodiagnostics algorithm on face asymmetry. The journal: "Science outlook" No.8 (47), 2013, pp. 17-20

3. **Anuashvily A.N.** Hardware-software complex for of barely visible object detection based on coherent reception of motionless background radiation. The journal: "Global scientific potential", section: electronics, measuring technical equipment, radio engineering and communication, No. 8, 2013, pp. 77-81,

4. **Anuashvily A.N.** the Mathematical description of coherent reception processes of radiation reflected from a motionless background for detection of barely visible mobile objects. The journal: Innovations and investments, No. 6, 2013, pp. 142-145

5. **Anuashvily A.N.** Method of psychological type definition. The patent of the Russian Federation No. 2201131, 2003, priority 2001.

6. **Anuashvily A.N.** Objective psychology based on brain wave model. M., Econ-inform, 2008, p. 292.



Колчин А.Ф., Михеев Н.В.

АРХИТЕКТУРА ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ СИСТЕМЫ, СВЯЗАННОЙ С БЕЗОПАСНОСТЬЮ

В статье представлены результаты анализа архитектур программного обеспечения для систем, связанных с безопасностью; выделены основные компоненты архитектуры и предложено определение архитектуры программного обеспечения систем, связанных с безопасностью; предложены критерии качества и проведено сравнение выделенных компонентов по данным критериям. В работе представлены результаты сравнения применимых структур и стилей, которые предлагается использовать при разработке программного обеспечения, удовлетворяющего требованиям функциональной безопасности, заданным в ГОСТ Р МЭК 61508.

Ключевые слова: *надежность, функциональная безопасность, архитектура, программное обеспечение.*

Введение

Современная тенденция по более строгому выполнению требований безопасности к опасным техническим системам привела к применению мер по обеспечению безопасности не только достаточных, но и действительно необходимых. Однако для этого требуется некоторая численная оценка используемых мер по обеспечению безопасности, которую можно и нужно задавать до начала создания таких систем.

Для оценки аппаратных средств систем безопасности используются в основном статистические методы, позволяющие получить численную оценку надежности аппаратных средств. Для программного обеспечения подобные методы неприменимы, так как ошибки, возникающие в программном обеспечении при его создании и эксплуатации, являются систематическими.

Одним из подходов, объединяющих методы оценки надежности как для аппаратных средств, так и для программного обеспечения, является методология функциональной безопасности, представленная в ГОСТ Р МЭК 61508 [1]. Данный стандарт охватывает разработку относительно простых систем, обеспечивающих выполнение, как правило, одной функции – функции безопасности – и называющихся «системами, связанными с безопасностью».

Одним из ключевых этапов в создании программного обеспечения систем, связанных с безопасностью, является разработка архитектуры программного обеспечения. Но исчерпывающие руководства по разработке архитектур программных систем в настоящее время отсутствует. Существующие работы рассматривают или определенный подвид архитектур, или общие методы проектирования. Одной из причин, тормозящих систематизацию знаний в данной области, является отсутствие общепринятого определения архитектуры программного обеспечения.

В настоящей статье представлены результаты анализа архитектур программного обеспечения и их разработки для систем, связанных с безопасностью, выделены основные

компоненты архитектуры и предложено определение архитектуры программного обеспечения систем, связанных с безопасностью, предложены критерии качества и проведено сравнение выделенных компонентов по данным критериям. В работе представлены результаты сравнения применимых структур и стилей, которые предлагается использовать при разработке программного обеспечения, удовлетворяющего требованиям функциональной безопасности.

1. Система, связанная с безопасностью

1.1. Структура системы

Достаточно длительный опыт разработки и применения систем, связанных с безопасностью, в различных областях позволяет утверждать, что структура такой системы уже устоялась и состоит из следующих компонент:

1. Программируемая электроника:

а) контроллер, выполняющий логику и осуществляющий взаимодействие между компонентами;

б) программное обеспечение, реализующее логику.

2. Входные/выходные устройства и вспомогательные средства:

а) датчики и прочие устройства ввода;

б) исполнительные устройства и прочие устройства вывода;

в) источники питания, средства коммуникации и др.

1.2. Требования к системе

Согласно модели жизненного цикла системы, связанной с безопасностью [1], к началу процесса создания ее архитектуры программного обеспечения разработан уже большой объем документов, описывающих управляемое оборудование, функции безопасности и различные требования к системе программного обеспечения, выявленные на предыдущих стадиях. Многие требования являются типичными для большинства разрабатываемых систем, связанных с безопасностью. Анализ требований к описанной выше структуре позволил выделить следующие существенные для программного обеспечения требования и ограничения к системе, связанной с безопасностью:

1. Строго заданное максимальное время отклика системы.

2. Разрабатываемое программное обеспечение предназначено для работы на программируемых контроллерах с ограниченными ресурсами.

3. Программное обеспечение сильно связано с более низкоуровневыми задачами (например, вводом-выводом), поэтому строго привязано к операционной системе (или даже реализует ее функции).

Таблица 1.Преимущества и недостатки структур программ

Структура	Преимущества	Недостатки
Простой цикл управления	Простота	Худшее время реакции равно сумме времен выполнения всех подзадач[1]. При добавлении новых устройств или дополнительной обработки увеличивается худшее время реакции
Система, управляемая прерываниями	Позволяет существенно увеличить время реакции для высокоприоритетных подзадач по сравнению с простым циклом управления. Является развитием идеи простого цикла управления, но остается достаточно простым	Проблема раздельной памяти, поскольку когда появляется прерывание, основной поток может остановиться на середине вычислений, в то время как код, выполняемый по прерыванию может изменить данную память
Совместная многозадачность	Отсутствие необходимости защищать все разделяемые структуры данных. Упрощает процесс переноса однопоточного кода в многопоточную среду. Достаточно простое расширение функционала (путем добавления подпрограммы в очередь выполнения)	При сбое одного потока отказывают все прочие, поскольку не вызывается операция «отдать процессорное время» Высокая сложность реализации многопоточного ввода-вывода
Вытесняю-щая многозадач-ность / RTOS	Возможность полноценной реализации многопоточного ввода-вывода. Возможность использования многопроцессорных систем. Одна отказавшая программа не ока-зывает влияния на другие программы. В случае отсутствия использования общей памяти программист может раз-рабатывать программу как однопоточную – всю работу выполняет операционная система	Накладные ресурсы на выполнение задач самой операционной системой. Сильное усложнение системы в целом. Проблема раздельной памяти

Таблица 2. Сравнение рассматриваемых структур программы по критериям качества

	Возможность установки приоритетов у подпрограмм	Независимость худшего времени реакции от колличества подпрограмм	Независимость худшего времени реакции от изменения подпрограммы	Общая простота реализации системы	Простота реализации подпрограмм	Простота добавления подпрограмм	Отсутствие накладных расходов, не связаных с основной логикой	Возможность написания «однопоточного» кода	Независимость подпрограмм
Простой цикл управления	-	-	-	+	+	+	+	+	-
Система, управляемая прерываниями	-	-	-	+	-	+	+	-	-
Совместная многозадачность	Задается программистом	-	-	-	-	+	-	-	-
Вытесняющая многозадачность / RTOS	+	+	+	-	+	+	-	+	+
Обозначения: «+» - критерий применяется; «-» - критерий не применяется.									

4. Отсутствие необходимости хранения больших объемов данных.

5. Отсутствие сложной бизнес-логики, поскольку в большинстве случаев крайне не рекомендуется реализовывать на контроллере функции, не связанные с безопасностью[1].

6. Взаимодействие с пользователем минимально, работа в основном автономна.

1.3. Требования к архитектуре программного обеспечения

Можно выделить три группы требований к архитектуре программного обеспечения[1]:

1. Требования уровня полноты безопасности к архитектуре программного обеспечения и инструментам проектирования.

2. Общие требования со стороны системы, связанной с безопасностью. Данные требования прямо или косвенно могут влиять на архитектуру.

3. Частные требования к программному обеспечению со стороны архитектуры аппаратного обеспечения.

Первая группа включает в себя различные требования, например, к документальному оформлению процесса, прослеживаемости и т.п. Также данная группа включает методы разработки архитектуры, требуемые для конкретного применения в зависимости от уровня полноты безопасности.

Вторая группа включает в себя ограничения по ресурсам, размерам, интерфейсам ввода-вывода и т. д., которые зависят от конкретной задачи. Однако можно утверждать, что данные требования в основном ограничивают ресурсоемкость архитектуры [2].

Источником третьей группы может быть вид разработки, например, если необходимо надстроить разрабатываемую систему над имеющейся основой, предоставляемой производителем контроллера. Кроме того, они могут быть связаны с особенностями аппаратного обеспечения, когда выбранный контроллер реализует специальную технологию, оптимизированную для определенной архитектуры программного обеспечения.

Проектирование программного обеспечения обычно ведется тремя разными способами [3]:

а) Разработка нового программного обеспечения на основе спецификации.

б) Разработка программного обеспечения для интеграции в существующую платформу. Данный процесс больше ориентирован не на проектирование и разработку программного обеспечения, а на отображение требуемого функционала на заданный программный каркас (framework).

в) Доработка существующего программного обеспечения. Данный процесс не рассматривается в настоящей работе, поскольку действия по доработке существенно зависят от дорабатываемой системы.

Как вариант (а), так и вариант (б) являются приемлемыми при создании программного обеспечения для новой системы, поскольку интеграция в существующую

[1] В [1] нет каких-либо ограничений на размеры или сложность программ, однако с повышением требований к отказоустойчивости к системе, усложняются методы обеспечения ее уровней полноты безопасности, поэтому рекомендуется реализовывать более простые (как вариант – реализовывать частично) функции безопасности на отдельной системе, связанной с безопасностью.

Таблица 3. Преимущества и недостатки стилей архитектур

Архитектура	Преимущества	Недостатки
Конвейеры и фильтры	Возможность представления всего поведения программы как простой последовательности отдельных фильтров. Повторное использование фильтров. Простое добавление нового функционала путем добавления фильтра в очередь обработки. Возможно проведение специальных проверок, таких как анализ на взаимные блокировки или пропускной способности. Потенциально простое распараллеливание кода	Зачастую требуется организация пакетной обработки. Ввиду требования независимости фильтров, проектировщику приходится считать, что данные полностью перерабатываются каждым фильтром. В частности, может потребоваться каждый раз приводить данные к общему виду и в каждом фильтре отдельно их разбирать
Абстракция данных и объектно-ориентированная организация	Возможность изменения реализации без последствий для клиентов. Объединение данных и функций, которые их обрабатывают, позволяет проектировщикам декомпозировать задачу до набора взаимодействующих между собой сущностей	Ввиду специфики процедурных вызовов, вызывающий объект должен иметь явный доступ к вызываемому, в отличие от конвейеров или событийной системы. Как следствие – при изменении идентификатора объекта требуется явно оповестить все вызывающие объекты. Возможно наличие сторонних эффектов (например, если объект A использует B и объект C также использует B, то изменения объекта B объектом C выглядят как сторонние эффекты для объекта A, и наоборот)
Событийная система, неявный вызов	Большие возможности по повторному использованию: в систему может быть добавлен новый компонент путем простой регистрации как обработчика событий. Неявный вызов упрощает развитие системы: любой компонент может быть переделан или заменен без влияния на прочие компоненты	Контроль над проводимыми вычислениями лежит не на компонентах программного обеспечения, а на системе. Нет гарантии реакции на событие Как следствие предыдущего положения, подтверждение реакции на событие должно производиться явно. Сложные процедуры обмена большими объемами данных
Уровневая (слоевая) система	Легкое наращивание абстракций. Широкие возможности повторного использования, подобно абстрактным типам данных. Возможность реализации отдельных уровней разными способами путем декларации интерфейсов взаимодействия между уровнями	Не все задачи можно достаточно просто разложить на уровневую структуру. Достаточно сложно определить подходящий уровень абстракции. Наличие дополнительных накладных расходов ввиду перевода абстракции с одного уровня на другой

платформу рассматривается как использование вновь уже существующего программного обеспечения, а не его доработка.

2. Проектирование архитектуры программного обеспечения

2.1. Определение архитектуры программного обеспечения

Среди разработчиков различных систем существует общее понимание важности архитектурного уровня создаваемой системы. Однако пока еще не появилось никакого устоявшегося согласия по точному определению архитектуры системы вообще.

Выполненный анализ показал, что архитектуру программного обеспечения систем, связанных с безопасностью, можно представить и описать с помощью следующих трех инвариантных составных частей (которые иногда называют *шаблонами архитектуры*):

1. Структура программы [4] описывает способы организации базовых функций, таких как управление памятью, управление потоками и т.п.

2. Стиль архитектуры [5] описывает способ логического деления системы, которое реализуется на основе структуры системы.

3. Решение задачи, описываемое в терминах структуры программы и стиля архитектуры.

Таким образом, в настоящей статье под архитектурой программного обеспечения систем, связанных с безопасностью, будем понимать набор представлений и описаний:

- структуры программы;
- стиля архитектуры;

Таблица 4. Сравнение стилей архитектуры

	Простота	**Поддерживаемость**	**Повторное использование**	**Производительность**	**Масштабируемость**	**Переносимость**
Конвейеры и фильтры	+	+ Легко заменить фильтр	+ Позволяет добиться разных эффектов за счет смены порядка	- Нет взаимосвязи между фильтрами (нельзя передать управление из одного фильтра к другому)	±	- Не переносимо
Абстракция данных и объектно-ориентированная организация	±	+ Множество принципов, позволяющих увеличить абстракцию (инкапсуляция, инверсия управления и т.п.)	+	±	±	±
Событийная система, неявный вызов	- Иногда поведение непредсказуемо, сложно управлять	+ Заменить или убрать компонент можно без влияния на другие	+ Компоненты могут быть зарегистрированы в системе для обработки любых событий	- Компоненты не имеют возможности управлять вычислениями	- Могут возникать сторонние эффекты, если два компонента используют третий	+ Компоненты могут реагировать на любые события
Уровневая (слоевая) система	±	+ Изменение одного уровня воздействует только на два соседних	+ Не зависят от вышележащих уровней	±	+ Может быть объединен с другими стилями	
Обозначения: «+» – критерий применяется; «-» – критерий не применяется; «±» – критерий применяется частично.						

- выполняемой функции безопасности в терминах структуры программы и стиля архитектуры.

2.2. Структура программы

Системы, связанные с безопасностью, по сути, являются подклассом встраиваемых систем, поэтому варианты организации структуры программы довольно схожи с вариантами, применяемыми в обычных встраиваемых системах. Для реализации программного обеспечения систем, связанных с безопасностью, можно использовать следующие структуры программ [6]:

1. Простой цикл управления (simple control loop).
2. Система, управляемая прерываниями (interrupt controlled system).
3. Совместная или кооперативная многозадачность (cooperative multitasking).
4. Вытесняющая многозадачность (preemptive multitasking) или многопоточность (multi-threading).
5. Прочие варианты операционных систем реального времени.

В таблице 1 представлены полученные в результате анализа преимущества и недостатки перечисленных структур при создании систем, связанных с безопасностью, что позволило выделить следующие критерии сравнения рассматриваемых структур.

1. Возможность установки приоритетов у подпрограмм.
2. Независимость худшего времени реакции:
   а) от количества подпрограмм;
   б) от изменения подпрограммы.
3. Общая простота реализации системы.
4. Простота реализации подпрограмм.
5. Простота добавления подпрограмм.
6. Отсутствие накладных расходов, не связанных с основной логикой решаемой задачи.
7. Возможность написания «однопоточного» кода.
8. Независимость подпрограмм.

В таблице 2 рассмотренные структуры сравниваются по выделенным критериям.

2.3. Стиль архитектуры

Существует множество различных архитектурных конструкций, часто называемых шаблонами архитектуры, которые представляют собой решения в рамках некоторо-

Таблица 5. Возможные сочетания структуры и стиля архитектуры

	Простой цикл управления	**Система, управляемая прерываниями**	**Совместная многозадачность**	**Вытесняющая многозадачность / RTOS**
Конвейеры и фильтры	Существуют разработки, показывающие возможность эффективно обрабатывать данные в такой конфигурации, однако основная область применения данного сочетания технологий – управление сетевым трафиком [17]	В общем случае такое сочетание не применяется	Конвейеры и фильтры можно рассматривать как вариант совместной многозадачности	Сочетание возможно
Абстракция данных и объектно-ориентированная организация	Сочетание возможно	Сочетание возможно	Сочетание возможно	Сочетание возможно
Событийная система, неявный вызов	Несовместимо	Сочетание возможно	Сочетание возможно	По сути, RTOS является операционной системе, основанной на событиях. Как минимум, это один из основных инструментов, позволяющий назначать приоритеты отдельным процессам. Также, пересылка события является самым простым способом взаимодействия между потоками.
Уровневая (слоевая) система	Сочетание возможно	Сочетание возможно	Сочетание возможно	Сочетание возможно

го повторяющегося контекста. На сегодняшний день нет какого-то единого списка подобных шаблонов, или даже единого мнения по поводу того, насколько они должны быть абстрактными, однако в рамках задачи, рассматриваемой в настоящей работе, можно выделить следующий набор шаблонов (или стилей) архитектур[1] [3]:

1. Конвейеры и фильтры (pipes and filters).
2. Абстракция данных и объектно-ориентированная организация (Data Abstraction and Object-Oriented Organization).
3. Событийная система, неявный вызов (Event-based, Implicit Invocation).
4. Уровневая (слоевая) система (Layered system).

В таблице 3 рассмотрены преимущества и недостатки перечисленных стилей программ при создании систем, связанных с безопасностью.

В работе для сравнения стилей архитектуры были использованы следующие критерии качества [7]:

1. Поддерживаемость – степень простоты внесения изменений (добавление новых обработчиков, удаление старых, модификация существующих и т.п.).
2. Повторная используемость – степень применимости составных частей существующих программ при создании новых.
3. Производительность.
4. Простота – понятность системы для новых разработчиков, возможность быстро разобраться в существующих модулях.
5. Масштабируемость.
6. Переносимость – отсутствие привязки к определенным инструментам (среде разработки, операционной системе, компилятору и т.п.).

В таблице 4 рассмотренные стили сравниваются по перечисленным критериям.

Безусловно, не все стили можно применять при реализации рассмотренных структур программ. В таблице 5 представлены все возможные сочетания рассмотренных выше структур и стилей программ. Применение данной таблицы позволит повысить корректность и эффективность разработки программного обеспечения систем, связанных с безопасностью, на этане выбора архитектуры программного обеспечения.

2.4. Решение задачи

Как следует из определения, при формировании архитектуры используется высокоуровневое представление функций безопасности, а не ее спецификация, сформированная на соответствующей стадии жизненного цикла системы, связанной с безопасностью. Необходимая детализация выбирается исходя из требований к раз-

[1] Безусловно, возможны как и комбинации указанных архитектур, так и совершенно новые

рабатываемой системе, связанной с безопасностью. В частности, для архитектуры программного обеспечения должно быть описано следующее:

1. Основные компоненты системы, их интерфейсы, компоновка и способы взаимодействия друг с другом.

Архитектура должна отражать высокоуровневое представление компонентов системы (подсистем), наиболее важных с точки зрения большинства участников разработки программного обеспечения, поскольку их требуется учитывать при разработке большинства прочих компонентов системы. Одни подсистемы требуются для работы большинства компонентов (например, подсистема ввода-вывода, инкапсулирующая физический уровень взаимодействия с каналами связи). Другие – являются источниками событий для прочих компонентов (например, сторожевой таймер). Третьи компоненты могут быть наиболее ресурсоемкими и/или критичными для выполнения основной функции системы – функции безопасности.

2. Ключевые шаблоны проектирования и технологии, применяемые в проекте.

Поскольку определенные шаблоны могут влиять на программу в целом (например, пул соединений), то их требуется описать на уровне архитектуры. В том числе, паттерны, которые допустимо использовать на более низких уровнях.

3. Интерфейсы взаимодействия с внешними системами.

4. Сервисы, обеспечивающие поддержку работы основного функционала (ведение журналов, хранение данных и т.п.)

Заключение

В работе представлены результаты анализа архитектур программного обеспечения и их разработки для систем, связанных с безопасностью, а также определены основные компоненты архитектуры.

Предложено определение архитектуры программного обеспечения систем, связанных с безопасностью.

В работе представлены результаты сравнения применимых структур и стилей, которые предлагается использовать при разработке программного обеспечения, удовлетворяющего требованиям функциональной безопасности [1].

Использование рассмотренного подхода позволит повысить корректность и эффективность разработки программного обеспечения систем, связанных с безопасностью, на этапе выбора архитектуры программного обеспечения.

Литература

1. ГОСТ Р МЭК 61508–2012 Функциональная безопасность систем электрических, электронных, программируемых электронных, связанных с безопасностью. Части 1 – 7.

2. **Philip J. Koopman Jr.**, Design constraints on embedded real time control systems. Systems Design & Networks Conference, (1990).

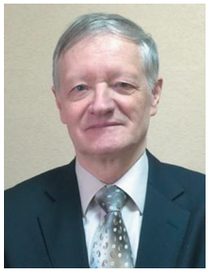
3. **Douglas Densmore, Roberto Passerone, Alberto Sangiovanni-Vincentelli**, A Platform-Based Taxonomy for ESL Design. IEEE Software.

4. **David Stonier-Gibson,** Understanding embedded microcontroller multitasking RTOS alternatives.

5. **David Garlan, Mary Shaw**, An Introduction to Software Architecture.

6. http://en.wikipedia.org/wiki/Embedded_system#Embedded_software_architecturs

7. **Mary Shaw** (1995), Comparing Architectural Design Styles. IEEE Software.



Kolchin A.F., Mikheev N.V.

ARCHITECTURE OF SAFETY RELATED SYSTEM SOFTWARE

The paper presents the results of analysis of architectures for safety related system software. The basic components of architecture are defined, and the definition of safety related system software architecture is offered. Quality criteria are proposed, and comparison of defined components by the criteria is carried out. The paper offers results of comparison of applicable structures and styles that are proposed for application in software development to satisfy to the functional safety requirements specified in GOST R IEC 61508.

Keywords: *dependability, functional safety, architecture, software.*

Introduction

The modern trend to place stricter safety requirements for hazardous technical systems has led to application of not only sufficient but also indeed necessary safety measures. However it requires some quantitative estimation of applied safety measures, which is possible and necessary to specify prior to the development of such systems.

For estimation of safety related system hardware, one generally uses statistical methods which allow us to obtain quantative estimation of hardware dependability. Similar methods are inapplicable for software, as errors arising in software during its development and operation are systematic.

One of the approaches integrating methods of dependability estimation both for hardware and software is the methodology of functional safety presented in GOST R IEC 61508 [1]. The given standard covers the development of relatively simple systems ensuring the performance, as a rule, of one function, i.e. safety function, and referring to as "safety related systems."

One of the key stages in software development for safety related systems is the development of software architecture. However, comprehensive guides on development of software architecture are not available at present. Existing studies consider either particular subtypes of architecture, or general methods of designing. One of the reasons hampering knowledge systematization in the area is absence of the generally accepted definition of software architecture.

This paper presents the results of analysis of architectures for safety related system software. The basic components of architecture are defined, and the definition of safety related system software architecture is offered. Quality criteria are proposed, and comparison of defined components by the criteria is carried out. The paper offers results of comparison of applicable structures and styles that are proposed for application in software development to satisfy to the functional safety requirements.

1. Safety related system

1.1. System structure

Sufficiently long experience of development and application of safety related systems in various areas allow us to assert that the structure of such system has already

Table 1. Advantages and disadvantages of program structures

Structure	Advantages	Disadvantages
Simple control loop	Simplicity	The worse time of reaction is equal to the sum of execution times of all subtasks. When adding new devices or supplementary processing, the worse time of reaction increases
Interrupt controlled system	Allows essentially increasing the time of reaction for high-priority subtasks in comparison with a simple control loop. It is development of idea of simple control loop, but it still remains sufficiently simple	The problem of split memory, as when there is an interruption, the basic stream can stop in the middle of calculations while the code carried out on interruption can change the given memory
Cooperative multitasking	There is no necessity to protect all shared data structures. Simplifies process of one-thread code transition into multithreaded environment. Simple enough expansion of functionality (by subroutine addition in execution queue)	In case of failure of a single thread, all others also fail as the operation "to give processor time" is not called. High complexity of multithreaded input-output
Preemptive multitasking / RTOS	The possibility of adequate realization of multithreaded input-output. The possibility of multiprocessing systems use. A single failed program does not affect other programs. In case of absence of shared memory use, a programmer can develop the software as one- thread program – the whole operation is executed by an operating system	Overhead resources for execution tasks by operating system itself. Strong complication of a system as a whole. A problem of shared memory

become well-established and consists of the following elements:

1. Programmable electronics:

а) controller, which is executing the logic and realizing the interaction between components;

б) software executing the logic.

2. Input /output devices and auxiliary means:

а) sensors and other input devices;

б) executive devices and other output devices;

в) power supplies, communication medium, etc.

1.2. System requirements

According to the life cycle model of a safety related system [1], by the start of the development process of its software architecture, a great volume of documents describing the controlled equipment, safety functions and various requirements for software system identified at previous stages is developed. Many requirements are typical for the majority of developed safety related systems. The analysis of requirements for the structure described above has allowed us to identify the following requirements and restrictions for a safety related system essential for software:

1. Strictly specified maximal time of system response.

2. Software under development is intended for execution on programmable controllers with limited resources.

3. Software is strongly connected with lower level tasks (for example, input/output), therefore it is strictly tied to the operating system (or even implements its functions).

4. Absence of necessity for storage of great volumes of data.

5. Absence of a complex business logic, as in most cases it is strictly not recommended to implement non-safety related functions on a controller[1].

6. Interaction with a user should be minimal, operation is basically autonomous.

1.3. Requirements to software architecture

It is possible to distinguish three groups of software architecture requirements [1]:

1. Requirements of safety integrity level (SIL) for software architecture and designing tools.

2. General requirements stipulated by a safety related system. These requirements can influence architecture directly or indirectly.

3. Special requirements for software stipulated by hardware architecture.

The first group includes various requirements, for example, for documentary registration of process, traceability, etc. The given group also includes methods of architecture development required for specific application depending on a safety integrity level.

The second group includes restrictions for resources, sizes, interfaces of input-output, etc., which depend on a specific task. However, it is possible to state that the given requirements basically limit architecture resource demand [2].

The source of the third group can be a type of development, for example, if it is necessary to build a system

[1] In [1] there are no restrictions as for the size or complexity of programs, however with increase of requirements for system fault tolerance, methods of its SIL ensuring become more complicated, therefore it is recommended to realize more simple (or to realize in part) safety functions on a separate safety related system.

Table 2. Comparison of considered program structures by quality criteria

	An opportunity of subroutines priority settings	Independence of the worse time of reaction from the number of subroutines	Independence of the worse time of reaction from a subroutine change	General simplicity of system implementation	Simplicity of subroutines' realization	Simplicity of subroutines' addition	Absence of the overhead expenses which are not connected to the basic logic	An opportunity of single-thread code writing	Independence of subroutines
Simple control loop	-	-	-	+	+	+	+	+	-
Interrupt controlled system	-	-	-	+	-	+	+	-	-
Cooperative multitasking	It is set by the programmer	-	-	-	-	+	-	-	-
Preemptive multitasking / RTOS	+	+	+	-	+	+	-	+	+
Designations: "+" – criterion is applied; "-" – criterion is not applied.									

Table 3. Advantages and disadvantages of style architectures

Architecture	Advantages	Disadvantages
Conveyors and filters	The possibility of representation of the program whole behavior as a simple sequence of separate filters. A reuse of filters. Simple addition of new functionality by adding a filter to a processing queue. It is possible to carrying out special checks, such as the analysis of mutual blocking or filter capacity. Potentially simple multisequencing of a code	The organization of batch processing is frequently required. In view of filters' independence requirement, the designer should believe that the data are completely processed by each filter. In particular, it can be demanded each time to reduce data to a common view and to assort them separately in each filter
Data abstraction and object-oriented organization	The possibility of implementation change without consequences for clients. Combination of data and functions which process them allows designers to decompose the task down to a set of entities cooperating among themselves	In view of specificity of the procedural calls, the calling object should have explicit access to the called object, as opposed to conveyors or to event-trigger system. As a consequence, when changing an object identifier, it is required to explicitly notify all calling objects. Presence of outside effects is possible (for example, if an object A uses an object B and an C also uses the object B, then the changing of the object B by the object C look as a outside effect for the object A and vice-versa)
Event-trigger system, implicit call	Ample possibilities for system reuse: the system can be extended by a new component by simple registration as events' handler. The implicit call simplifies system development: any component can be altered or replaced without influence on other components	The control over executed calculations belongs not to software components but to a system. There is no guarantee of reaction to an event. As consequence of the previous statement, confirmation of reaction to the event should be made explicitly. Complex procedures of mass data exchange
Level-sensitive (layer-wise) system	Easy escalating abstraction. Ample opportunities of reuse, similarly to abstract types of data. The opportunity of realization of separate levels in different ways by the declaration of interfaces of interaction between levels	Not all tasks can be decomposed simply enough down to a level structure. It is difficult enough to define a suitable level of abstraction. Presence of an additional overhead charge in view of translation of abstraction from one level to another

Table 4. Comparison of architecture styles

	Simplicity	Supportability	Design reuse	Efficiency	Scalability	Portability
Conveyors and filters	+	+ It is easy to replace a filter	+ Allows achieving different effects due to change of the order	- There is no interrelation between filters (it is impossible to transfer control from one filter to another	±	- Not portable
Data abstraction and object-oriented organization	±	+ Set of principles, allowing increasing abstraction (encapsulation, inversion of control and so on)	+	±	±	±
Event-trigger system, implicit call	- Sometimes the behavior is unpredictable, it is difficult to control	+ It is possible to replace or remove a component without influence on others	+ Components can be registered in a system for processing any events	- Components have no possibility to control calculations	- Outside effects can arise if two components use the third one	+ Components can react to any events
Level-sensitive (layerwise) system	±	+ Change of one level influences only two neighboring levels	+ Do not depend on overlying levels	±	+ Can be incorporated with other styles	
Designations: "+"– criterion is applied; "-" – criterion is not applied; "±"– criterion is applied partially.						

under development above the available base provided by a controller manufacturer. Besides, it can be connected to features of hardware when a chosen controller implements special technology optimized for the certain architecture of software.

Software is usually developed using three different ways [3]:

a) Development of new software based on a specification.

b) Software development for integration into an existing platform. This process is focused not on software designing and development, but rather on mapping required functions on the given program framework.

c) Existing software improvement. The given process is not considered in this study as actions on improvement substantially depend on an updated system.

Both alternatives (a) and (b) are acceptable for development of software for a new system, as integration into an existing platform is considered as reuse of already existing software, rather than its improvement.

2. Designing of software architecture

2.1. Definition of software architecture

Among developers of various systems, there is a general understanding of the importance the architectural level of a system under development. However, at present there is none established consent on the exact definition of a system architecture.

The analysis carried out so far has shown that software architecture of safety related systems can be presented and described with the help of the following three invariant constituents (which are named sometimes as *architecture patterns*):

1. *Program structure* [4] describes ways of organization of base functions, such as memory management, flow control, etc.

2. *Architecture style* [5] describes the method of logic division of a system, which is realized on the basis of system structure.

3. *Task solution*, described in terms of program structure and architecture style.

Thus, in this paper as architecture of safety related system software, we shall understand a set of conceptions and descriptions of:

program structure;

architecture style;

executed safety function in terms of program structure and architecture style.

2.2. Program structure

Safety related systems are in fact a subclass of embedded systems, and therefore, versions of program structure organization are rather similar to the versions used in common embedded systems. For implementation of safety

Table 5. Possible combinations of architecture structure and style

	Simple control loop	Interrupt controlled system	Cooperative multitasking	Preemptive multitasking/ RTOS
Conveyors and filters	There are developments showing the possibility to effectively process data in such a configuration, however the basic scope of the given combination of technologies is a network traffic control [7]	Generally such combination is not applied	Conveyors and filters can be considered as a cooperative multitasking alternative	A combination is possible
Data abstraction and object-oriented organization	A combination is possible	A combination is possible	A combination is possible	A combination is possible
Event-trigger system, implicit call				As a matter of fact, RTOS (Real-Time Operating System) is the operating system based on events. At least, it is one of the basic tools, allowing prioritizing separate processes. Also, transfer of event is the simplest way of interaction between streams.
Level-sensitive (layer-wise) system	A combination is possible	A combination is possible	A combination is possible	A combination is possible

related system software, it is possible to use the following program structures [6]:

1. Simple control loop.
2. Interrupt controlled system.
3. Cooperative multitasking.
4. Preemptive multitasking or multi-threading.
5. Other versions of real time operating systems.

Table 1 shows the advantages and disadvantages of the listed structures at development of safety related systems identified as a result of the analysis, which allowed us to define the following criteria of comparison of considered structures.

1. Possibility of setting of subprograms priorities.
2. Independence of the worst time of reaction:
а) from the number of subprograms;
б) from subprogram change.
3. General simplicity of system realization.
4. Simplicity of subprogram realization.
5. Simplicity of subprogram addition.
6. Absence of overhead expenses not related to the basic logic of the task under solution.
7. Opportunity of one-thread code writing.
8. Independence of subprogram s.

Table 2 presents comparison of the considered structures by defined criteria.

2.3. Architecture style

There is a good deal of various architectural designs frequently named as architecture patterns, which represent solutions within the framework of some repeating context. At present there is not any common list of similar patterns, or even a common opinion concerning their abstraction, however within the framework of the problem considered in the present study it is possible to identify the following set of architecture patterns[1] (or styles) [3]:

1. Pipes and filters.
2. Data Abstraction and Object-Oriented Organization.
3. Event-based, Implicit Invocation.
4. Layered system.

Table 3 considers the advantages and disadvantages of the listed program styles at development of safety related systems.

The following criteria of quality [7] have been used in this study for comparison of architecture styles:

1. Supportability – a degree of simplicity of change introduction (addition of new handlers, removal of old ones, updating existing ones, etc.).
2. Repeated usability – a degree of applicability of existing program constituents for creation of new ones.
3. Efficiency.
4. Simplicity – system understandability for new developers, possibility of quickly understanding existing modules.
5. Scalability.
6. Portability – absence of binding to certain tools (to the development environment, operating system, compiler, etc.).

Considered styles presented in Table 4 are compared by the listed criteria.

Undoubtedly, not all styles can be applied at implementation of the considered programs' structures. Table 5 shows

[1] Certainly, both the combinations of mentioned architectures and completely new ones are possible.

all possible combinations of the structures and program styles considered above. Application of the given table will allow enhancing correctness and efficiency of development of safety related system software, when selecting software architecture.

2.4. The task solution

As follows from the definition, when shaping architecture, the high-level representation of safety functions is used, and not its specification generated at the corresponding stage of safety related system life cycle. Necessary detailed elaboration is selected based on requirements for the safety related system under development. In particular, for software architecture the following things should be described:

1. The basic system components, their interfaces, arrangement and methods of interaction with each other.

The architecture should reflect a high-level representation of system (subsystem) components, the most important ones from the point of view of the majority of software development participants as they have to be taken into account during development of the majority of other system components. Some subsystems are required for operation of the majority of components (for example, input-output subsystem encapsulating a physical level of interaction with communication channels). Other subsystems are sources of events for miscellaneous components (for example, a watchdog timer). The third components can be the most resource-intensive and/or critical for performance of the system basic function – safety function.

2. Key patterns of designing and technologies used in the project.

As certain patterns can influence the program as a whole (for example, connections pool), they have to be described at the architecture level. Including the patterns which are allowable to use at lower levels.

3. Interfaces of interaction with external systems.

4 The services providing support for basic functional operation (journalizing, data storage, etc.).

Conclusion

The paper presents the results of analysis of software architectures and their development for safety related systems. Also, the basic components of architecture are defined.

The definition of software architecture for safety related is offered.

The paper offers results of comparison of applicable structures and styles that are proposed for application in software development to satisfy to the functional safety requirements [1].

The application of the considered approach will allow enhancing the correctness and efficiency of software development for safety related systems at the stage of software architecture selection.

References

1. GOST R IEC 61508-2012 Functional safety of electrical, electronic and programmable electronic safety related systems. Parts 1 – 7.

2. **Philip J. Koopman Jr.,** Design constraints on embedded real time control systems. Systems Design & Networks Conference, (1990).

3. **Douglas Densmore, Roberto Passerone, Alberto Sangiovanni-Vincentelli**, A Platform-Based Taxonomy for ESL Design. IEEE Software.

4. **David Stonier-Gibson**, Understanding embedded microcontroller multitasking RTOS alternatives.

5. **David Garlan, Mary Shaw**, An Introduction to Software Architecture.

6. http://en.wikipedia.org/wiki/Embedded_system#Embedded_software_architectures.

7. **Mary Shaw** (1995), Comparing Architectural Design Styles. IEEE Software.

Бочков А.В., Ушаков И.А.

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ РЕСУРСОВ, ПРЕДНАЗНАЧЕННЫХ ДЛЯ ЗАЩИТЫ ОБЪЕКТОВ КРИТИЧЕСКОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ ОТ ТЕРРОРИСТИЧЕСКИХ АТАК НА ОСНОВЕ СУБЪЕКТИВНЫХ ЭКСПЕРТНЫХ ОЦЕНОК

Исследован на устойчивость алгоритм решения задачи распределения ресурсов, предназначенных для защиты объектов критической инфраструктуры от террористических атак на основе субъективных экспертных оценок. Выполнено сравнение результата для разного типа оценок (оптимистические, умеренные, пессимистические). Подобный анализ дает возможность установить, какие меры следует предпринять для каждого требуемого уровня защиты (или допустимого уровня уязвимости) и, выделенных на эти мероприятия, ограниченных, как правило, ресурсов.

Ключевые слова: *критическая инфраструктура, защита, оптимизация, распределение ресурсов, экспертные оценки.*

1. Введение

Решение задачи оптимального распределения ресурсов, предназначенных на обеспечение мер защиты объектов критической инфраструктуры от возможных атак террористов, естественным образом основано на субъективных оценках, сделанных экспертами в данной области. В этом случае использование оценок экспертов неизбежно: не существует никакой другой возможности получить исходные данные для системного анализа живучести объектов. Нет такого явления как «сбор реальных данных», кроме того, нет никаких «однородных образцов» для последовательного статистического анализа наблюдений, так как любой случай уникальный и невоспроизводимый. Однако количественный анализ необходимого уровня защиты должен быть выполнен.

Каковы пункты, необходимые для проведения такой экспертизы? На наш взгляд, они включают в себя следующее:

- возможность террористических атак на некоторый объект или группу объектов;
- возможное время такого нападения;
- ожидаемые последствия нападения и возможные потери;
- возможная мера защиты и связанные с этим расходы.

Так как экспертные оценки таких сложных явлений, как правило, нечеткие из-за недостаточного взаимопонимания в группе экспертов в отношении тех же самых действий и противодействий, возникает вопрос: возможно ли вообще сделать какой-либо разумный прогноз и, кроме того, сказать об «оптимальном распределении ресурсов защиты»?

Прежде всего, мы должны подчеркнуть, что понятие «оптимального решения» имеет отношение только к математическим моделям. На практике, ненадёжные (и даже непоследовательные) данные и неизбежная погрешность модели (то есть различие между моделью и действительностью) позволяют нам говорить только о «рациональных решениях» рассматриваемой задачи.

Однако, поскольку проблема существует, в любом конкретном случае она должна быть решена с использованием математической модели или без таковой. Наша цель состоит в том, чтобы проанализировать стабильность решений оптимального распределения ресурсов в рамках нечетких оценок экспертов.

2. Анализ стабильности решения

Во-первых, проанализируем, как изменение оценки расходов влияет на решение проблемы на уровне единственного объекта, который нужно защитить от возможной террористической атаки. Для прозрачности объяснения мы не будем рассматривать влияние защиты на федеральных и государственных уровнях.

Рассмотрим некоторый условный объект (Объект-1), который может быть объектом террористической атаки. Предполагается, что может быть три различных типа действий врага (Действие-1, Действие-2 и Действие-3). Защищающаяся сторона может выбрать несколько определенных мер защиты против каждого типа действия $\{M(i, j)\}$, где i соответствует типу действия стороны нападения, а j, соответственно, соответствует типу предпринятой защитной меры.

Предположим, что у нас есть три варианта оценок затрат на защиту: нижний, средний и высокий, как это представлено в таблицах 1-3. Более низкие оценки приблизительно на 20 % ниже соответствующих средних оценок, а высокие оценки также приблизительно на 20 % выше.

Существуют три группы экспертных оценок: «оптимистичный», «умеренный» и «пессимистичный». Первая предполагает, что успех в каждой ситуации может быть достигнут низкими расходами на защитные меры; последняя группа требует больших расходов для защиты в той же самой ситуации, а средняя группа дает средние показатели.

Как интерпретировать приведенные в таблицах 1-3 оценки?

Рассмотрим возможность Действия-1 против объекта. При полном отсутствии защиты уязвимость объекта равна 1 (или 100 %). Если мы потратили $\Delta E = 0.8$ условных единиц стоимости защиты (УЕСЗ) и предприняли меру $M(1, 1)$, уязвимость объекта уменьшится до 0,25. Если нас не удовлетворяет такой уровень защиты, применяется следующая защитная мера $M(1, 2)$, что приводит к уменьшению уязвимости объекта от 0,25 до 0,3 и стоит, соответственно, 2 УЕСЗ.

Теперь рассмотрим действия всех трех возможных террористических атак. Заранее никто не знает, какое действие будет предпринято против конкретного объекта защиты. В этой ситуации самая разумная стратегия обеспечивает равные уровни защиты против всех продуманных типов террористических атак, например, как это было предложено в [1, 3]. Это означает, что, если нужно гарантировать уровень защиты, приравненный к γ, тогда нужно рассматривать только такие меры против каждого действия, которые обеспечивают уровень уязвимости не меньше, чем γ. Например, в рассматриваемом случае, если необходимый уровень уязвимости должен был быть не выше, чем 0.1, нужно использовать одновременно следующие меры защиты от возможных террористических атак: $M(1, 3)$, $M(2, 3)$ и $M(3, 4)$.

Метод равной защиты от различных типов враждебных действий, кажется довольно естественным. Имея дело с природными или другими непреднамеренными воздействиями, можно говорить о субъективных вероятностях воздействий некоторого особого типа, однако, в случае намеренного нападения хорошо информированного и подготовленного противника, такой подход не подходит. Факт состоит в том, что, как только противник узнает о ваших предположениях о его возможных дей-

Таблица 1.
Случай оптимистичных оценок

ОБЪЕКТ-1		γ_1	C
Действие-1	M(1, 1)	0.25	0.8
	M(1, 2)	0.2	2
	M(1, 3)	0.1	2.5
	M(1, 4)	0.01	3.8
Действие -2	M(2, 1)	0.2	1.6
	M(2, 2)	0.16	2.8
	M(2, 3)	0.07	3.2
	M(2, 4)	0.02	5.6
Действие -3	M(3, 1)	0.11	0.4
	M(3, 2)	0.1	2
	M(3, 3)	0.05	2.4
	M(3, 4)	0.04	3.6
	M(3, 5)	0.01	5.6

Таблица 2.
Случай умеренных оценок

ОБЪЕКТ -1		γ_2	C
Действие -1	M(1, 1)	0.25	1
	M(1, 2)	0.2	2.5
	M(1, 3)	0.1	3
	M(1, 4)	0.01	4
Действие -2	M(2, 1)	0.2	2
	M(2, 2)	0.16	3
	M(2, 3)	0.07	4
	M(2, 4)	0.02	7
Действие -3	M(3, 1)	0.11	0.5
	M(3, 2)	0.1	2.5
	M(3, 3)	0.05	3
	M(3, 4)	0.04	5
	M(3, 5)	0.01	7

Таблица 3.
Случай пессимистичных оценок

ОБЪЕКТ -1		γ_3	C
Действие -1	M(1, 1)	0.25	1.2
	M(1, 2)	0.2	3
	M(1, 3)	0.1	6
	M(1, 4)	0.01	7.8
Действие -2	M(2, 1)	0.2	2.4
	M(2, 2)	0.16	3.2
	M(2, 3)	0.07	4.8
	M(2, 4)	0.02	8.4
Действие -3	M(3, 1)	0.11	2
	M(3, 2)	0.1	3
	M(3, 3)	0.05	3.6
	M(3, 4)	0.04	6
	M(3, 5)	0.01	8.4

Таблица 4. Случай оптимистичных оценок

Объект 1			
Порядковый номер	**Предпринимаемые меры**	**Итоговый $\gamma_{объект}$**	**Суммарные расходы, $C_{объект}$**
1	M(1, 1), M(2, 1), M(3, 1)	max {0.25, 0.2, 0.11}=0.25	0.8+1.6+0.4=2.8
2	M(1, 2), M(2, 1), M(3, 1)	max {0.2, 0.2, 0.11}=0.2	2+1.6+0.4=4
3	M(1, 3), M(2, 2), M(3, 1)	max {0.1, 0.16, 0.11}=0.16	2.5+2.8+0.4=5.7
4	M(1, 3), M(2, 3), M(3, 1)	max {0.1, 0.07, 0.11}=0.11	2.5+3.2+0.4=6.1
5	M(1, 3), M(2, 3), M(3, 2)	max {0.1, 0.07, 0.1}=0.1	2.5+3.2+2=7.7
6	M(1, 4), M(2, 3), M(3, 3)	max {0.01, 0.07, 0.05}=0.07	3.8+3.2+2.4=9.4
7	M(1, 4), M(2, 4), M(3, 3)	max {0.01, 0.02, 0.05}=0.05	3.8+5.6+2.4=11.8
8	M(1, 4), M(2, 4), M(3, 4)	max {0.01, 0.02, 0.04}=0.04	3.8+5.6+3.6=13
9	M(1, 4), M(2, 4), M(3, 5)	max {0.01, 0.02, 0.01}=0.02	3.8+5.6+5.6=15

Таблица 5. Случай умеренных оценок

Объект 1			
Порядковый номер	**Предпринимаемые меры**	**Итоговый $\gamma_{объект}$**	**Суммарные расходы, $C_{объект}$**
1	M(1, 1), M(2, 1), M(3, 1)	max {0.25, 0.2, 0.11}=0.25	1+2+0.5=3.5
2	M(1, 2), M(2, 1), M(3, 1)	max {0.2, 0.2, 0.11}=0.2	2.5+2+0.5=5
3	M(1, 3), M(2, 2), M(3, 1)	max {0.1, 0.16, 0.11}=0.16	3+3+0.5=6.5
4	M(1, 3), M(2, 3), M(3, 1)	max {0.1, 0.07, 0.11}=0.11	3+4+0.5=7.5
5	M(1, 3), M(2, 3), M(3, 2)	max {0.1, 0.07, 0.1}=0.1	3+4+2.5=9.5
6	M(1, 4), M(2, 3), M(3, 3)	max {0.01, 0.07, 0.05}=0.07	4+4+3=11
7	M(1, 4), M(2, 4), M(3, 3)	max {0.01, 0.02, 0.05}=0.05	4+7+3=14
8	M(1, 4), M(2, 4), M(3, 4)	max {0.01, 0.02, 0.04}=0.04	4+7+5=16
9	M(1, 4), M(2, 4), M(3, 5)	max {0.01, 0.02, 0.01}=0.02	4+7+7=18

ствиях, он использует это знание в своих интересах и выберет действие, которое вы ожидаете меньше всего.

В рассмотренном выше примере, если выбраны меры $M(1, 2)$ с γ_1=0.2, $M(2, 3)$ с γ_2=0.07 и $M(3, 4)$ с γ_3=0.04, гарантированный уровень защиты объекта равен

$\gamma_{объект} = \max(\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3) = \max(0.2; 0.07; 0.04) = 0.2$.

Для выбора требуемого (или необходимого) уровня защиты объекта можно составить функцию, отражающую зависимость уязвимости от стоимости защиты.

График этой функции изображен на рис. 1.

Приведем для справки численные результаты расчетов для случаев «умеренных» и «пессимистичных» оценок без подробных разъяснений.

Данные табл. 5 представлены, соответственно, на рис. 2.

Подобный анализ дает возможность установить, какие меры следует предпринять для каждого требуемого уровня защиты (или допустимого уровня уязвимости) и данных ограниченных, как правило, ресурсов.

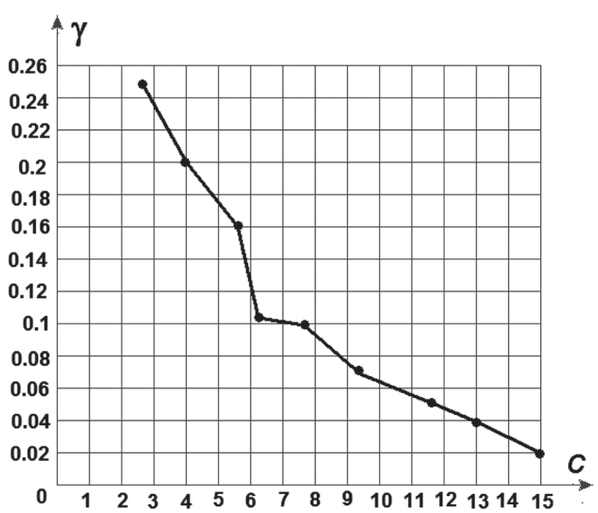


Рис. 1. Зависимость уязвимости объекта от затрат на меры защиты (для случая «оптимистичных» оценок)

Рис. 2. Зависимость уязвимости объекта от затрат на меры защиты (для случая «умеренных» оценок)

Таблица 6. Случай пессимистичных оценок

Объект 1			
Порядковый номер	**Предпринимаемые меры**	**Итоговый $\gamma_{объект}$**	**Суммарные расходы, $C_{объект}$**
1	M(1, 1), M(2, 1), M(3, 1)	max {0.25, 0.2, 0.11}=0.25	1.2+2.4+2=5.6
2	M(1, 2), M(2, 1), M(3, 1)	max {0.2, 0.2, 0.11}=0.2	3+2.4+2=7.4
3	M(1, 3), M(2, 2), M(3, 1)	max {0.1, 0.16, 0.11}=0.16	3+3.2+2=8.2
4	M(1, 3), M(2, 3), M(3, 1)	max {0.1, 0.07, 0.11}=0.11	3+4.8+2=9.8
5	M(1, 3), M(2, 3), M(3, 2)	max {0.1, 0.07, 0.1}=0.1	3+4.8+3=10.8
6	M(1, 4), M(2, 3), M(3, 3)	max {0.01, 0.07, 0.05}=0.07	4+4.8+3.6=12.4
7	M(1, 4), M(2, 4), M(3, 3)	max {0.01, 0.02, 0.05}=0.05	4+8.4+3.6=16
8	M(1, 4), M(2, 4), M(3, 4)	max {0.01, 0.02, 0.04}=0.04	4+8.4+6=18.4
9	M(1, 4), M(2, 4), M(3, 5)	max {0.01, 0.02, 0.01}=0.02	4+8.4+8.4=20.8

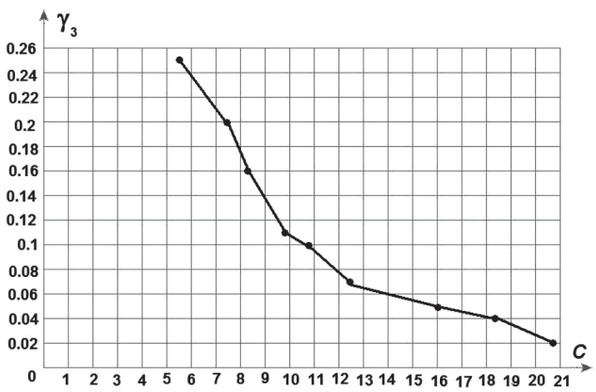


Рис. 3. Зависимость уязвимости объекта от затрат на меры защиты (для случая «пессимистичных» оценок)

Конечная «кривая» зависимости «Расходы в сравнении с уязвимостью» представлена ниже, на рис. 4.

Однако, лица, принимающие решения, интересуются главным образом правильностью предпринятых мер, а не различием в абсолютных величинах предполагаемых затрат на защиту объекта. Другими словами, он интересуется тем, как, например, решение, принятое для оптимистического сценария, будет состоятельно в случае, если фактическая ситуация окажется лучше, чем это было описано в «пессимистическом» сценарии.

Таблица 7. Сравнение решений трех типов сценариев

Тип сценария	**Предпринимаемые меры защиты**	
	$\gamma_{объект} \le 0.1$	**$\gamma_{объект} \le 0.02$**
Оптимистичный	M(1, 3), M(2, 3), M(3, 2)	M(1, 4), M(2, 4), M(3, 5)
Умеренный	M(1, 3), M(2, 3), M(3, 2)	M(1, 4), M(2, 4), M(3, 5)
Пессимистичный	M(1, 3), M(2, 3), M(3, 2)	M(1, 4), M(2, 4), M(3, 5)

Используя вышеприведенные таблицы, рассмотрим два решения прямой задачи с требуемыми уровнями уязвимости 0.1 и 0.02.

Очевидно, что, если цель состоит в том, чтобы достигнуть некоторого данного уровня уязвимости вектор решения (то есть ряд предпринятых мер для того, чтобы защитить объект от террористических атак) в рамках рассматриваемых условий будет тем же самым, хотя приведет к альтернативным расходам.

Сравнение решений для требуемого уровня уязвимости объекта не выше, чем 0.1 и не выше, чем 0.02 приведено в табл. 7.

Как видно, решения для всех трех сценариев совпадают для обоих уровней защиты объекта! Конечно, подобная ситуация происходит не всегда, однако, следует подчеркнуть, что векторы решения для минимаксного критерия $\gamma_{объект} = \max(\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3)$ намного более стабильны, чем вектор для вероятного критерия $1-\gamma_{объект} = 1-\prod_{1 \le k \le n}(1-\gamma_k)$.

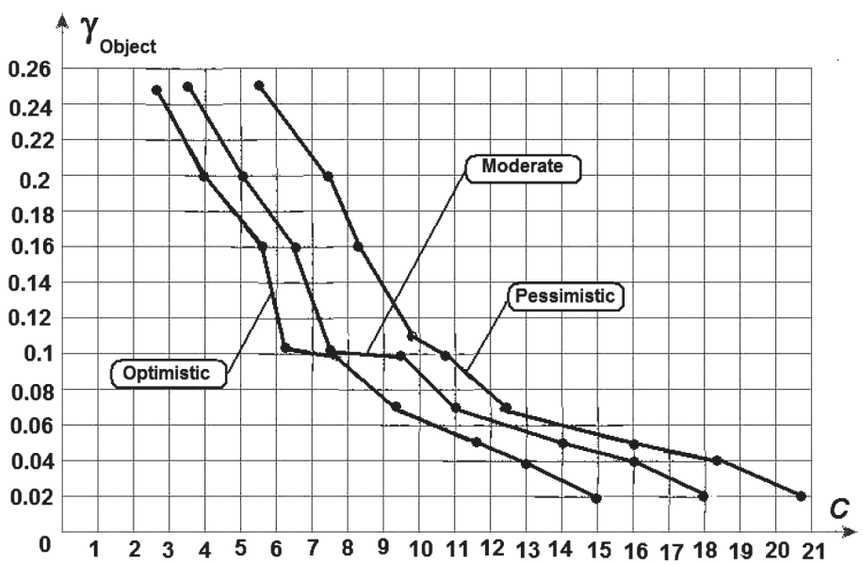


Рис. 4. Сравнение решений для трех типов оценок

3. Вывод

Представленный выше анализ показывает, что предлагаемая модель оптимального распределения ресурсов, предназначенных для защиты объектов критической инфраструктуры от возможных атак террористов, работает достаточно устойчиво. Более подробно, задача исследования устойчивости решения рассмотрена в [2].

Вычислительные эксперименты, выполненные с помощью полноценной компьютерной модели позволит анализировать более реалистические ситуации, включая случайную нестабильность исходных данных. Однако, представляется, что такие «односторонне основанные» экспертные оценки могут приводить к более серьезным ошибкам, чем случайные изменения параметров.

Литература

1. **Ushakov I.A.** Counter-terrorism: Protection Resources Allocation. Part I. Minimax Criterion // Reliability: Theory & Applications , No.2, 2006. P. 71-78.

2. **Bochkov A.V., Ushakov I.A**. Sensitivity analysis of optimal counter-terrorism resources allocation under subjective expert estimates // Reliability: Theory & Applications, No. 2, 2007. P. 78-85.

3. **Ushakov I.A** Counter-terrorism: Protection Resources Allocation. Part III. Fictional “Case Study” // Reliability: Theory & Applications, No.1, 2007. P. 50-59.

Bochkov A.V., Ushakov I.A.

SOLVING THE TASK OF RESOURCES ALLOCATION FOR CRITICAL INFRASTRUCTURE PROTECTION AGAINST TERRORIST ATTACKS BASED ON SUBJECTIVE EXPERT ESTIMATES

The paper studies the stability of the algorithm for solving the problem of optimal resources allocation for critical infrastructure protection against possible terrorist attacks based on subjective expert estimates. The results for different types of estimates (optimistic, moderate, pessimistic ones) are compared. Such analysis makes it possible to define what measures should be taken for each level of protection (or accepted level of vulnerability) and generally limited resources allocated for these measures.

Keywords: *critical infrastructure, protection, optimization, resources allocation, expert estimates.*

1. Introduction

The solution of the problem of optimal resources allocation for critical infrastructure prevention against possible terrorist attacks is naturally based on subjective estimates made by experts in the field. Relying on expert estimates is inevitable in this case: there is no other possibility to get input data for the system resilience analysis. There is no such phenomenon like "collecting real data," as well as there are no "homogenous samples" for consistent statistical analysis of observations, since any case is unique and non-reproducible. Nevertheless, a quantitative analysis of necessary level of protection has to be performed.

What are the bullets of such expertise? In our opinion they should include the following:

- possibility of terrorist attacks on some object or group of objects;
- possible time of such attack;
- expected consequences of an attack and possible losses;
- possible measure of protection and related expenses.

Since expert estimates of such complex things are generally fuzzy due to the lack of common understanding of the same actions and counter-actions within a group of experts, the question arises: is it possible at all to make any reasonable prediction and, moreover, speak about "optimal allocation of protection resources"?

First of all, we should underline that the concept of "optimal solution" relates only to mathematical models. In practice, unreliable (and even inconsistent) data and inevitable inaccuracy of the model (i.e. the difference between a model and reality) allow us to speak only about "rational solutions".

However, since the problem exists, in any particular case it has to be solved with or without using mathematical models. Our objective is to analyze the stability of solutions of optimal resources allocation under fuzziness of expert estimates.

2. Analysis of solution stability

First, let us analyze how the variation of expenses estimating influences the solution of the problem on the level of a single object, which has to be protected against a possible terrorist attack. For the transparency of explanation, we avoid to consider the protection influence on the Federal and State levels.

Let us consider some nominal object (Object 1) which can be subject to a terrorist attack. It is assumed that there may be three different types of enemy's actions (Act 1, Act 2 and Act 3). The defending side can choose several specific protection measures against each type of action $\{M(i, j)\}$, where i corresponds to the type of action, and j corresponds to the type of an undertaken protective measure respectively.

Let us assume that we have three variants of estimates of protection costs: the lower, the middle and the upper one as presented in Table 1-3. The lower estimates are about 20% lower than the corresponding middle estimates, and the upper ones are respectively about 20% higher.

There are three groups of expert estimates: "optimistic", "moderate" and "pessimistic." The first one assumes that success in each situation can be reached by lower expenses for protective measures; the last group requires larger expenses for protection in the same situation; and the middle group shows expenses in between.

How should the data in Tables 1-3 be interpreted?

Let us consider the possibility of Act 1 against the object. With no protection at all, the object's vulnerability equals to 1 (or 100%). If we spend $\Delta E = 0.8$ of conditional units of protection cost (c.u.p.c.) and undertake measure $M(1, 1)$, the object's vulnerability decreases to 0.25. If we are not satisfied with such level of protection, we apply next protective measure $M(1, 2)$, which leads to decrease of the object's vulnerability from 0.25 to 0.3 and, respectively, costs 2 c.u.p.c.

Now let us consider the actions of all the three possible terrorist attacks. In advance no one knows what kind of action will be undertaken against a particular object. In this

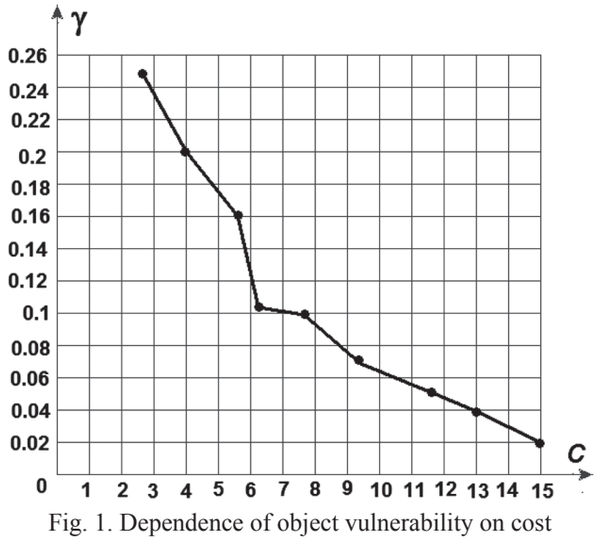


Fig. 1. Dependence of object vulnerability on cost of protection measures (for "optimistic" estimates)

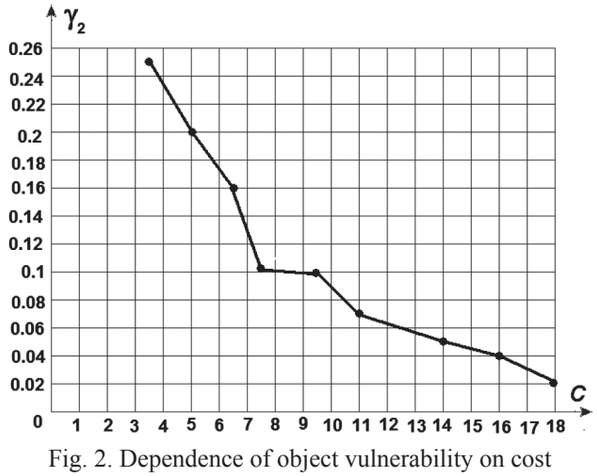


Fig. 2. Dependence of object vulnerability on cost of protection measures (for "moderate" estimates)

Table 1.
Case of optimistic estimates

OBJECT-1		γ_1	C
Act 1	M(1, 1)	0.25	0.8
	M(1, 2)	0.2	2
	M(1, 3)	0.1	2.5
	M(1, 4)	0.01	3.8
Act 2	M(2, 1)	0.2	1.6
	M(2, 2)	0.16	2.8
	M(2, 3)	0.07	3.2
	M(2, 4)	0.02	5.6
Act 3	M(3, 1)	0.11	0.4
	M(3, 2)	0.1	2
	M(3, 3)	0.05	2.4
	M(3, 4)	0.04	3.6
	M(3, 5)	0.01	5.6

Table 2.
Case of moderate estimates

OBJECT-1		γ_2	C
Act 1	M(1, 1)	0.25	1
	M(1, 2)	0.2	2.5
	M(1, 3)	0.1	3
	M(1, 4)	0.01	4
Act 2	M(2, 1)	0.2	2
	M(2, 2)	0.16	3
	M(2, 3)	0.07	4
	M(2, 4)	0.02	7
Act 3	M(3, 1)	0.11	0.5
	M(3, 2)	0.1	2.5
	M(3, 3)	0.05	3
	M(3, 4)	0.04	5
	M(3, 5)	0.01	7

Table 3.
Case of pessimistic estimates

OBJECT-1		γ_3	C
Act 1	M(1, 1)	0.25	1.2
	M(1, 2)	0.2	3
	M(1, 3)	0.1	6
	M(1, 4)	0.01	7.8
Act 2	M(2, 1)	0.2	2.4
	M(2, 2)	0.16	3.2
	M(2, 3)	0.07	4.8
	M(2, 4)	0.02	8.4
Act 3	M(3, 1)	0.11	2
	M(3, 2)	0.1	3
	M(3, 3)	0.05	3.6
	M(3, 4)	0.04	6
	M(3, 5)	0.01	8.4

Table 4. Case of optimistic estimates

Object 1			
Item No.	**Undertaken measures**	**Resulting γ_{object}**	**Total costs, C_{object}**
1	M(1, 1), M(2, 1), M(3, 1)	max {0.25, 0.2, 0.11}=0.25	0.8+1.6+0.4=2.8
2	M(1, 2), M(2, 1), M(3, 1)	max {0.2, 0.2, 0.11}=0.2	2+1.6+0.4=4
3	M(1, 3), M(2, 2), M(3, 1)	max {0.1, 0.16, 0.11}=0.16	2.5+2.8+0.4=5.7
4	M(1, 3), M(2, 3), M(3, 1)	max {0.1, 0.07, 0.11}=0.11	2.5+3.2+0.4=6.1
5	M(1, 3), M(2, 3), M(3, 2)	max {0.1, 0.07, 0.1}=0.1	2.5+3.2+2=7.7
6	M(1, 4), M(2, 3), M(3, 3)	max {0.01, 0.07, 0.05}=0.07	3.8+3.2+2.4=9.4
7	M(1, 4), M(2, 4), M(3, 3)	max {0.01, 0.02, 0.05}=0.05	3.8+5.6+2.4=11.8
8	M(1, 4), M(2, 4), M(3, 4)	max {0.01, 0.02, 0.04}=0.04	3.8+5.6+3.6=13
9	M(1, 4), M(2, 4), M(3, 5)	max {0.01, 0.02, 0.01}=0.02	3.8+5.6+5.6=15

Table 5. Case of moderate estimates

Object 1			
Item No.	**Undertaken measures**	**Resulting γ_{object}**	**Total costs, C_{object}**
1	M(1, 1), M(2, 1), M(3, 1)	max {0.25, 0.2, 0.11}=0.25	1+2+0.5=3.5
2	M(1, 2), M(2, 1), M(3, 1)	max {0.2, 0.2, 0.11}=0.2	2.5+2+0.5=5
3	M(1, 3), M(2, 2), M(3, 1)	max {0.1, 0.16, 0.11}=0.16	3+3+0.5=6.5
4	M(1, 3), M(2, 3), M(3, 1)	max {0.1, 0.07, 0.11}=0.11	3+4+0.5=7.5
5	M(1, 3), M(2, 3), M(3, 2)	max {0.1, 0.07, 0.1}=0.1	3+4+2.5=9.5
6	M(1, 4), M(2, 3), M(3, 3)	max {0.01, 0.07, 0.05}=0.07	4+4+3=11
7	M(1, 4), M(2, 4), M(3, 3)	max {0.01, 0.02, 0.05}=0.05	4+7+3=14
8	M(1, 4), M(2, 4), M(3, 4)	max {0.01, 0.02, 0.04}=0.04	4+7+5=16
9	M(1, 4), M(2, 4), M(3, 5)	max {0.01, 0.02, 0.01}=0.02	4+7+7=18

Table 6. Case of pessimistic estimates

Object 1			
Item No.	**Undertaken measures**	**Resulting γ_{object}**	**Total costs, C_{object}**
1	M(1, 1), M(2, 1), M(3, 1)	max {0.25, 0.2, 0.11}=0.25	1.2+2.4+2=5.6
2	M(1, 2), M(2, 1), M(3, 1)	max {0.2, 0.2, 0.11}=0.2	3+2.4+2=7.4
3	M(1, 3), M(2, 2), M(3, 1)	max {0.1, 0.16, 0.11}=0.16	3+3.2+2=8.2
4	M(1, 3), M(2, 3), M(3, 1)	max {0.1, 0.07, 0.11}=0.11	3+4.8+2=9.8
5	M(1, 3), M(2, 3), M(3, 2)	max {0.1, 0.07, 0.1}=0.1	3+4.8+3=10.8
6	M(1, 4), M(2, 3), M(3, 3)	max {0.01, 0.07, 0.05}=0.07	4+4.8+3.6=12.4
7	M(1, 4), M(2, 4), M(3, 3)	max {0.01, 0.02, 0.05}=0.05	4+8.4+3.6=16
8	M(1, 4), M(2, 4), M(3, 4)	max {0.01, 0.02, 0.04}=0.04	4+8.4+6=18.4
9	M(1, 4), M(2, 4), M(3, 5)	max {0.01, 0.02, 0.01}=0.02	4+8.4+8.4=20.8

Fig. 3. Dependence of object vulnerability on cost of protection measures (for "pessimistic" estimates)

situation the most reasonable strategy provides equal protection levels against all considered types of terrorist attacks, for example as suggested in [1,3]. It means that if one needs to ensure a level of protection equal to γ, then one has to consider only such measures against each action that delivers vulnerability level not less than γ. For instance, as in the considered case, if the required level of vulnerability has to be not higher than 0.1, one has to use simultaneously the following measures of protection against possible terrorist attacks: $M(1, 3)$, $M(2, 3)$ and $M(3, 4)$.

The method of equal protection against various types of hostile attacks appears to be rather natural. While dealing with natural or other unintended impacts, one can speak about the subjective probabilities of impacts of some particular type. However, such approach is not appropriate in the case of an intentional attack from a well informed and prepared enemy. The fact is that as soon as the enemy learns about your assumptions about his possible actions, he takes advantage of this knowledge and chooses the action that you expect least of all.

In the example considered above, if one chooses measures $M(1, 2)$ with $\gamma_1 = 0.2$, $M(2, 3)$ with $\gamma_2 = 0.07$ and $M(3, 4)$ with $\gamma_3 = 0.04$, the guaranteed level of the object protection is equal to

$\gamma_{object} = \max(\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3) = \max(0.2; 0.07; 0.04) = 0.2$.

For choosing a required (or needed) level of object protection, one can make up a function reflecting the dependence of vulnerability from protection cost.

This function graph is presented in fig. 1.

For information, we present calculation results without detailed explanations for the cases of "moderate" and "pessimistic" estimates.

Data of Table 5 are respectively presented in fig. 2.

Such analysis gives a possibility to find what measures should be undertaken for each required level of protection (or admissible level of vulnerability) and given, generally limited resources.

The final "curve" of "Expenses vs. Vulnerability" relation is presented below.

However, decision makers are interested mostly in the correctness of undertaken measures, rather than in the dif-

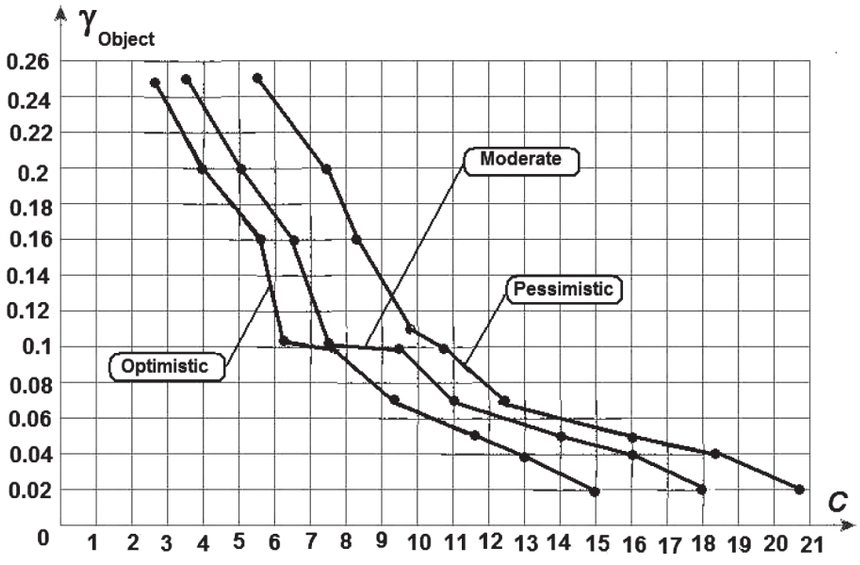


Fig. 4. Comparison of solutions for three types of estimates

Table 7. Comparison of solutions for three types of scenarios

Type of scenario	Undertaken protection measures	
	$\gamma_{Object} \le 0.1$	$\gamma_{Object} \le 0.02$
Optimistic	M(1, 3), M(2, 3), M(3, 2)	M(1, 4), M(2, 4), M(3, 5)
Moderate	M(1, 3), M(2, 3), M(3, 2)	M(1, 4), M(2, 4), M(3, 5)
Pessimistic	M(1, 3), M(2, 3), M(3, 2)	M(1, 4), M(2, 4), M(3, 5)

ference in absolute values of the estimated costs of object protection. In other words, they are concerned about how healthy, for example, the solution adopted for the optimistic scenario, will be in case if the situation is in fact better than it was described in the pessimistic scenario.

Using the tables above, consider two solutions of the direct problem with required levels of vulnerability as 0.1 and 0.02.

It is obvious that if the goal is to reach some given level of vulnerability, the vector of solution (i.e. a set of undertaken measures for protecting the object against terrorist attacks) in the frame of considered conditions will be the same, though it will lead to alternative expenses.

The comparison of solutions for an object vulnerability required level of not higher than 0.1 and not higher than 0.02 is presented in Table 7.

As one can see, the solutions for all of the three scenarios coincide for both levels of object protection! Of course, such situation occurs not always, however we should underline that the vectors of solution for minimax criterion $\gamma_{object} = \max(\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3)$ is much more stable than the vector for probabilistic criterion $1-\gamma_{объект} = 1-\prod_{1 \le k \le n}(1-\gamma_k)$.

3. Conclusion

The presented analysis shows that the offered model of optimal allocation of resources for critical infrastructure protection against possible terrorist attacks is rather stable. The problem of research of solution stability is considered in more detail in [2].

Calculation experiments made with the help of an appropriate computer model will give a possibility to analyze more realistic situations, including random instability of input data. However, it seems that such "biased" expert estimates should lead to more serious errors than random variations of the parameters.

References

1. **Ushakov I.A.** Counter-terrorism: Protection Resources Allocation. Part I. Minimax Criterion // Reliability: Theory & Applications, No.2, 2006. P. 71-78.

2. **Bochkov A.V., Ushakov I.A.** Sensitivity analysis of optimal counter-terrorism resources allocation under subjective expert estimates // Reliability: Theory & Applications, No. 2, 2007. P. 78-85.

3. **Ushakov I.A**. Counter-terrorism: Protection Resources Allocation. Part III. Fictional "Case Study" // Reliability: Theory & Applications, No.1, 2007. P. 50-59.

ИГОРЬ АЛЕКСЕЕВИЧ УШАКОВ

28 февраля 2015 года после тяжелой болезни в г.Сан – Диего (США) скончался Игорь Алексеевич Ушаков – крупный ученый, талантливый организатор науки. Он был талантлив во всем – написал много научных статей, книг, учебников, стихов, прозы, литературных эссе. Он очень любил жизнь, был многогранен, обаятелен, остроумен, дружил со многими, нравился женщинам. Был очень мужественен, стойко переносил многочисленные болезни.

Профессор И. А. Ушаков и теория надежности едины. С его именем связано несколько десятков лет развития теории надежности. Он создал и в течение многих лет руководил семинаром по надежности при Московском Политехническом музее. Под его редакцией вышел в 90-е годы XX века знаменитый Справочник по надежности, который и в настоящее время остается настольным руководством специалистов. Профессору И.А.Ушакову принадлежат многочисленные публикации в области теории надежности сложных систем, оптимального резервирования, моделирования надежности систем с помощью Марковских и полумарковских случайных процессов, структурного резервирования и т.д.

Ушел из жизни жизнелюб, человек, который будучи тяжело больным, создал Гнеденко – Форум, объединивший ученых разных стран, который создал международный электронный журнал в области надежности «Reliability: Theory & Applications», который до последнего вздоха работал, писал и издавал научные книги и статьи.

Таким тружеником, единомышленником, творцом и Ученым с большой буквы останется в нашей памяти профессор Игорь Алексеевич Ушаков.

Профессор И.Б. Шубинский

IGOR ALEKSEEVICH USHAKOV

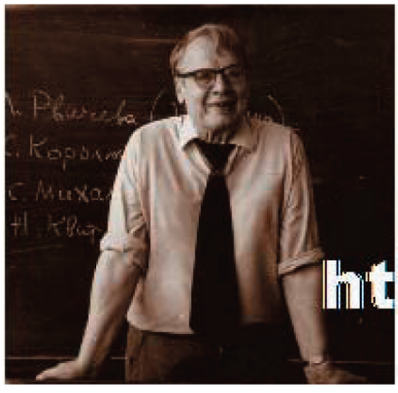
Igor Alekseevich Ushakov, who died on the 28th of February, 2015 after a serious disease in San Diego (USA), was a prominent scientist and talented science organizer. He was talented in everything: he authored a lot of scientific papers, books, textbooks, verses, fiction, essays. He loved life, was a many-sided, charming, smart, and friendly person, who was liked by women. He was manly and endured many illnesses bravely.

Professor I.A. Ushakov and the reliability theory are united. His name was associated with several decades of development of the reliability theory. He established and for many years headed a reliability workshop at the Moscow Polytechnic Museum. In the 90-s of the XX century he edited the renowned Reliability Reference Book that still remains an everyday guide for experts. Professor I.A. Ushakov is the author of many publications in the area of the reliability theory of complex systems, optimum redundancy, systems reliability modelling with the help of Markov and semi-Markov random processes, structural redundancy etc.

We have lost a man who appreciated life, who although being seriously ill created the Gnedenko Forum that united scientists from various countries, who organized an international electronic journal in the field of reliability "Reliability: Theory & Applications", who worked, wrote and published scientific books and articles till his last breath.

Igor Alekseevich Ushakov will stay in our memory as an exhaustive toiler, like mind, creator and real scientist.

Prof. I.B. Shubinsky



Gnedenko e-Forum

International Group on Reliability

http://Gnedenko-Forum.org/

Дорогие коллеги!

В 2005 году была основана неформальная Ассоциация специалистов по надежности, прикладной вероятности и статистике (I.G.O.R.), которая имеет свой сайт в Интернете GNEDENKO FORUM. Сайт назван в честь выдающегося математика Бориса Владимировича Гнеденко (1912-1995). Целью Форума является улучшение профессиональных и персональных контактов специалистов по математической статистике, теории вероятностей и их важных ветвей, как Теория надежности и контроля качества, Теория массового обслуживания, Теории управления запасами и т.п.

Начиная с января 2006 года Форум издает ежеквартальный Международный электронный журнал

«Надежность: Теория и приложения» ("Reliability: Theory & Applications").

Журнал зарегистрирован в Библиотеке Конгресса США (ISSN 1932-2321). Все права сохраняются за авторами, так что статьи затем могут быть свободно опубликованы в любых других изданиях или представлены на конференции.

Вступайте в Форум Гнеденко!

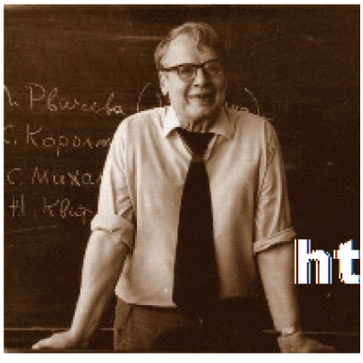
Добро пожаловать!

В наших рядах уже более 500 специалистов из 44 стран мира.

Для вступления в Форум присылайте фото и краткое резюме по адресу:

Проф. Игорь Ушаков,
igusha22@gmail.com
или
к.т.н. Александр Бочков,
a.bochkov@gmail.com

Membership is free.



Gnedenko e-Forum

International Group on Reliability

http://Gnedenko-Forum.org/

Dear colleagues!

In 2005 the informal Association of Experts in Reliability, Applied Probability and Statistics (I.G.O.R.) was established with its own Internet website GNEDENKO FORUM. The site has been named after the outstanding mathematician Boris Vladimirovich Gnedenko (1912-1995). The Forum's purpose is an improvement of personal and professional contacts between experts in the mathematical statistics, probability theory and their important branches, such as reliability theory and quality control, the theory of mass service, storekeeping theory, etc.

Since January 2006, the Forum has published a quarterly international electronic magazine

"Reliability: Theory and Applications".

The magazine is registered with the Library of Congress in the USA (ISSN 1932-2321). All rights reserved for authors so that articles can be freely published in any other publications or presented at conferences.

Join Gnedenko Forum!

Welcome!

More than 500 experts from 44 countries worldwide have already joined us!

To join the Forum, send a photo and a short CV to the following address:

Prof. Igor Ushakov,
igusha22@gmail.com
or
Alexander Bochkov, PhD
a.bochkov@gmail.com

Membership is free.

АВТОРЫ НОМЕРА / AUTHORS OF THIS ISSUE

Ануашвили Автандил Николаевич
доктор технических наук, доктор психологических наук, главный научный сотрудник, Институт проблем управления Российской Академии Наук (ИПУ РАН)
тел.: +7 (925) 517-88-07
e-mail: 5178807@mail.ru

Артюхова Майя Александровна
аспирант кафедры Радиоэлектроники и телекоммуникаций, Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики» (НИУ ВШЭ)
тел.: +7 (495) 916-88-80
e-mail: martuhova@hse.ru

Бочков Александр Владимирович
кандидат технических наук, заместитель директора центра анализа риска, научно-исследовательский институт экономики и организации управления в газовой промышленности (ООО «НИИгазэкономика»)
e-mail: a.bochkov@gmail.com

Володарский Владислав Афанасьевич
кандидат технических наук, старший научный сотрудник, профессор Кафедры систем обеспечения движения, Красноярский институт железнодорожного транспорта – филиал ИрГУПС
тел.: +7 (391) 221-60-72
e-mail: volodarsky.vladislav@yandex.ru

Дурнев Александр Васильевич
Инженер-программист 1 категории,
ЗАО «Промышленная группа «Метран»
e-mail: alexander.durnev@gmail.com

Жаднов Валерий Владимирович
кандидат технических наук, доцент, профессор кафедры Радиоэлектроники и телекоммуникаций, Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики» (НИУ ВШЭ)
тел.: +7 (495) 916-88-80
e-mail: vzhadnov@hse.ru

Иванова Татьяна Владимировна
кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Подвижной состав железных дорог» Забайкальский институт железнодорожного транспорта
тел.: +7 (924) 270-64-58

Колчин Александр Федорович
кандидат технических наук, доцент, зам. председателя ТК 058 «Функциональная безопасность», профессор кафедры «Информационные технологии и вычислительные системы», МГТУ «СТАНКИН»
тел.: +7 (926) 230-04-44
e-mail: :kolchin@calscenter.com

Кофанов Юрий Николаевич
доктор технических наук, профессор, президент Российской академии надежности,
академик РАЕН и МАИ, профессор МИЭМ НИУ ВШЭ
e-mail: y.Kofanov@gmail.com

Лавров Валерий Александрович
Начальник отдела разработок и производства контрольно-измерительной аппаратуры,
ОАО НПК «Северная заря»
e-mail: valer.lawrov@yandex.ru

Михеев Николай Владимирович
аспирант кафедры «Информационные технологии и вычислительные системы»,
МГТУ «СТАНКИН»
тел.: +7 (903) 198-62-92
e-mail: me@vooft.com

Налабордин Денис Геннадьевич
ведущий инженер Центра управления содержанием инфраструктуры Забайкальской дирекции инфраструктуры
тел.: +7 (914) 435-65-71
e-mail: denis_gn@mail.ru

Орленко Алексей Иванович
кандидат технических наук, доцент, директор Красноярского института железнодорожного транспорта (КрИЖТ) – филиал ИрГУПС
тел.: +7 (391) 271 67 40
e-mail: orlenkoai@yandex.ru

Петровых Владимир Александрович
начальник службы вагонного хозяйства, Забайкальская дирекция инфраструктуры
тел.: +7 (914) 472-11-03

Потапов Илья Викторович
доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Радиотехнические устройства и системы диагностики», ФГБОУ ВПО «Омский государственный технический университет»
тел.: +7 (905) 923-38-49
e-mail: ip@omgtu.ru

Стрельников Валерий Павлович
доктор технических наук, академик Российской академии надежности,
зам. директора по научной работе, Институт проблем математических машин и систем НАН Украины
e-mail: vps@immsp.kiev.ua

Ушаков Игорь Алексеевич
доктор технических наук, профессор, главный редактор электронного журнала «Надежность: Теория и приложения»
e-mail: igusha@22gmail.com

АВТОРЫ НОМЕРА / AUTHORS OF THIS ISSUE

Anuashvily Avtandil Nikolaevich
Doctor of Technical Sciences, Doctor of Psychological Sciences, senior researcher, Institute of Management Problems of Russian Academy of Sciences (IPU RAN)
Tel: +7 (925) 517-88-07
E-mail: 5178807@mail.ru

Artyukhova Maya Alexandrovna
Postgraduate student of chair of Radio electronics and telecommunications of National Research University Higher School of Economics (NIU VSHE)
Tel: +7 (495) 916-88-80
E-mail: martuhova@hse.ru

Bochkov Alexander Vladimirovich
PhD in engineering, Deputy Director of Centre for Rusk Analysis, Research Institute of Economics and Management Organization in Gas Industry (Ltd. NIIgazeconomics)
E-mail: a.bochkov@gmail.com

Durnev Alexander Vasilievich
First class engineer-programmer
CJC Industrial Group Metran
E-mail: alexander.durnev@gmail.com

Zhadnov Valery Vladimirovich
PhD in engineering, associate professor of chair of Radio electronics and telecommunications of National Research University Higher School of Economics (NIU VSHE)
Tel: +7 (495) 916-88-80
E-mail: vzhadnov@hse.ru

Ivanova Tatiana Vladimirovna
PhD in engineering, associate professor, head of chair of Railway Rolling Stock of Zabaykalsk Institute of Railway Transport
Tel: +7 (924) 270-64-58

Kolchin Alexander Fedorovich
PhD in engineering, associate professor, deputy chairman of TC 058 Functional Dependability, professor of chair of Information Technology and Computing Systems of MGTU STANKIN
Tel: +7 (926) 230-04-44
E-mail: kolchin@calscenter.com

Kofanov Yuri Nikolaevich
Doctor of Technical Sciences, professor, President of Russian Academy of Dependability, member of RAEN and MAI, professor MIEM NIU VSHE
E-mail: y.Kofanov@gmail.com

Lavrov Valery Alexandrovich
Head of Division for Development and Production of Control and Measuring Devices,
JSC NPK Severnaya zarya
E-mail: valer.lawrov@yandex.ru

Mikheev Nikolay Vladimirovich
Postgraduate student of chair of Information Technology and Computing Systems of MGTU STANKIN
Tel: +7 (903) 198-62-92
E-mail: me@vooft.com

Nalabordin Denis Gennadievich
Leading engineer of Centre for Management of Infrastructure Maintenance of Zabaykalsk Infrastructure Directorate
Tel: +7 (914) 435-65-71
E-mail: denis_gn@mail.ru

Orlenko Aleksey Ivanovich
PhD in engineering, associate professor, Director of Krasnoyarsk Institute of Railway Transport (KrIZhT) – IrGUPS branch
Tel: +7 (391) 271 67 40
E-mail: orlenkoai@yandex.ru

Petrovykh Vladimir Alexandrovich
Head of Car Fleet Service of Zabaykalsk Infrastructure Directorate
Tel: +7 (914) 472-11-03

Potapov Ilya Victorovich
Doctor of Technical Sciences, associate professor of chair of Radio Technical Devices and Systems of Diagnostics, FGBOU VPO Omsk State Technical University
Tel: +7 (905) 923-38-49
E-mail: ip@omgtu.ru

Strelnikov Valery Pavlovich
Doctor of Technical Sciences, member of Russian Academy of Dependability,
Deputy Director for Researches of Institute of Mathematic Machines and Systems Problems, Ukrainian National Academy of Science
E-mail: vps@immsp.kiev.ua

Volodarsky Vladislav Afanasievich
PhD in engineering, senior researcher, associate professor of chair of transport systems, Krasnoyarsk Institute of Railway Transport – IrGUPS branch
Tel.: +7 (391) 221-60-72
E-mail: volodarsky.vladislav@yandex.ru

Ushakov Igor Alekseevich
Doctor of Technical Sciences, Professor, Editor-in-Chief of the electronic journal Reliability: Theory and Applications
E-mail: igusha@22gmail.com

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;**
- **Фотографии всех авторов статьи.**

Текст необходимо набирать в редакторе Word 97-2003 шрифтом № 12; текст не форматируется. Абзацы организуются путем нажатия клавиши Enter.

Текст статьи набирается через полтора интервала на странице формата А4; слева должно быть поле 2 см; страницы нумеруются, «красная строка» обязательна.

Все буквенные обозначения, приведенные на рисунках, необходимо пояснять в основном или подрисуночном тексте. Недопустимы отличия в обозначениях на рисунках и в тексте. Нумеровать следует только те формулы и уравнения, на которые есть ссылка в тексте.

Непосредственно в тексте набираются простые формулы (например, m^2; n^2t, $C = 1 + DDF - A_2$), греческие буквы и символы, например, β, © — шрифтом Symbol. То, что невозможно набрать непосредственно в текстовом редакторе, — с использованием редактора формул Microsoft Equation (входящего в комплект поставки Microsoft Office) или редактора формул Mathtype.

Не допускается представление текста, в котором формулы представлены в виде изображения.

Фотографии и рисунки к статьям предоставляются отдельными файлами с расширением TIF, или EPS или JPEG с разрешением не менее 300 dpi .

Список использованной литературы составляется в порядке цитирования и дается в конце статьи. Ссылки на литературу в тексте отмечаются порядковыми цифрами в квадратных скобках.

Вниманию авторов, публикующихся в журналах IDT Publishers.

Представленная информация о каждом авторе помимо журнала будет размещаться на сайте techizdat.ru в разделе “Авторы” на отдельной интернет-странице.

Авторам также предоставляется возможность при публикации своих статей направить в редакцию свою электронную фотографию и дополнительные материалы для размещения их на этой индивидуальной Интернет-визитке. По своему усмотрению автор может рассказать более подробно о себе, об интересных примерах и историях решения технических проблем, о современных задачах - в соответствии с тематикой соответствующего журнала - и т.п. Желательный объем этого материала – не более 1000 знаков с пробелами.

ПОДПИСКА НА ЖУРНАЛ «НАДЕЖНОСТЬ»

Подписаться на журнал в 2015 году можно:

- Через агентство «Роспечать» – индекс 81733;
- По каталогу «Пресса России» агентства «Книга-Сервис» – индекс 11804;
- Через редакцию на любой срок
  тел.: 8-916-105-81-31
  e-mail: E.Patrikeeva@gismps.ru

REQUIREMENTS OF EDITION ON EXECUTION OF PAPERS IN JOURNALS OF PUBLISHING GROUP OF IDT PUBLISHERS

A letter from the organisation where the author (s) works or from the author (s) personally with the paper offered for publication should be sent to the de facto editorial office address: 107078, Moscow, 5 Orlikov lane, Office 755, LLC "JOURNAL DEPENDABILITY" or e-mail: E.Patrikeeva@gismps.ru (in scanned form).
For journals of the publishing group of "IDT PUBLISHERS" the paper offered for publication should be sent to the address: 105005, Moscow, 15 Quay of Academician Tupolev, building 29, LLC "the publishing house Technology» or e-mail to: knstas@yahoo.com <mailto:knstas@yahoo.com> (in scanned form).
The letter should be attached to a paper text containing the summary and keywords, information on authors, bibliographic list, and one complete set of figures. All listed items are to be presented in an electronic form (on CD or via the e-mail address provided above).
Attention! Titles of papers, names of authors, summary and keywords must be presented, in Russian and English languages, according to the requirements of the Higher Attestation Commission. The information on each author should contain the following standard data:

- **Surname, name, patronymic;**
- **Scientific degree, academic status, honorary title;**
- **Membership of relevant public unions, etc.;**
- **Place of employment, position;**
- **The list and numbers of Journals of IDT Publishers in which papers of the author have been previously published;**
- **Contact information.**

Texts should be presented in Word 97-2003 format in a 12-point typeface; the text should not be formatted. Paragraphs should be arranged by pressing the "return" key. The text of the paper should be double-spaced on pages of A4; on the left there should be a margin of 2 cm; pages should be numbered, the «first line indent» is obligatory.

All alphabetical designations represented in figures should be explained in the body text or in a legend. Inconsistencies between designations in figures and in the text are inadmissible. Numbering should only be applied to those formulas and equations that are referred to in the text.
Simple formulas appearing directly in the text (for example, m^2, n^2t, $c = 1 + DDF - A_2$), and the Greek letters and symbols, for example, β, © 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 «DEPENDABILITY»

It is possible to subscribe to the journal for 2015:

- Through the agency «Rospechat»
  – for the first half of the year: an index 81733;

- Under the catalogue "Press of Russia" of the agency «Books-services»:
  – for half a year: an index 11804;

- Through the editorial office:
  – for any time-frame
  tel.: 8-916-105-81-31; e-mail: E.Patrikeeva@gismps.ru

ЗАЯВКА НА ПОДПИСКУ НА ЖУРНАЛ «НАДЕЖНОСТЬ»

с № _____ 20___ г. по № _____ 20___ г., количество экз. _____

Полное наименование организации	
Юридический адрес предприятия (индекс, страна, адрес)	
Почтовый адрес предприятия (индекс, страна, адрес)	
ИНН/КПП	
Расчетный счет	
Банк	
Корреспондентский счет	
БИК	
Контактное лицо: Ф.И.О., должность	
Телефон/факс, e-mail	

Реквизиты: ООО «Журнал «Надежность»
Адрес редакции: 109029, г. Москва, ул. Нижегородская, д.27, стр.1, оф. 209
Тел./факс: (495) 967-77-02 , e-mail: E.Patrikeeva@gismps.ru
ИНН 7709868505 КПП 770901001
р/с 40702810100430000017
к/с 30101810100000000787

Адрес доставки:

Кому:_____

Куда:_____

_____

Для оформления подписки на журнал «Надежность» заполните заявку и отправьте ее по факсу или электронной почте.
По всем вопросам, связанным с подпиской, обращайтесь в редакцию журнала.
Стоимость годовой подписки 4180-00 руб, в т.ч. НДС 10%.
Периодичность – 4 номера в год.

ЖУРНАЛ ИЗДАЕТСЯ ПРИ УЧАСТИИ И ПОДДЕРЖКЕ

ОТКРЫТОГО АКЦИОНЕРНОГО ОБЩЕСТВА «НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ И ПРОЕКТНО-КОНСТРУКТОРСКИЙ ИНСТИТУТ ИНФОРМАТИЗАЦИИ, АВТОМАТИЗАЦИИ И СВЯЗИ НА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОМ ТРАНСПОРТЕ»
(ОАО «НИИАС»)

ОАО «НИИАС» – ведущее предприятие ОАО «РЖД» в области создания комплексов и систем обеспечения безопасности движения, управления движением, геоинформационного обеспечения, мониторинга состояния подвижного состава и инфраструктуры железных дорог

Цели:
- ❑ эффективность,
- ❑ безопасность
- ❑ надежность перевозок

Основные направления деятельности

- •Интеллектуальные системы управления
- •Технологии управления перевозками и транспортного обслуживания
- •Системы автоматики и телемеханики
- •Центры автоматизированного управления
- •Информационные системы
- •Геоинформационные системы и спутниковые технологии
- •Системы транспортной безопасности
- •Системы управления инфраструктурой
- •Системы управления топливно-энергетическими ресурсами
- •Испытания, сертификация и экспертиза
- •Информационная безопасность
- •Нормативно-правовое обеспечение

www.vniias.ru