

*Intellectual Technologies
on Transport
No 1*



*Интеллектуальные технологии
на транспорте
№ 1*

*Санкт-Петербург
St. Petersburg
2020*

Интеллектуальные технологии на транспорте
№ 1, 2020

ISSN 2413-2527

Сетевой электронный научный журнал, свободно распространяемый через Интернет.
Публикуются статьи на русском и английском языках с результатами исследований
и практических достижений в области интеллектуальных технологий
и сопутствующих им научных исследований.

Журнал основан в 2015 году.

Учредитель и издатель

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I» (ФГБОУ ВО ПГУПС)

Главный редактор

Хомоненко А. Д., д.т.н., проф., С.-Петербург, РФ

Сопредседатели редакционного совета

Панычев А. Ю., ректор ПГУПС, С.-Петербург, РФ

Чаркин Е. И., директор по ИТ-технологиям ОАО «РЖД», Москва, РФ

Редакционный совет

Ададулов С. Е., проф., Москва, РФ
Дудин А. Н., д.т.н., проф., БГУ, Минск, Беларусь
Корниенко А. А., проф., ПГУПС, С.-Петербург, РФ
Ковалец П., проф., Техн. ун-т, Варшава, Польша
Меркурьев Ю. А., проф., РТУ, Рига, Латвия
Нестеров В. М., проф., СПбГУ, С.-Петербург, РФ

Пустарнаков В. Ф., ген. дир. «Газинформсервис»,
С.-Петербург, РФ
Титова Т. С., проф., прорект. ПГУПС,
С.-Петербург, РФ
Федоров А. Р., ген. дир. «ДигДез», С.-Петербург, РФ
Юсупов Р. М., проф., чл.-корр. РАН, С.-Петербург, РФ

Редакционная коллегия

Бубнов В. П., проф., С.-Петербург, РФ – зам. гл. ред.
Александрова Е. Б., проф., С.-Петербург, РФ
Атилла Элчи, проф., ун-т Аксарай, Турция
Басыров А. Г., проф., С.-Петербург, РФ
Безродный Б. Ф., проф., Москва, РФ
Благовещенская Е. А., проф., С.-Петербург, РФ
Булавский П. Е., д.т.н., доц., С.-Петербург, РФ
Василенко М. Н., проф., С.-Петербург, РФ
Глухов А. П., д.т.н., Москва, РФ
Гуда А. Н., проф., Ростов-на-Дону, РФ
Железняк В. К., проф., Новополоцк, Беларусь
Заборовский В. С., проф., С.-Петербург, РФ
Зегжда П. Д., проф., С.-Петербург, РФ
Канаев А. К., проф., С.-Петербург, РФ
Котенко А. Г., д.т.н., доц., С.-Петербург, РФ
Куренков П. В., проф., Москва, РФ
Лецкий Э. К., проф., Москва, РФ

Макаренко С. И., д.т.н., доц., С.-Петербург, РФ
Мирзоев Т. А., асс. проф., Джорджия, США
Наседкин О. А., к.т.н., доц., С.-Петербург, РФ
Никитин А. Б., проф., С.-Петербург, РФ
Новиков Е. А., д.т.н., доц., С.-Петербург, РФ
Охтилев М. Ю., проф., С.-Петербург, РФ
Привалов А. А., проф., С.-Петербург, РФ
Соколов Б. В., проф., С.-Петербург, РФ
Таранцев А. А., проф., С.-Петербург, РФ
Утепбергенов И. Т., проф., Алматы, Казахстан
Филипченко С. А., к.т.н., доц., Москва, РФ
Фозилов Ш. Х., проф., Ташкент, Узбекистан
Фу-Ниан Ху, проф., Цзянсу, Китай
Хабаров В. И., проф., Новосибирск, РФ
Ходаковский В. А., проф., С.-Петербург, РФ
Чехонин К. А., проф., Хабаровск, РФ
Ялышев Ю. И., проф., Екатеринбург, РФ

Адрес редакции:

190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9, ауд. 1–210
e-mail: itt-pgups@yandex.ru

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи и массовых коммуникаций,
свидетельство Эл № ФС77-61707 от 07 мая 2015 г.

Журнал зарегистрирован в Российском индексе научного цитирования (РИНЦ).

Периодичность выхода – 4 номера в год. Выпуски журнала доступны на сайте <http://itt-pgups.ru>.

Копии архивов с выпусками журнала проходят государственную регистрацию как электронное издание
сетевого распространения в НТЦ "Информрегистр".

Информация предназначена для детей старше 12 лет.

© Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I», 2020

Intellectual Technologies on Transport

Issue № 1, 2020

ISSN 2413-2527

Network electronic scientific journal, open access. It publishes articles in Russian and English with the results of research and practical achievements in the field of intelligent technologies and associated research.

Founded in 2015.

Founder and Publisher

Federal State Educational Institution of Higher Education
«Emperor Alexander I Petersburg State Transport University»

Editor-in-Chief

Khomonenko A. D., Dr. Sc., Prof., St. Petersburg, Russia

Co-chairs of the Editorial Council

Panychev A. Yu., rector of PSTU, St. Petersburg, Russia

Charkin E. I., CIO of JSC "RZD", Moscow, Russia

Editorial Council Members

Adadurov S. Ye., Prof., Moscow, Russia

Dudin A. N., Prof., BSU, Minsk, Belarus

Kornienko A. A., Prof., PSTU, St. Petersburg, Russia

Kovalets P., Prof., Tech. University, Warsaw, Poland

Merkuryev Y. A., Prof., RTU, Academician of the

Latvian Academy of Sciences, Riga, Latvia

Nesterov V. M., Prof., SPbSU, St. Petersburg, Russia

Pustarnakov V. F., CEO at «Gazinformservice» Ltd.,
St. Petersburg, Russia

Titova T. S., Prof., PSTU, St. Petersburg, Russia

Fedorov A. R., CEO at «Digital Design» Ltd.,
St. Petersburg, Russia

Yusupov R. M., Prof., Corr. Member of RAS,
St. Petersburg, Russia

Editorial Board Members

Bubnov V. P., Prof., St. Petersburg, Russia –
Deputy Editor-in-Chief

Aleksandrova E. B., Prof., St. Petersburg, Russia

Atilla Elci, Prof., Aksaray University, Turkey

Basyrov A. G., Prof., St. Petersburg, Russia

Bezrodny B. F., Prof., Moscow, Russia

Blagoveshchenskaya E. A., Prof., St. Petersburg, Russia

Bulavsky P. E., Dr. Sc., As. Prof., St. Petersburg, Russia

Vasilenko M. N., Prof., St. Petersburg, Russia

Glukhov A. P., Dr. Sc., St. Petersburg, Russia

Guda A. N., Prof., Rostov-on-Don, Russia

Zheleznyak V. K., Prof., Novopolotsk, Belarus

Zaborovsky V. S., Prof., St. Petersburg, Russia

Zegzhda P. D., Prof., St. Petersburg, Russia

Kanaev A. K., Prof., St. Petersburg, Russia

Kotenko A. G., Dr. Sc., As. Prof., St. Petersburg, Russia

Kurenkov P. V., Prof., Moscow, Russia

Letzky E. C., Prof., Moscow, Russia

Makarenko S. I., Dr. Sc., As. Prof.,
St. Petersburg, Russia

Mirzoev T. A., As. Prof., Georgia, USA

Nasedkin O. A., As. Prof., St. Petersburg, Russia

Nikitin A. B., Prof., St. Petersburg, Russia

Novikov Y. A., Dr. Sc., As. Prof., St. Petersburg, Russia

Ohtilev M. Y., Prof., St. Petersburg, Russia

Privalov A. A., Prof., St. Petersburg, Russia

Sokolov B. V., Prof., St. Petersburg, Russia

Tarantsev A. A., Prof., St. Petersburg, Russia

Utepbergenov I. T., Prof., Almaty, Kazakhstan

Filipchenko S. A., As. Prof., Moscow, Russia

Fozilov Sh. Kh., Prof., Tashkent, Uzbekistan

Fu-Nian Hu, Prof., Jiangsu, China

Khabarov V. I., Prof., Novosibirsk, Russia

Khodakovskiy V. A., Prof., St. Petersburg, Russia

Chekhonin K. A., Prof., Khabarovsk, Russia

Jalyshev Y. I., Prof., Ekaterinburg, Russia

Editorial address:

190031, St. Petersburg, Moskovsky ave., 9, aud. 1–210

e-mail: itt-pgups@yandex.ru

The journal is registered by the Federal Service for Supervision of Communications and Mass Media,
EL no. FS77-61707 testimony from May 7, 2015.

The journal is registered in the Russian Science Citation Index (RSCI).

Frequency of release - 4 issues per year. Issues of the magazine are available at <http://itt-pgups.ru>.

Copies of the archives with the issues of the journal are state-registered as an electronic publication of network distribution
in the Scientific and Technical Center "Informregister".

The content is for children over the age of 12.

Содержание

Барановский А. М., Шаповалов Е. Н., Бочков А. П.

Методика снижения конструкторского риска в процессе предварительной отработки бортовых систем с применением программных комплексов 5

Тохиров Э. Т.

Методы совершенствования безопасности на железнодорожных переездах Узбекистана (на англ.) ... 11

Смагин В. А., Шурыгин Е. М.

Применение функции концентрации в теории нечетких множеств (на англ.) 16

Катькалов В. Б.

Перспективы развития спутниковых услуг 24

Переводы докладов, представленных на международном семинаре
"Модели и методы исследования информационных систем"
в рамках Бетанкуровского инженерного форума (4-5 декабря 2019 г., Санкт-Петербург)

Павлов А. Н., Павлов Д. Н., Воротягин В. Н.

Подход к оцениванию живучести транспортно-логистических систем 32

Бутакова М. А., Чернов А. В., Мизюков Г. С.

Метод определения информационной близости на основе спектрального преобразования текстовых документов..... 40

Благовещенская Е. А., Бочкарев С. В., Груздев Н. В., Зуев Д. В.

Применение самообучаемых систем для решения задач поиска отказов на железной дороге 47

Луценко М. М., Сейтманбитов Д. А., Барановский А. М.

Расчет надежности решений, принимаемых по результатам тестирования 56

Contents

Baranovsky A. M., Shapovalov E. N., Bochkov A. P.

Methodology for Reducing Design Risk in the Process of Preliminary Testing On-Board Systems
Using the Software Complexes 5

Tokhirov E. T.

Security Improvement Techniques at Railway Crossings of Uzbekistan (in English) 11

Smagin V. A., Shurygin E. M.

Application of the Concentration Function in Fuzzy Sets Theory (in English) 16

Katkalov V. B.

Prospects of Development of Satellite Services 24

Translations of reports presented at the Models and Methods of Information Systems
Research Workshop in the frame of Betancourt International Engineering Forum
(December 4-5, 2019, Saint Petersburg, Russia)

Pavlov A. N., Pavlov D. N., Vorotyagin V. N.

The Approach to the Assessment of Resilience of Transport and Logistics Systems 32

Butakova M. A., Chernov A. V., Miziukov G. S.

Method for Determining Information Proximity Based on Spectral Conversion of Text Documents 40

Blagoveshchenskaya E. A., Bochkarev S. V., Gruzdev N. V., Zuev D. V.

The Use of Self-Learning Systems to Solve the Problems of Finding Failures on the Railway 47

Lutsenko M. M., Seytmanbitov D. A., Baranovsky A. M.

Reliability of Decision in Testing Problems 56

Методика снижения конструкторского риска в процессе предварительной отработки бортовых систем с применением программных комплексов

к.т.н. А. М. Барановский, к.т.н. Е. Н. Шаповалов
АО «НИИ программных средств»,
Санкт-Петербург, Россия
bamvka@mail.ru, heny56@mail.ru

д.т.н. А. П. Бочков
Санкт-Петербургский политехнический университет
Петра Великого,
Санкт-Петербург, Россия
kostpea@mail.ru

Аннотация. В статье представлен подход к решению задачи количественного анализа конструкторского риска возникновения отказов малых космических аппаратов. Выявлены наиболее значимые факторы, влияющие на конструкторский риск. Обоснована методика снижения конструкторского риска в процессе предварительной отработки бортовых систем с применением специальных программных комплексов.

Ключевые слова: конструкторский риск, малый космический аппарат, надежность, программный комплекс, испытания, протолетный подход.

ВВЕДЕНИЕ

При создании современных транспортных средств на основе широкого внедрения информационных технологий существенное значение имеет предварительная отработка составных частей и изделия в целом. При этом затраты на отработку технологий и изделия могут быть существенными в общем финансировании разработки изделия и нести риски неполной отработки. Поэтому на практике требуется оптимизировать процессы отработки с целью снижения затрат без потерь качества отработки. Так, например, одним из основных требований к реализации современных космических программ, таких, как программа Союзного государства «Технология-СГ» [1], является снижение временных и финансовых затрат на наземную отработку маломассогабаритных космических аппаратов (МКА). Наиболее подходящим решением этой задачи является применение «протолетного» подхода [2], под которым понимается комплекс организационно-технических мероприятий, реализующих технологию, обеспечивающую ускоренное выполнение космических образовательных, научно-исследовательских и социально-экономических программ за счет использования в качестве штатного бортового оборудования микро- и нано-КА, элементов, прошедших наземную отработку и имеющих остаточную величину показателей эксплуатационно-технических характеристик (ЭТХ) не хуже заданных в техническом задании (ТЗ). При реализации «протолетного» подхода одной из главных проблем является повышенный конструкторский риск отказов МКА, который

можно определить как риск срыва проекта по созданию МКА, связанный с невозможностью обеспечения требуемых показателей надежности. Конструкторский риск обусловлен вероятностью:

- недостижения запланированных технических параметров в ходе внедрения в летную практику инноваций;
- превышения требований к техническим параметрам инноваций технического уровня и технологических возможностей производства в освоении полученных результатов разработок (включая уровень подготовки и возможности переподготовки кадров).

Источниками конструкторского риска возникновения отказов в полете являются:

- уникальность большинства бортовых систем МКА;
- ограниченный объем испытаний МКА;
- сокращение требуемых сроков внедрения инноваций.

Вместе с тем современные средства автоматизации процессов управления жизненным циклом МКА позволяют существенно снизить конструкторский риск возникновения отказов в полете за счет использования всего доступного объема информации об изделии, однако для этого требуется разработка систематических подходов к управлению рисками [3, 4]. В статье рассмотрен подход к оцениванию конструкторского риска возникновения отказов МКА в полете и проведен анализ путей его снижения при реализации «протолетного» подхода к созданию МКА.

ЗАДАЧА КОЛИЧЕСТВЕННОГО АНАЛИЗА КОНСТРУКТОРСКОГО РИСКА ОТКАЗОВ БОРТОВЫХ СИСТЕМ

Целью наземных испытаний на надежность является подтверждение требований к показателям надежности бортовых систем (БС). Как правило, техническим заданием на создание МКА (или его БС) задаются требования к вероятности безотказной работы V_{AC} на момент окончания срока активного существования МКА T_{AC} .

Вероятность безотказной работы оценивается на основании результатов испытаний $\{T_i | i = \overline{1, N_0}\}$, где T_i — время безотказной работы i -го образца БС. Конструкторский риск Kp возникновения отказов в полете связан с вероят-

ностью ошибочного решения о достижении требований ТЗ, то есть

$$Kp = P(V < V_{AC}).$$

Следовательно, для расчета конструкторского риска необходимо исследование динамики изменения вероятности безотказной работы на основании результатов испытаний. Пусть вероятность безотказной работы БС подчинена экспоненциальному закону. Определим функцию максимального правдоподобия для среднего времени безотказной работы:

$$\prod_{i=1}^{N_o} \varphi(T_i; T_o) = \frac{1}{T_o^{N_o}} \exp\left(-\frac{1}{T_o} \sum_{i=1}^{N_o} T_i\right),$$

откуда определяется оценка максимального правдоподобия для времени безотказной работы:

$$\hat{T}_o = \frac{1}{N_o} \sum_{i=1}^{N_o} T_i.$$

Дисперсия оценки времени безотказной работы определяется по формуле:

$$D(\hat{T}_o) = \hat{\sigma}_o^2 = D\left(\frac{1}{N_o} \sum_{i=1}^{N_o} T_i\right) = \frac{D(T_i)}{N_o} = \frac{\hat{T}_o^2}{N_o}.$$

Оценка T_o является случайной величиной, поскольку она представляет собой функцию случайных величин. В соответствии с центральной предельной теоремой теории вероятности закон распределения оценки среднего времени безотказной работы T_o близок к нормальному, следовательно, плотность распределения оценки

$$\varphi(T_o) = \frac{1}{\sigma_o \sqrt{2\pi}} \cdot \exp\left(-\frac{(T_o - \hat{T}_o)^2}{2\sigma_o^2}\right).$$

Вероятность безотказной работы бортового оборудования на момент окончания срока его активного существования равна

$$V = f(T_o) = e^{-\frac{T_{AC}}{T_o}}.$$

Для получения плотности распределения вероятности безотказной работы V на момент окончания срока активного существования МКА T_{AC} (рис. 1) воспользуемся формулой определения закона распределения функции случайной величины $f(T_o)$, если известен закон распределения аргумента $\varphi(T_o)$ [5]:

$$g(V) = \varphi[f^{-1}(V)] \cdot |[f^{-1}(V)]'|.$$

$$f^{-1}(V) = -\frac{T_{AC}}{\ln(V)} \Rightarrow [f^{-1}(V)]' = -\frac{T_{AC}}{V \cdot \ln^2(V)}.$$

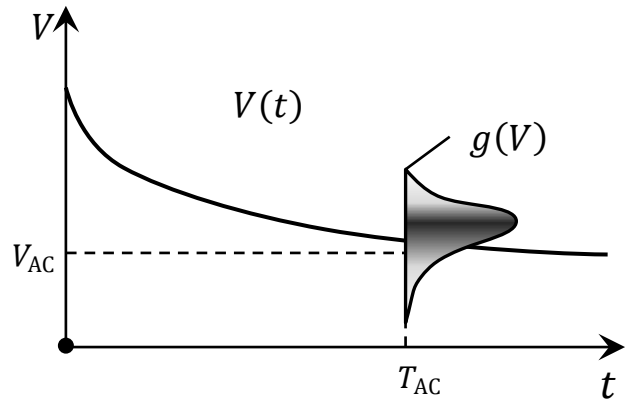


Рис. 1. Плотность распределения вероятности безотказной работы V

$$g(V) = \frac{T_{AC}}{\hat{\sigma}_o \sqrt{2\pi} |V \cdot \ln^2(V)|} \cdot \exp\left(-\frac{\left(-\frac{T_{AC}}{\ln(V)} - \hat{T}_o\right)^2}{2\hat{\sigma}_o^2}\right).$$

Сформулируем нулевую гипотезу $H_0: V \geq V_{AC}$ (то есть бортовая система или МКА в целом удовлетворяет предъявляемым требованиям по надежности) против альтернативной гипотезы $H_1: V < V_{AC}$. Задача принятия нулевой или альтернативной гипотезы сопряжена с ошибками первого и второго рода. Ошибка первого рода представляет собой вероятность несоответствия предъявляемым требованиям по надежности при гипотезе H_0 . Ошибка второго рода связана с завышением требований к инновациям по отношению к максимальному уровню, обеспечиваемому производством. Таким образом, ошибки первого (α) и второго (β) рода однозначно определяют конструкторский риск возникновения отказов в полете (рис. 2). Численная величина ошибок первого и второго рода рассчитывается следующим образом.

Конструкторский риск, связанный с вероятностью недостижения заданных показателей надежности, математически можно определить следующим образом (рис. 2):

$$\alpha = P(V < V_{AC}) = \int_0^{V_{AC}} g(V) dV;$$

$$\beta = P(V \geq V_{AC}) = \int_{V_{AC}}^1 g(V) dV.$$

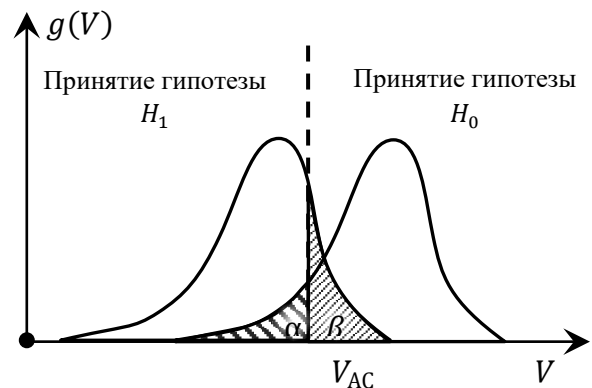


Рис. 2. Геометрическая интерпретация конструкторского риска

Ошибки первого и второго рода зависят от двух факторов: объема выборки и удаленности вероятности безотказной работы, полученной по результатам испытаний, от требуемого значения

$$\Delta = T_o - T_{\text{треб}},$$

где $T_{\text{треб}}$ — среднее время безотказной работы системы, рассчитанное исходя из требований к вероятности безотказной работы V_{AC} на момент окончания срока активного существования МКА T_{AC} :

$$T_{\text{треб}} = \frac{T_{AC}}{-\ln(V_{AC})}.$$

Графики зависимостей конструкторского риска от результатов испытаний для различных объемов выборки N (при $V_{AC} = 0,95$ для $T_{AC} = 5$ лет) приведены на рисунке 3.

Известно, что одновременное снижение ошибок первого и второго рода без увеличения объема выборки (а следовательно, уменьшения дисперсии оценки $\hat{\sigma}_o$) невозможно [5]. Следовательно, все способы снижения конструкторского риска должны быть направлены на снижение дисперсии оценки времени безотказной работы.

Пути снижения конструкторского риска возникновения отказов в полете

Снижение дисперсии оценки $\hat{\sigma}_o$, от которой напрямую зависит величина конструкторского риска, возможно с привлечением дополнительной информации, что соответствует главному принципу технологии CALS:

информация, однажды возникшая на каком-либо этапе ЖЦ, сохраняется в едином информационном пространстве и становится доступной всем участникам этого и других этапов [6]. К информации могут обращаться отдельные проблемно-ориентированные модели, реализованные в форме программных приложений. Следовательно, в рамках решаемой задачи актуальной является разработка программного приложения — программного комплекса оценивания эксплуатационно-технических характеристик, качества надежности и прогнозирования отказов (ПК ОХНП), — реализующего технологию f [7]

$$R = f(K, P, A, I),$$

где R — вектор эксплуатационно-технических характеристик бортовых систем и МКА в целом;

K — множество структурных моделей бортовых систем и МКА в целом (структурные схемы надежности, диагностические модели, деревья отказов и т. п.);

P — множество параметров, характеризующих качество бортовых систем и МКА в целом;

A — априорная информация о значениях эксплуатационно-технических характеристик бортовых систем и МКА в целом;

I — результаты испытаний и эксплуатации бортовых систем и МКА в целом;

f — технология оценивания эксплуатационно-технических характеристик, качества, надежности и прогнозирования отказов.

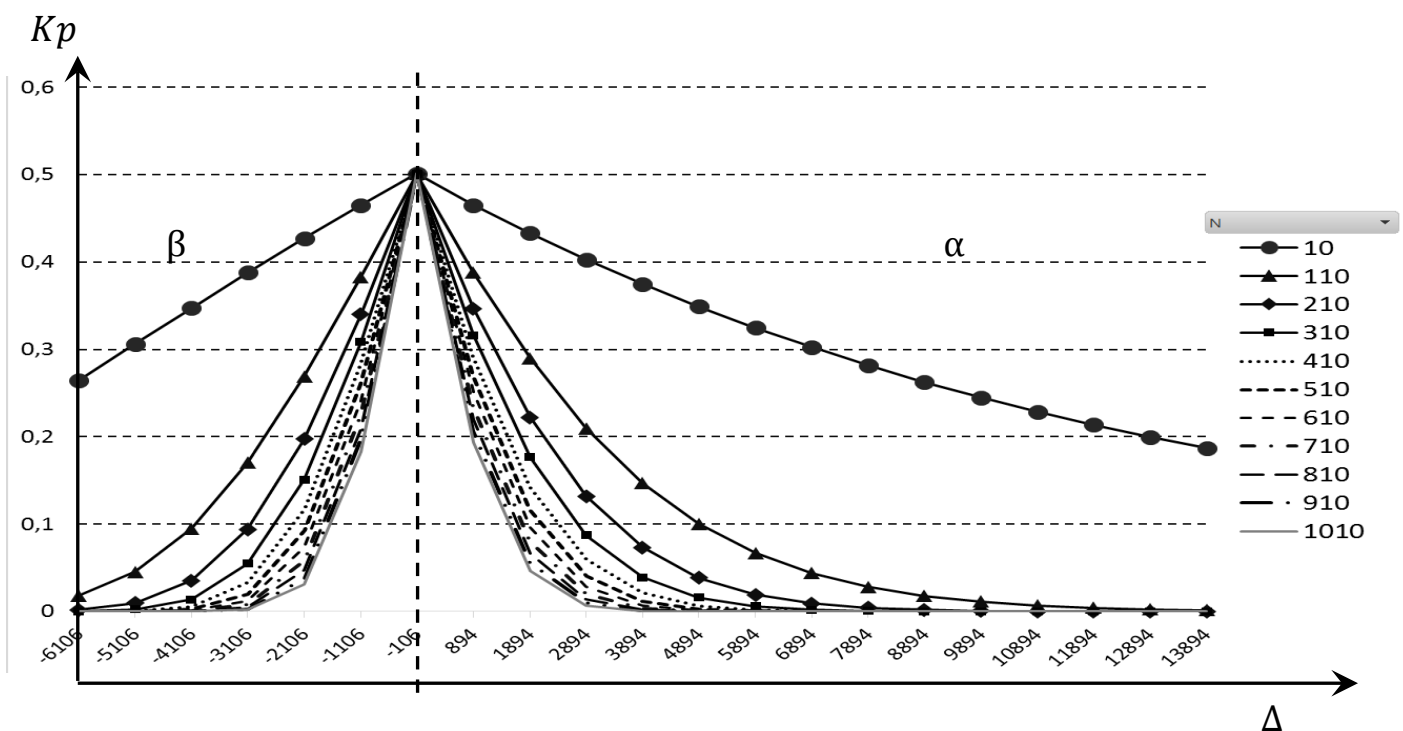


Рис. 3. Зависимость конструкторского риска от результатов испытаний

Источниками и потребителями информации являются различные автоматизированные информационные системы, применяемые на различных этапах жизненного цикла (рис. 4). На этапах исследования и обоснования разработки, а также непосредственно разработки основным источником информации являются системы автоматизированного проектирования (САПР) классов CAD, CAM, CAE [6]. От них поступает информация о моделях бортовых систем. На основании моделей бортовых систем и доступной априорной информации осуществляется расчет ЭТХ. На этапе производства основная информация, получаемая от АСУ производством (ERP-, MES- и SCADA-систем [8, 9]), — результаты испытаний. Источниками данной информации могут служить испытательные стенды, функционирующие под управлением АСУ. На этапе эксплуатации основная информация представляет собой главным образом телеметрическую информацию.

При любом факте получения информации осуществляется перерасчет эксплуатационно-технических характеристик и конструкторского риска на основании всей имеющейся информации. При этом для объединения информации целесообразно использовать следующие методы:

- байесовский метод [10];
- метод линейного объединения оценок [10];
- метод приоритета опытной информации [11, 12].

Обилие и разнородность сопряженных информационных систем определило сервис-ориентированную архитектуру ПК ОХНП. Доступ к банку данных, а также вы-

числения ЭТХ реализуются программными модулями сервера. На сервере также реализованы сервисы, предоставляющие доступ к API сервера через стандартизированный протокол удаленного вызова процедур (RPC). Предоставление доступа к API сервера дает возможность взаимодействия с автоматизированными системами в режиме реального времени. Для реализации возможности ручного доступа к информации необходима разработка клиента ОХНП, предоставляющего доступ к банку данных и вычислительным функциям сервера.

Полученные оценки ЭТХ поступают в систему поддержки принятия решений (СППР), результатом работы которой является оценка конструкторского риска возникновения отказов в полете МКА (Кр). На основании результатов анализа формируется управляющее воздействие на продолжение (в случае высокого конструкторского риска) или прекращение испытаний (в противном случае). Подобный динамический анализ позволит избежать ненужных затрат на проведение испытаний. Действительно, как следует из рисунка 4, обеспечение требуемого уровня конструкторского риска возможно и при небольших объемах выборки в случае получения по результатам испытаний большого отклонения оцениваемого параметра от требуемого значения. С другой стороны, при низких отклонениях Δ применение ПК ОХНП в структуре наземной обработки позволит выявить превышение конструкторского риска и сформировать соответствующие управляющие воздействия.

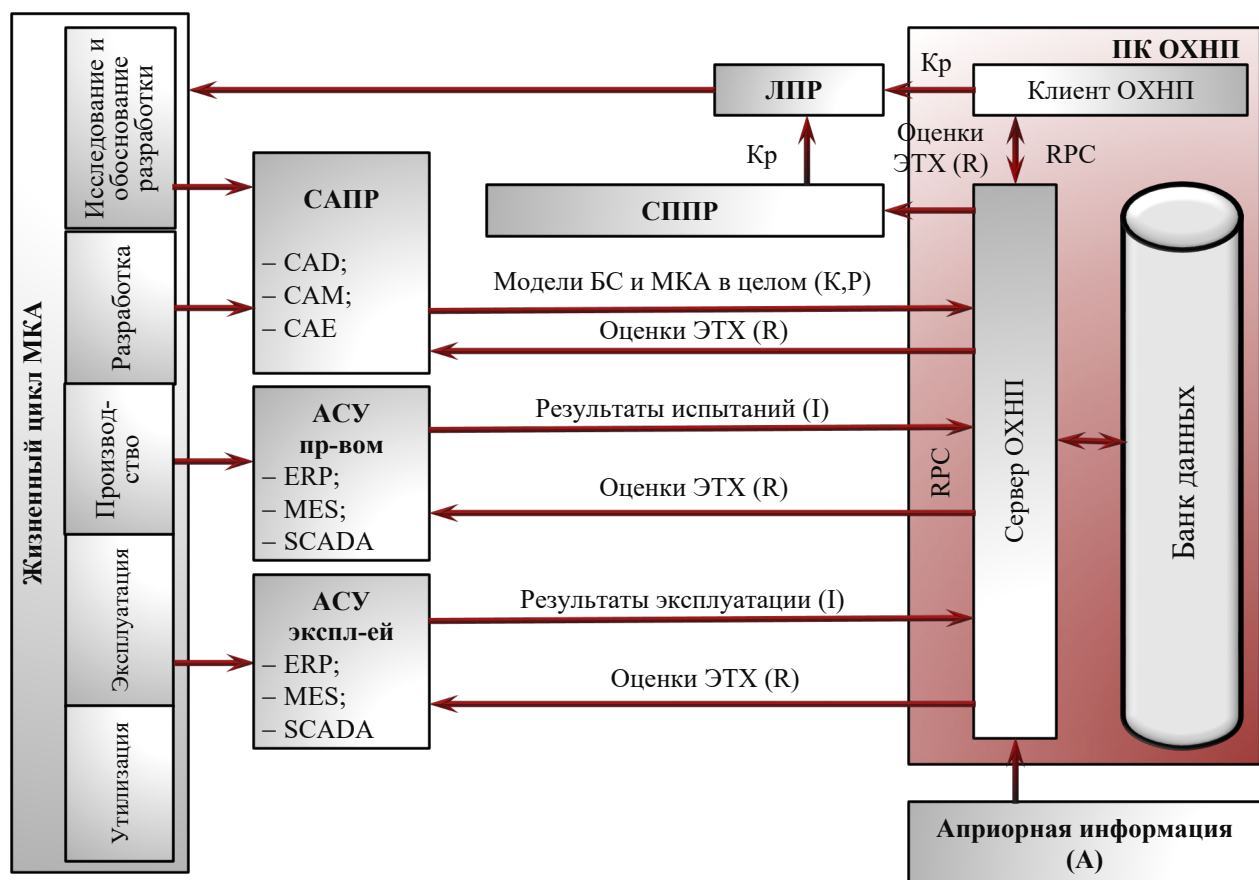


Рис. 4. Схема управления жизненным циклом МКА на основе анализа конструкторского риска

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полная автоматизация расчета и анализа надежности позволит в несколько раз повысить объем информации, анализируемой при расчете показателей надежности и ЭТХ. Пропорционально уменьшится дисперсия, что приведет к соответствующему снижению конструкторского риска $\hat{\sigma}_o$. Применение рассматриваемого ПК ОХНП в структуре наземной отработки МКА позволит обеспечить требуемый уровень конструкторского риска при минимально допустимом объеме испытаний.

ЛИТЕРАТУРА

1. О научно-технической программе Союзного государства «Разработка комплексных технологий создания материалов, устройств и ключевых элементов космических средств и перспективной продукции других отраслей» («Технология-СГ»): постановление Совета Министров Союзного государства Беларуси и России от 12.05.2016 № 17. URL: <http://base.garant.ru/71405416> (дата обращения: 01.11.2019).

2. Куреев В. Д. Перспективы реализации «протолетного» подхода при наземной отработке наноспутников / В. Д. Куреев, С. В. Павлов, Ю. А. Соколов // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2016. Т. 59, № 6. С. 477–481.

DOI: 10.17586/0021-3454-2016-59-6-477-481.

3. Menchinelli A., Ingiosi F., Pamphili L., Marzioli P., Patriarca R., Costantino F., Piergentili F. A Reliability Engineering Approach for Managing Risks in CubeSats // *Aerospace*. 2018. Vol. 5, Is. 4, Article No. 121.

DOI: 10.3390/aerospace5040121.

4. NASA/SP-2016-6105 Rev2, *NASA Systems Engineering Handbook, Revision 2*, Washington, DC, USA, 2016, 297 p.

5. Кремер Н. Ш. Теория вероятностей и математическая статистика: Учебник для вузов. — 2-е изд., перераб. и доп. — М.: ЮНИТИ-ДАНА, 2004. — 573 с.

6. CALS-технологии / Л. Г. Доросинский, О. М. Зверева. — Саарбрюккен: Lambert Academic Publishing, 2014. — 277 с.

7. Архитектура информационной системы оценивания эксплуатационно-технических характеристик малого космического аппарата / А. М. Барановский, А. Е. Привалов, А. С. Дудкин, Е. А. Захарова, Д. Ю. Бугайченко // Сборник статей IV Всероссийской научно-практической конференции «Современные проблемы создания и эксплуатации вооружения, военной и специальной техники» (13–14 декабря 2018 г., Санкт-Петербург) — СПб.: ВКА им. А. Ф. Можайского, 2018. — С. 329–334.

8. SCADA системы: Учебное пособие / Н. А. Осипов, А. Г. Тарасов. — СПб.: ВКА имени А. Ф. Можайского, 2015. — 141 с.

9. Загидуллин Р. Р. Управление машиностроительным производством с помощью систем MES, APS, ERP: Монография. — Старый Оскол: Тонкие наукоемкие технологии, 2011. — 372 с.

10. Теоретические основы испытаний и экспериментальная отработка сложных технических систем: Учебное пособие / Л. Н. Александровская [и др.]. — М.: Логос, 2003. — 736 с. — (Учебник XXI века).

11. Ардашов А. А. Метод оценивания характеристик надежности сложных систем / А. А. Ардашов, В. Н. Арсеньев, М. А. Зайцев // Труды Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского. 2014. Вып. 645. С. 113–117.

12. Арсеньев В. Н. Оценивание характеристик систем управления по ограниченному числу натуральных испытаний. — М.: Рестарт, 2013. — 126 с.

Methodology for Reducing Design Risk in the Process of Preliminary Testing On-Board Systems Using the Software Complexes

PhD A. M. Baranovsky, PhD E. N. Shapovalov
Software Research Institute,
St. Petersburg, Russia
bamvka@mail.ru, henya56@mail.ru

Grand PhD A.P. Bochkov
Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University,
St. Petersburg, Russia
kostpea@mail.ru

Abstract. The article presents the approach of quantitative analysis task design risk of appearance failure of small spacecrafts. The most significant factors of design risk is identified. The methodology for reducing design risk in the process of preliminary testing on-board systems using the software complexes is justified.

Keywords: design risk, small spacecrafts, application software complex, reliability.

REFERENCES

1. About the Scientific and Technical Program of the Union State «Development of Complex Technologies of Creation of Materials, Devices and Key Elements of Space Means and Perspective Products of Other Industries» («Technology-SG»): Resolution of Council of Ministers of the Union State of Belarus and Russia [O nauchno-tehnicheskoy programme Soyuznogo gosudarstva «Razrabotka kompleksnykh tekhnologiy sozdaniya materialov, ustroystv i klyuchevykh elementov kosmicheskikh sredstv i perspektivnoy produktsii drugikh otrasley» («Tekhnologiya-SG»): postanovlenie Soveta Ministrov Soyuznogo gosudarstva Belarusi i Rossii] from May 12, 2016, No. 17. Available at: <http://base.garant.ru/71405416> (accessed 01 November 2019).
2. Kureev V. D., Pavlov S. V., Sokolov Yu. A. Prospects of Realization of Proto-Flight Approach in Nanosatellite Ground Testing [Perspektivy realizatsii «protoletnogo» podkhoda pri nazemnoy obrabotke nanosputnikov], *Journal of Instrument Engineering [Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Priborostroenie]*, 2016, Vol. 59, No. 6, pp. 477–481. DOI: 10.17586/0021-3454-2016-59-6-477-481.
3. Menchinelli A., Ingiosi F., Pamphili L., Marzioli P., Patriarca R., Costantino F., Piergentili F. A Reliability Engineering Approach for Managing Risks in CubeSats, *Aerospace*, 2018, Vol. 5, Is. 4, Article No. 121. DOI: 10.3390/aerospace5040121.
4. NASA/SP-2016-6105 Rev2, *NASA Systems Engineering Handbook, Revision 2*, Washington, DC, USA, 2016, 297 p.
5. Kremer N. Sh. Probability Theory and Mathematical Statistics. Second Edition: Textbook [Teoriya veroyatnostey i matematicheskaya statistika: Uchebnik dlya vuzov], Moscow, UNITY-DANA Publishing House, 2004, 573 p.
6. Dorosinsky L. G., Zvereva O. M. CALS Technologies [CALS-tekhnologii], Saarbrücken, Lambert Academic Publishing, 2014, 277 p.
7. Baranovsky A. M., Privalov A. E., Dudkin A. S., Zakharova E. A., Bugaichenko D. Yu. Architecture of Information System for Evaluation of Operational and Technical Characteristics of Small Spacecrafts [Arkhitektura informatsionnoy sistemy otsenivaniya ekspluatatsionno-tehnicheskikh kharakteristik malogo kosmicheskogo apparata]. In: *Collection of articles of the IV All-Russian Scientific and Practical Conference «Modern Technologies for the Creation and Operation of Weapons, Military and Special Equipment» [Sbornik statey IV Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Sovremennye problemy sozdaniya i ekspluatatsii vooruzheniya, voennoy i spetsial'noy tekhniki»]*, St. Petersburg, Russia, 13–14 December, 2018, Saint Petersburg, A. F. Mozhaisky Military Space Academy, 2018, pp. 329–334.
8. Osipov N. A., Tarasov A. G. SCADA systems: Study guide [SCADA sistemy: Uchebnoe posobie], Saint Petersburg, A. F. Mozhaisky Military Space Academy, 2015, 141 p.
9. Zagidullin R. R. Management of machine-building production using MES, APS, ERP: Monograph [Upravlenie mashinostroitel'nym proizvodstvom s pomoshch'yu sistem MES, APS, ERP: Monografiya], Stary Oskol, Tonkie naukoemkie tekhnologii Publishing House, 2015, 372 p.
10. Aleksandrovskaya L. N., et al. Theoretical basis of tests and experimental testing of complex technical systems: Study guide [Teoreticheskie osnovy ispytaniy i eksperimental'naya obrabotka slozhnykh tekhnicheskikh sistem: Uchebnoe posobie], Moscow, Logos Publishing Group, 2003, 736 p.
11. Ardashov A. A., Arsenyev V. N., Zaycev M. A. Method of Estimation of Characteristics of Reliability of Difficult Systems [Metod otsenivaniya kharakteristik nadezhnosti slozhnykh sistem], *Proceedings of the A. F. Mozhaisky Military Space Academy [Trudy VoЕННО-kosmicheskoy akademii imeni A. F. Mozhayskogo]*, 2014, Is. 645, pp. 113–117.
12. Arsenyev V. N. Evaluation of the characteristics of control systems according to the specified number of full-scale tests [Otsenivanie kharakteristik sistem upravleniya po ograniченному chislu naturnykh ispytaniy], Moscow, Restart Publishing House, 2013, 126 p.

Security Improvement Techniques at Railway Crossings of Uzbekistan

E. T. Tokhirov

Tashkent Railway Engineering Institute
Tashkent, Uzbekistan
etokhirov@yahoo.com

Abstract. In this study focus on reduces waiting time and travel time at a level crossing at the cost of safety. Current research interest is the application to improve implementation, reducing the waiting time for motor vehicles at a railroad crossing. Using the V2I system application at a railway level crossing. Focuses on reducing the waiting time and movement time at the railway level crossing transition due to security.

Keywords: level crossings, vehicle-to-vehicle, vehicle-to-infrastructure, guarded LC, unguarded LC, accident.

INTRODUCTION

Railway level crossings (LC) — are the intersection of roads with railway tracks on one level, which are equipped with the necessary safety devices. There are only 1 380 railway crossings in the Republic of Uzbekistan. Including on the railways of Uzbekistan Railways, there are only 575 crossings, of which 146 are guarded, 429 are unguarded, and on the access roads of the ministries and departments of the republic there are only 805 railway crossings, of which 28 are protected, 777 are unguarded [1]. During the period of 2001–2007, 224 arrivals of the railway mobile were allowed at the railway crossings of the Republic of Uzbekistan 12/06/15 from the point of view of the allowed number of arrivals at crossings: out of 224 cases of arrivals at crossings, 168 trips were allowed on unguarded crossings makes up 75% of the total number of raids, and this is in the presence of almost the overwhelming number of unguarded crossings of automatic crossing signaling devices [2].

PROBLEM STATEMENT

The railway level crossing is a zone of increased danger. Rides of rolling stock on motor vehicles at railway level crossings can lead to grave consequences, connected primarily with human casualties, with severe injuries, with rolling stock, damage to vehicles, railway rolling stock, loss of cargo. The main reasons for the raids are: detour by drivers of motor vehicles of closed level crossing gate at guarded crossings, an exit of vehicles for moving with the prohibiting indication of automatic traffic signaling before approaching rolling stock on unguarded level crossings.

The number of deaths as a result of raids increased sharply in 2002–2004 — up to 10 people a year. In 2005 there was a 2-fold decrease in the number of deaths compared to previous years, and in 2006 the growth was 40% higher than in 2005, in 2007, the number of deaths as a result of raids increased by 28% compared to 2006 [2].

When analyzing the accidents at the crossings, it was found that the maximum number of arrivals at the crossings falls on motor vehicles: for example, of the 24 arrivals in 2001, 17 accidents (71%) fall on cars and motorcycles, out of

37 raids in 2006, 27 raids (73 %) — for cars, out of 36 raids for 12 months of 2007, 27 hits (75%) — on cars [2].

METHODOLOGY

The research aim is focusing on reduces waiting time and travel time at a level crossing at the cost of safety. The objectives of the research were to estimate automobile transport the travel time savings and the travel time delay due to the level crossing. Communication Protocols in a connected vehicle and Grade-Crossing Technology:

1. Vehicle-to-infrastructure (V2I) technology offers the potential for bi-directional exchange of data between vehicles and roadway infrastructure.

2. It aims to coordinate vehicle group behaviors based on collected information about traffic and road conditions.

- includes velocities and accelerations of vehicles based on traffic congestion.

– includes information about the status of a level crossing;

– controls infrastructure to improve road safety;

– includes broadcasting messages via road displays or adjusting traffic signals;

– alerts motorists when it is unsafe to enter intersections and level crossings;

Autonomous vehicle technology development:

– development of autonomous vehicles in real-world operational test environments are limited to a subset of operational scenarios that occur in roadway operations, including level crossings;

– future development of autonomous vehicle platforms should consider all operational scenarios, particularly grade crossings;

– integrating existing connected vehicle technology at grade crossings into autonomous vehicles builds upon the functional the ability of autonomous vehicles ensuring safe and efficient level crossing interaction. Engaging original equipment manufacturers and Tier 1 suppliers will help to define the state of autonomous vehicle technology and the readiness of these systems as they relate to safe navigation of level crossings [3].

For improving and perfection at the railway crossing on the future should implement vehicle-to-infrastructure and vehicle-to-vehicle system. V2I applications complement the V2V safety applications by addressing crash scenarios that V2V applications cannot address and by more efficiently addressing some crash scenarios when there are low levels of penetration of DSRC-equipped light vehicles. The following is a list of contemplated, but not yet developed, V2I safety applications: Railroad Crossing Violation Warning: This technology will assist drivers at controlled railroad crossings via RSE

connections with existing train detection equipment, alerting motorists when it is unsafe to cross the railroad tracks [4].

RESEARCH APPROACH

To achieve the data, by a level crossing. In terms of time, the aggregation was done by peak periods, day and weekday or weekend. In Tashkent basically, all institutions, organizations, educational institutions et al. field of services are started around eight o'clock morning and coming back to home is approximately six o'clock evening. Therefore, I had chosen the peak periods were from 7 AM to 9 AM for the AM Peak, from 5 PM to 7 PM for the PM Peak. For weekday I got four working days and for the weekend Saturday and Sunday.

RESULT AND ANALYSIS

Base on the data, the average weekday traffic volume for considered level crossings when combined is 15–16 thousand vehicles daily. In general, a boom gate is active for a total 5,5 hours on a given weekday. The boom gate, on the average, is active for 50% of the time during peak period on a weekday. The peak periods are 7–9 AM and 5–7 PM. With 95% confidence, when a railway level crossing gate is active, it stays active for at least 8 minutes.

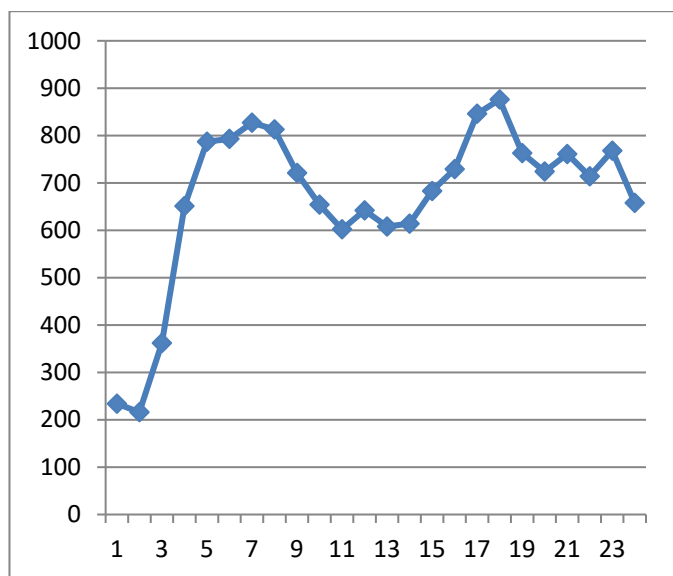


Figure 1. Graph of car vehicle volume daily

Transport vehicle volume is on the peak period higher than another time period. That's side is few difficulty of passing thought railway level crossing. If the train arrives during the peak period, for cars to come out of congestion it also requires several times difficulties. From the graph also almost peak period has more traffic jam. If the railway company heads the schedule and does not start up, then the time on the roads the traffic volume will not be delayed.

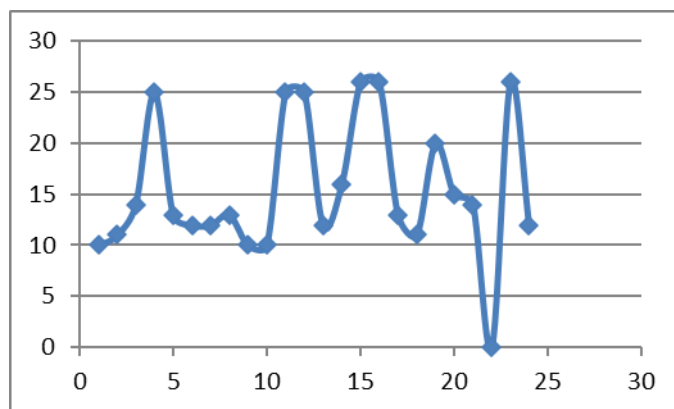


Fig. 2. Graph of boom gate «down time» daily

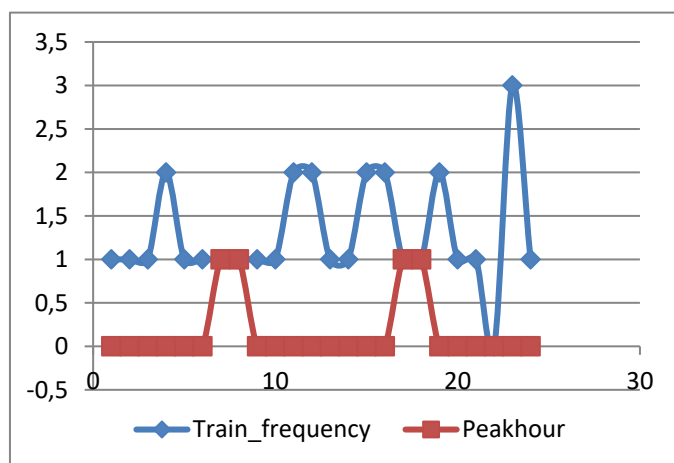


Fig. 3. Graph of train frequency and peak hour period daily

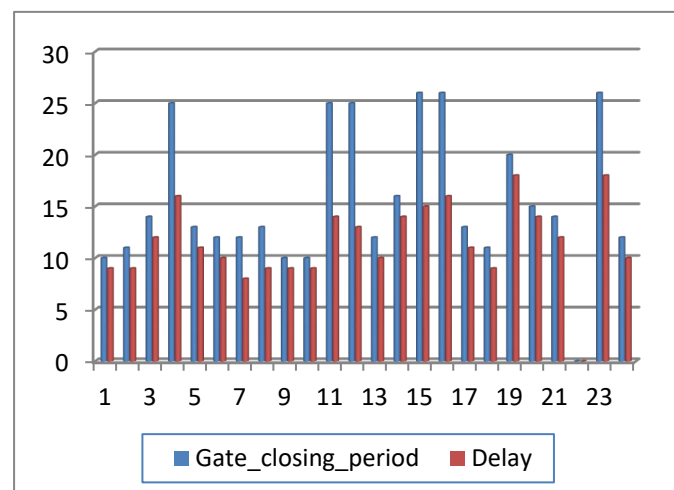


Fig. 4. Graph of boom gate «down time» and vehicles average delay time daily

Based on the result, the railway barrier is almost always significant. This means that before the train comes it falls ahead of time. The speed of approaching the train is also different. To reduce the waiting time at the railway crossing, it is necessary to increase the speed of the train.

CALCULATION BY TRANSPORT VEHICLE DELAY AT RAIL LEVEL CROSSING PER WEEK

The column t value shows the t-test associated with testing the significance of the parameter listed in the first column. For example, the t value of 2,743 refers to the t-test of the (Intercept) 2,460 divided by the standard error of that estimate 0,896. $\Pr(>|t|)$ gives the p-value for that t-test (the proportion of the t distribution at that df which is greater than the absolute value of t statistic). 0,00676 — is scientific notation. The asterisks following the $\Pr(>|t|)$ provide a visually accessible way of assessing whether the statistic met various α criterions.

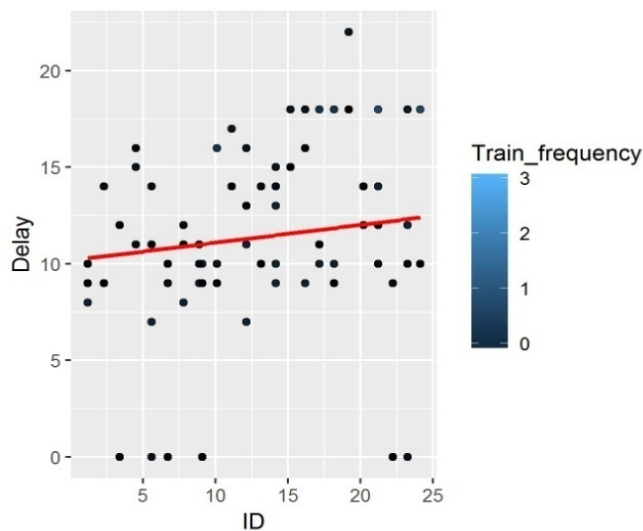


Fig. 5. General comparison between delay and train frequency

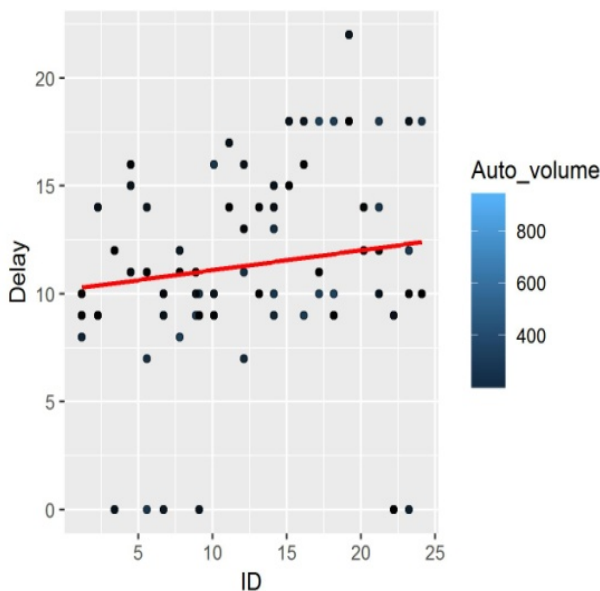


Fig. 6. General comparison between delay auto volume

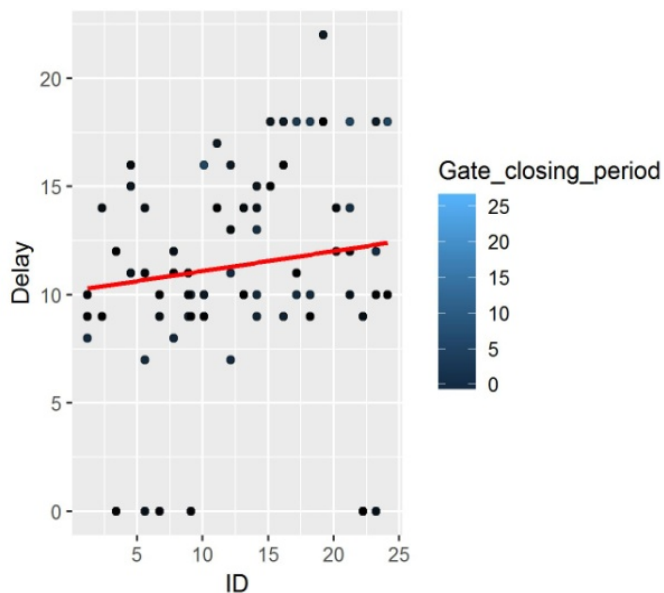


Fig. 7. General comparison between delay and gate closing period

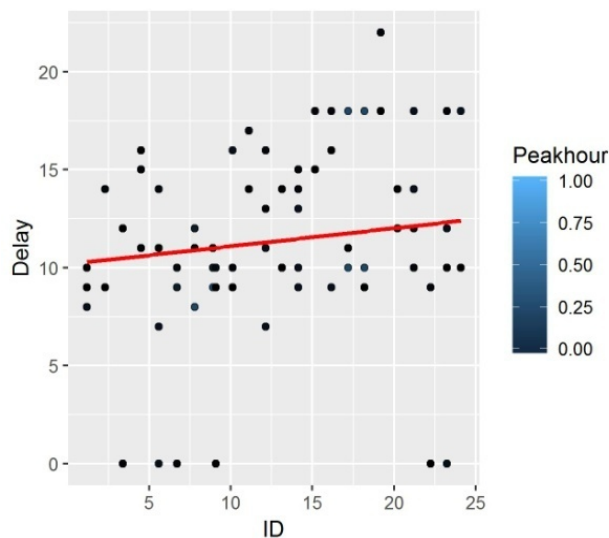


Fig. 8. General comparison between delay and peak hour

CONCLUSIONS

Railway level crossing gate close period shows a high significance level on motor vehicle delays. It means that waiting time at the level may be affected by train speed. Another significant factor is a train frequency. To improve the level crossing at the study area the research shows the importance of the V2I system. The implementation of this system will help to decrease a waiting time of a motor vehicle. The level crossing is not predictable. affected by gate close period the entering train at level crossing at the peak time. The analysis shows that factors like gate closing period, train frequency and this thesis studied the importance of V2I system implementation. Also, the research indicates and provided certain theoretical supports for traffic management and control.

One of the most interesting and promising tasks for intelligent transport systems (ITS) is connected with the problem of traffic congestion. Overloading is a pressing problem for

transport, as it reduces the efficiency of the infrastructure and increases travel time, air pollution and fuel consumption [5].

V2V (short for vehicle to vehicle) is an automobile technology designed to allow automobiles to "talk" to each other. For many years, significant research and projects have been carried out in this area, using Vehicular Ad Hoc Networks (VANET) for various applications, ranging from security to navigation and law enforcement. In December 2016, the US Department of Transportation proposed draft regulations that would gradually turn the communication capabilities of V2V into mandatory for light vehicles [6]. A variety of sensor technologies are necessary to detect and safely interpret the driving environment that increase in complexity as the level of automation increases:

- vision-based systems, currently in use for Level 2 and Level 3 automated driving, which can detect and safely interpret roadway signs and assess their viability to recognize grade crossings;

- stereo-based camera systems (two or more lenses) that simulate human binocular vision;

- deep learning models designed to rapidly perform moving object detection and classification tasks to assess their viability for recognition of approaching trains;

These technologies have been successfully demonstrated in today's passenger and commercial motor vehicle fleet and continue to evolve. However, the viability for implementation at grade-crossings is innovative and unexplored at this time [3]. The proposed system is cost-effective, convenient, efficient, secure and tailor-made level crossing protection system that is best suited to be implemented in the future of railway industry.

REFERENCES

1. Railway crossings will be safer [Zheleznodorozhnye pereezdy stanut bezopasnee], *Gazeta.uz* (published at Au-

gust 23, 2020). Available at: <http://www.gazeta.uz/ru/2009/08/23/rail> (accessed 25 Feb 2020).

2. Memo for drivers of vehicles when traveling through railway crossings [Pamyatka dlya voditeley avtotransporta pri proезде cherez zheleznodorozhnye pereezdy], *The State Inspection on Supervision of Safety of Rail Transportation of The Republic of Uzbekistan*. Updated at March 11, 2016. Available at: <http://rwnadzor.gov.uz/pam.php> (accessed 25 Feb 2020).

3. Zaouk B., Ozdemir K. Implementing Connected Vehicle and Autonomous Vehicle Technologies at Highway-Rail Grade Crossings, *2017 Grade Crossing Research Needs Workshop, 15–17 August, 2017, St. Louis, Missouri*. Available at: http://www.fra.dot.gov/conference/2017/rnw/pdf/Presentations/Engineering_and_Technologies/Implementing_Connected_Vehicle_and_Autonomous_Vehicle_Technologies_at_Highway-Rail_Grade_Crossings.pdf (accessed 25 Feb 2020).

4. Harding J., Powell G., Yoon R., et al. Vehicle-to-Vehicle Communications: Readiness of V2V Technology for Application, *U.S. Department of Transportation; National Highway Traffic Safety Administration (NHTSA) (Report No. DOT HS 812 014)*, Washington, DC, August 2014, 324 p. Available at: <http://www.nhtsa.gov/sites/nhtsa.dot.gov/files/readiness-of-v2v-technology-for-application-812014.pdf> (accessed 25 Feb 2020).

5. Martuscelli G., Boukerche A., Foschini L., Bellavista P. V2V Protocols for Traffic Congestion Discovery Along Routes of Interest in VANETs: A Quantitative Study, *Wireless Communications and Mobile Computing*, 2016, Vol. 16, Pp. 2907–2923. DOI: 10.1002/wcm.2729.

6. Vehicular communication systems, *Wikipedia*. (Last edited at March 30, 2020). Available at: http://en.wikipedia.org/wiki/Vehicular_communication_systems#cite_noteV2V_draft_rules-9 (accessed 02 Apr 2020).

Методы совершенствования безопасности на железнодорожных переездах Узбекистана

Э. Т. Тохиров

Ташкентский институт инженеров железнодорожного транспорта

Ташкент, Узбекистан

etokhirov@yahoo.com

Аннотация. Основное внимание уделяется сокращению времени ожидания и времени в пути автомобильного транспорта на железнодорожном переезде и увеличению безопасности на переездах. В настоящее время исследовательский интерес представляют приложения для улучшения передвижения, сокращения времени ожидания и улучшения безопасности для автотранспортных средств на железнодорожных переездах. Использование предложенного приложения системы V2I на железнодорожных переездах, приводит к сокращению времени ожидания и движения на железнодорожных переездах, а также обеспечению безопасности на переездах.

Ключевые слова: железнодорожные переезды, транспортное средство-транспортное средство, транспортное средство-инфраструктура, охраняемые железнодорожные переезды, неохраняемые железнодорожные переезды, авария.

ЛИТЕРАТУРА

1. Железнодорожные переезды станут безопаснее // *Gazeta. uz.* — 23.08.2009.

URL: <http://www.gazeta.uz/ru/2009/08/23/rail> (дата обращения 25.02.2020).

2. Памятка для водителей автотранспорта при проезде через железнодорожные переезды // *ГИ «Узгосжелдорнадзор».* — Обновлено 11.03.2016.

URL: <http://rwnadzor.gov.uz/pam.php>. (дата обращения 25.02.2020)

3. Zaouk B., Ozdemir K. Implementing Connected Vehicle and Autonomous Vehicle Technologies at Highway-Rail Grade Crossings // 2017 Grade Crossing Research Needs Workshop, 15–17 August, 2017, St. Louis, Missouri.

URL: http://www.fra.dot.gov/conference/2017/rmw/pdf/Presentations/Engineering_and_Technologies/Implementing_Connected_Vehicleand_Autonomous_Vehicle_Technologies_at_Highway-Rail_Grade_Crossings.pdf (дата обращения 25.02.2020).

4. Harding J., Powell G., Yoon R., et al. Vehicle-to-Vehicle Communications: Readiness of V2V Technology for Application // U.S. Department of Transportation; National Highway Traffic Safety Administration (NHTSA) (Report No. DOT HS 812 014) — Washington, DC, August 2014. — 324 p.

URL: <http://www.nhtsa.gov/sites/nhtsa.dot.gov/files/readiness-of-v2v-technology-for-application-812014.pdf> (дата обращения 25.02.2020).

5. Martuscelli G., Boukerche A., Foschini L., Bellavista P. V2V Protocols for Traffic Congestion Discovery Along Routes of Interest in VANETs: A Quantitative Study // *Wireless Communications and Mobile Computing.* 2016. Vol. 16. Pp. 2907–2923. DOI: 10.1002/wcm.2729.

6. Vehicular communication systems // *Wikipedia.* — Last edited at March 30, 2020.

URL: http://en.wikipedia.org/wiki/Vehicular_communication_systems#cite_note-V2V_draft_rules-9 (дата обращения 02.04.2020).

Application of the Concentration Function in Fuzzy Sets Theory

Grand PhD of Eng. Sc., professor V. A. Smagin
Honored Worker of Science of Russian Federation,
member of International Informatization Academy
Saint Petersburg, Russia
va_smagin@mail.ru

PhD E. M. Shurygin
Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University
Saint Petersburg, Russia
evgeniyok62@yandex.ru

Abstract. On examples of probability theory for normal and exponential distributions the new term «concentration function» in details is studied, offered the French scientist D. Djuge. An attempt was made to disseminate this term besides probability theory on the theory of fuzzy numbers of L. Zade. Two examples for trapeze and triangular membership functions are in details considered. Recommendations on application of function of concentration in various applied areas of a science are made. The new mathematical model for function of concentration on the basis of N. M. Sedjakin's principle and the recommendation for the further development of studied mathematical object offered.

Keywords: concentration function, distribution of probabilities, function of accessories.

INTRODUCTION

In the theory of random processes, according to D. Djuge, a famous French specialist in probability theory and mathematical "Theoretical and applied statistics" of statistics [1, 10] is intended to serve as a guide in the initial study of probability theory and mathematical statistics. According to this author, it is desirable to draw a distinction between applied statistics and theoretical (or probability calculation), it can be said that applied statistics, taking into account only the finite number of observations, study real observations and it are probability calculation, while theoretical statistics [8] can allow an infinite sequence of observations as the subject of the study. In our research performed in the proposed paper, we will rely only on probabilistic elements of the first chapter of the first part of the book called «Random Analysis». *What exactly was our interest as an author with this book before?* This studying of characteristic functions of negative random variables for correction of hyperdelta approximation of distributions of probabilities not only with the positive, but also negative initial moments and attempt of their application for the solution of the integrated equation of Wiener-Hopf by means of Fourier's transformation [9]. As a result, some positive results were obtained. New interest in the mentioned book was caused by familiarity in it with the section «Concentration function» on page 27. Briefly, this provision can be explained as follows:

- the need to select an expert of the desired quality;
- the need to select an expert with several desirable qualities;
- the need to achieve the right quality in the expert;
- the task of selecting a group of experts;
- achieving excellence in expert groups;
- solving the necessary tasks in efficiency theory, in intelligent information system, in modern metrology, in decision theory etc.

Turning to [2], let us give an interpretation of the concept of concentration in the broad sense: «concentration», concentration, accumulation, gathering someone, something in one place. It, like probabilistic concept, fashion, can play an important role in economic tasks. For example, Zhibra [1] makes a comment that the shoemaker makes the parts of the shoe soles in terms of the most common size determined by fashion.

However, with regard to the importance of the economic aspect of concentration, we must point out, first and foremost, the need for a deep development of concentration theory, precisely in order to meet future practical challenges. Therefore, the purpose of this article is to further study and further develop the theory related to the concept of concentration from the perspective of random processes.

P. Levy's concentration function [1, 6, 7]. The concentration function in probability theory is one of the characteristics of a random quantity. It is used in a number of tasks in probability theory, in particular in the study of the properties of convolutions of distributions and limit sums of independent random quantities.

Definition. Let be given a random quantity ξ with a distribution function F . The value concentration function $Q_F(x)$ is the function $Q_F(x)$, given on the non-negative half-axis as follows:

$$Q_F(x) = \max_{t \in R} (F(t+x) - F(t)). \quad (1)$$

Its properties:

$$1. Q_F(x) \geq 0; \quad (2)$$

$$2. Q_F(x) + Q_F(y) \leq Q_F(x+y); \quad (3)$$

3. $Q_F(x)$ is a monotonically non-decreasing continuous on the right function;

$$4. \lim_{x \rightarrow \infty} Q_F(x) = 1. \quad (4)$$

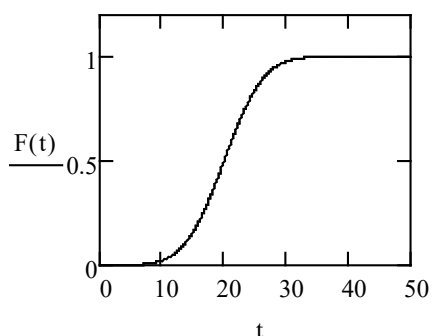
The purpose of this article is to study the principle of concentration function construction on specific examples. These include the probability distributions normal and exponential. In addition, the authors of this article proposed to extend the principle of construction of concentration function [2] to the field not only of probabilistic distributions, but also of the membership functions introduced by L.A. Zade [3, 4].

Example 1. Consider a normal distribution with probability density

$$m = 20; \sigma = 5; t = 0, 0,1 \dots 1; f(t) = \text{dnorm}(t, m, \sigma).$$

Figure 1 shows its distribution function $F(t) = \int_0^t f(z)dz$.
 If $t = 5, 10, 20, 25, 35$ and
 $x = 3, 8, 13, 18, 23, 28, 33, 38, 43$ get the following numerical data for $Q_F(x)$: Magnitude t acts as a parameter for the

function $Q_F(x)$. Parameter values t for the various functions $Q_F(x)$ are given to the left of the equations, and the argument values x — in the first line for all five functions.
 Figures 2 and 3 show the corresponding functions y_1, y_2, y_3, y_4, y_5 .



t	$x := (3\ 8\ 13\ 18\ 23\ 28\ 33\ 38\ 43)^T$
5	$y_1 := (6,848 \cdot 10^{-3}\ 0,079\ 0,343\ 0,724\ 0,944\ 0,994\ 0,998\ 0,999\ 0,999)^T$
10	$y_2 := (0,058\ 0,332\ 0,703\ 0,922\ 0,973\ 0,977\ 0,977\ 0,977\ 0,977)^T$
20	$y_3 := (0,226\ 0,445\ 0,495\ 0,500\ 0,500\ 0,500\ 0,500\ 0,500\ 0,500)^T$
25	$y_4 := (0,104\ 0,154\ 0,158\ 0,159\ 0,159\ 0,159\ 0,159\ 0,159\ 0,159)^T$
35	$y_5 := (1,191 \cdot 10^{-3}\ 1,348 \cdot 10^{-3}\ 1,350 \cdot 10^{-3}\ 1,350 \cdot 10^{-3}\ \dots)^T$

Fig. 1. Normal distribution function graph

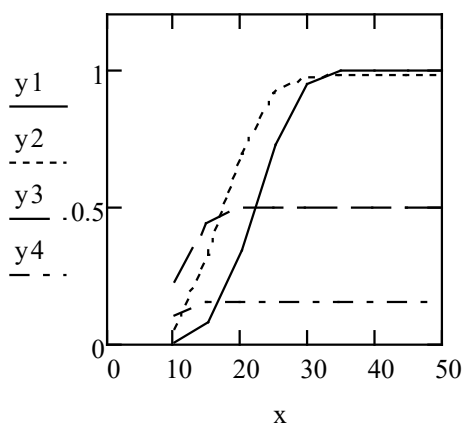


Fig. 2. Functions y_1, y_2, y_3, y_4 graphs

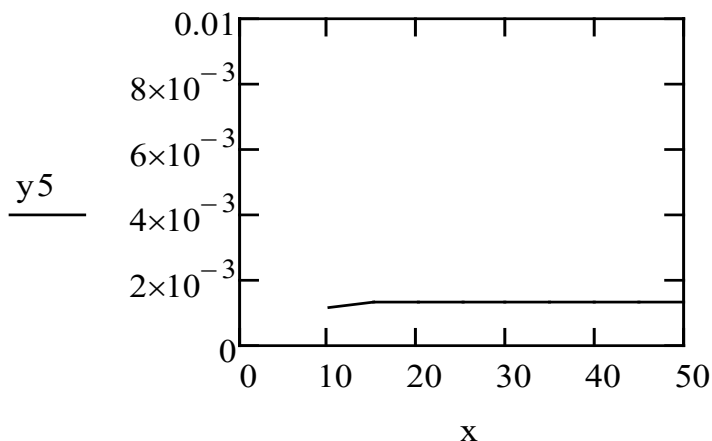


Fig. 3. Function y_5 graph

Example 2. Exponential distribution with probability density $\lambda = 0,05$; $t = 0, 0,1 \dots 1$; $f(t) = \lambda e^{-\lambda t}$.

If $t = 5, 10, 20, 25, 35$ and
 $x = 3, 8, 13, 18, 23, 28, 33, 38, 43$ get the following numerical data for $Q_F(x)$ the data shown in the table below.

Figure 4 shows its distribution function $F(t) = \int_0^t f(z)dz$.

t	$x := (3\ 8\ 13\ 18\ 23\ 28\ 33\ 38\ 43)^T$
5	$y_1 := (0,108\ 0,257\ 0,372\ 0,462\ 0,532\ 0,587\ 0,629\ 0,662\ 0,688)^T$
10	$y_2 := (0,084\ 0,200\ 0,290\ 0,360\ 0,414\ 0,457\ 0,490\ 0,516\ 0,536)^T$
20	$y_3 := (0,051\ 0,121\ 0,176\ 0,218\ 0,251\ 0,277\ 0,297\ 0,313\ 0,325)^T$
25	$y_4 := (0,040\ 0,094\ 0,137\ 0,170\ 0,196\ 0,216\ 0,231\ 0,244\ 0,253)^T$
35	$y_5 := (0,024\ 0,057\ 0,083\ 0,103\ 0,119\ 0,131\ 0,140\ 0,148\ 0,154)^T$

Figures 5 shows the corresponding functions y_1, y_2, y_3, y_4, y_5 .

The more concentrated the distribution function on the axis t , the earlier the concentration function begins to grow and the

earlier it reaches the maximum value. The results of the study of concentration functions for normal and exponential distributions are shown in Examples 1 and 2.

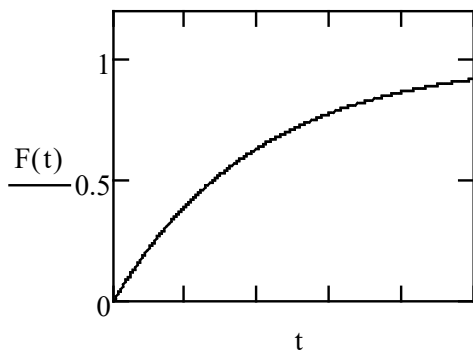


Fig. 4. Exponential distribution function graph

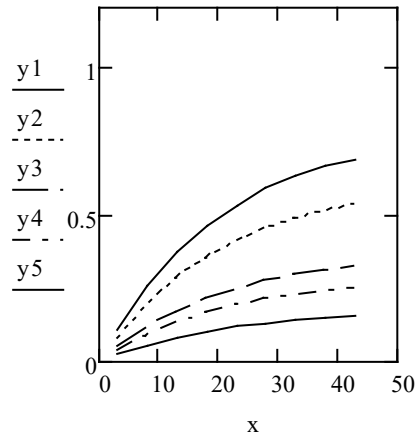


Fig. 5. Functions y_1, y_2, y_3, y_4, y_5 graphs

Example 3. This example is devoted to the study of the concentration function not to the probability distribution function, but to the membership functions of the theory of fuzzy sets [3]. This function is a trapezoidal function of accessory with source data: $a = 5, b = 10, c = 30, d = 35$.

Intermediate functions are entered first:

$$v(t) = \frac{t-a}{b-a}, \quad k(t) = \frac{d-t}{d-c}, \quad m(t) = 1,$$

which are represented first as a linear programming operator and then by a function of accessory with the argument t

$$\mu(t) := \begin{cases} \frac{t-a}{b-a}, & \text{if } a \leq t \leq b; \\ 1, & \text{if } b < t \leq c; \\ \frac{d-t}{d-c}, & \text{if } c < t \leq 35. \end{cases}$$

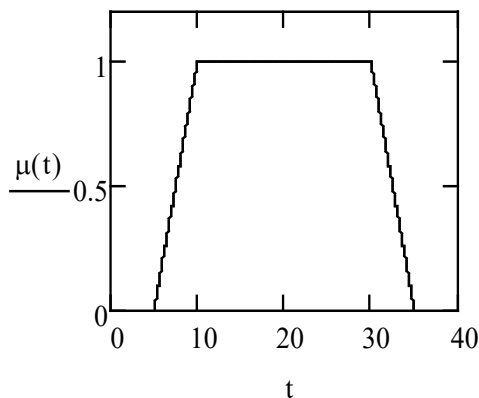


Fig. 6. Image of function of accessory

Figure 6 shows an image of the membership function.

Let's find the probability density function for a given function of accessories. To do this, first find the magnitude of the area of the function $\mu(t)$, then normalization factor and auxiliary check constants

$$C = \frac{1}{25} = 0.04, \quad a(t) = \frac{1}{25}\mu(t), \quad \frac{1}{2} \cdot 5 \cdot 0.04 = 0.1,$$

$$0.1 \cdot 2 = 0.2, \quad 20 \cdot 0.04 = 0.8, \quad 0.2 + 0.8 = 1.$$

And finally, we find the probability density for the membership function. Figure 7 shows this probability density.

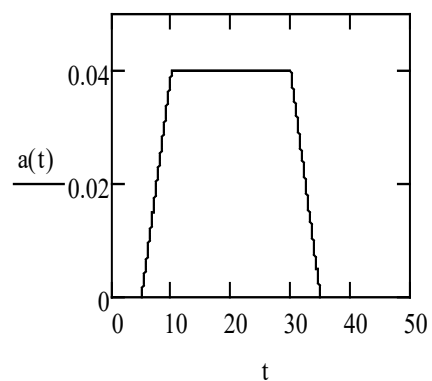


Fig. 7. Probability density for the function of accessory graph

The basic distribution function $F(t)$ by which the concentration function $Q_F(t)$ is determined:

$$F(t) := \begin{cases} \frac{(t-5)^2}{250}, & \text{if } a \leq t \leq b; \\ 0,1 + \left(\frac{t}{25} - \frac{2}{5}\right), & \text{if } b < t \leq c; \\ 0,9 + \frac{(30-t)(t-40)}{250}, & \text{if } c < t \leq 35. \end{cases}$$

$x1 := (3\ 8\ 13\ 18\ 23\ 28)^T$	$y1 := (0,036\ 0,220\ 0,420\ 0,620\ 0,820\ 0,984)^T$
$x2 := (3\ 8\ 13\ 18\ 23)^T$	$y2 := (0,120\ 0,320\ 0,520\ 0,720\ 0,884)^T$
$x3 := (3\ 8\ 13)^T$	$y3 := (0,120\ 0,320\ 0,484)^T$
$x4 := (3\ 8)^T$	$y4 := (0,120\ 0,284)^T$
$x5 := (3)^T$	$y5 := (0,084)^T$

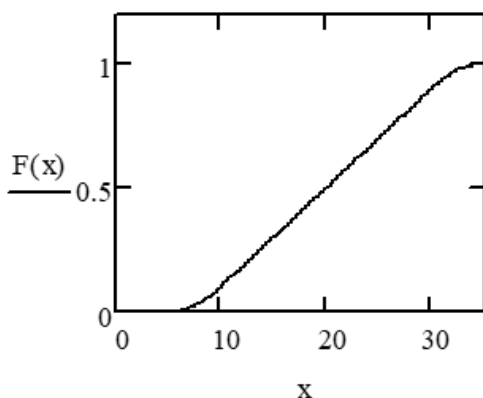


Fig. 8. Basic distribution function $F(t)$ graph

The idea of constructing concentration functions also extends to the membership functions to the theory of fuzzy sets. However, for its implementation it is necessary to reduce the membership functions to functions of probability densities, and only then use the functions of probability distributions to find concentrations of accessory functions. At the same time, any breaking membership functions can be used to find the necessary concentration functions inherent in them. This is supported by Examples 3 and 4 illustrating studies first of the trapezoidal and then of the triangular membership functions.

Example 4. Consider an example of the construction of a concentration function for a triangular accessory function of the theory of fuzzy sets [3]. This function is considered a membership function with similar source data: $a = 5, b = 10, d = 35$. Intermediate functions are entered first

$$v(x) = \frac{x-a}{b-a}, \quad k(x) = \frac{d-x}{d-b}, \quad m(x) = 1, \quad (5)$$

Figure 8 shows the basic function $F(t) = \int_0^t a(z)dz$.

At values of parameter $t = 5, 10, 20, 25, 35$ get the following data for concentration function $Q_F(x)$. Based on this data, graphs of the function are plotted on Figure 9.

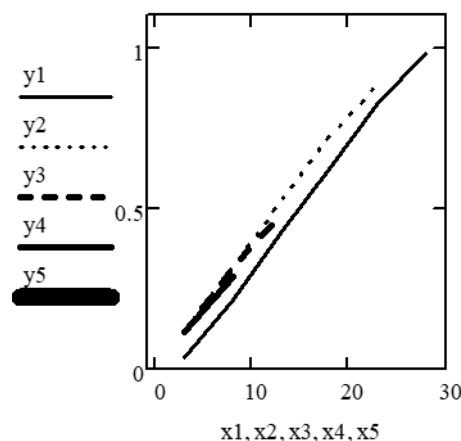


Fig. 9. Concentration functions graphs

Which are represented first as a linear programming operator and then by a function of accessory with the argument x

$$\mu(x) := \begin{cases} \frac{x-a}{b-a}, & \text{if } a \leq x \leq b; \\ \frac{d-x}{d-c}, & \text{if } c < x \leq d; \end{cases} \quad (6)$$

$$h(x) := \begin{cases} v(x), & \text{if } a \leq x \leq b; \\ k(x), & \text{if } b < x < d. \end{cases}$$

Figure 10 shows the membership function, and Figure 11 shows the equivalent of its probability density. Coefficient of rationing is 1.

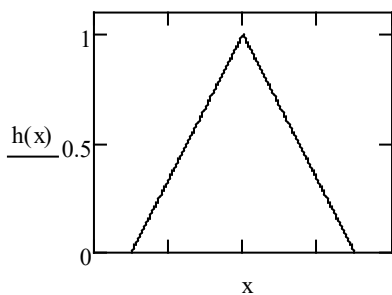


Fig. 10. Function of accessory graph

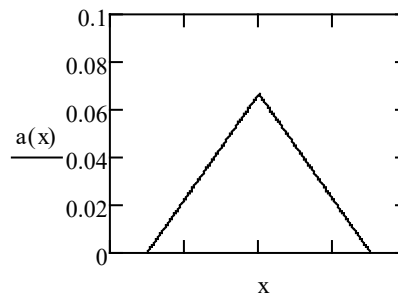


Fig. 11. Probability density of the function of accessory graph

Below shows the distribution function and the numerical functions for drawing the graphs shown in Figure 12.

$$a = 5, d = 35,$$

$$F(x) := \begin{cases} \frac{(x-5)^2}{450}, & \text{if } a < x \leq b; \\ 0,5 + \frac{(20-x)(x-50)}{450}, & \text{if } b < x \leq d. \end{cases}$$

The time points were chosen equal to: $t = 10, 15, 20, 25, 20$ h.

$x1 := (3\ 8\ 13\ 18\ 23)^T$	$y1 := (0,087\ 0,320\ 0,624\ 0,836\ 0,936)^T$
$x2 := (3\ 8\ 13\ 18)^T$	$y2 := (0,153\ 0,458\ 0,669\ 0,769)^T$
$x3 := (3\ 8\ 13)^T$	$y3 := (0,180\ 0,391\ 0,491)^T$
$x4 := (3\ 8)^T$	$y4 := (0,113\ 0,213)^T$
$x5 := (3)^T$	$y5 := (0,047)^T$

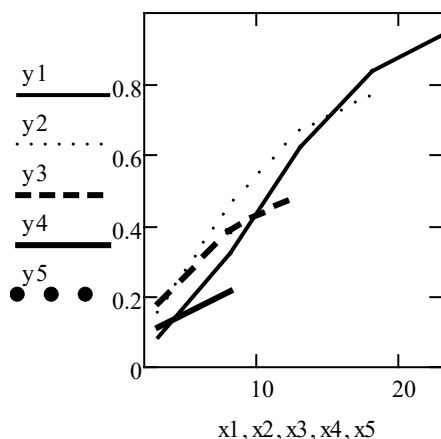


Fig. 12. Resulting graphs $y1-y5$

Curves y are based on source [11]. From Figure 12 it is particularly clear that the earlier the construction of the concentration function begins (less time t), the greater the value of this function with increasing argument x and quickly reaching a concentration limit.

Remark. From the examples discussed it follows that the concentration function for any probability distribution is a new, nested function of the random concentration value distribution $Q_F(x)$ for the base distribution considered $F(t)$. The authors were also able to consider two examples of the construction of the function of concentration of the membership functions the theory of fuzzy sets. However, the clear physical meaning of the concentration function for the author of this article remains unclear. P. Levy, in his works, cites several theorems with proposals of practical orientation, which we mentioned at the beginning of this article. They carry, in our view, theoretical value for studying the marginal behavior of the twists of random quantities, as well as in studying the behavior of sums of a significant number of random deposits. From our point of view, the study of concentration functions should be more closely linked to practical tasks. For example, with the formation of expert groups to meet the challenges of making some decisions and other challenges. Therefore, we will try to simplify the solution of the concentration problem at a simpler mathematical level. Let's execute an additional research. Inherently, the concentration function is a function of the probability distribution given on the positive axis $x \in R$ with time parameter t . It can therefore have initial and central moments, probability density, failure intensity, and concentration lifetime:

$$Q_F(x, t) = \max_x (F(t + x + 0) - F(t)), \tag{7}$$

$$q_F(x, t) = \frac{d}{dx} Q_F(x, t), \tag{8}$$

$$v_F^1(x, t) = \int_0^\infty z \cdot q_F(z, t) dz, \tag{9}$$

$$v_F^2(x, t) = \int_0^\infty z^2 \cdot q_F(z, t) dz, \tag{10}$$

$$\lambda_F(x, t) = \frac{q_F(x, t)}{1 - Q_F(x, t)}, \tag{11}$$

$$r(x, t) = \int_0^x \lambda_F(z, t) dz. \tag{12}$$

Then, the probability that the concentration value will be at least x the value will be determined as

$$P_F(x, t) = e^{-r(x, t)} = e^{-\int_0^x \lambda_F(z, t) dz}. \tag{13}$$

And since the amount of concentration resource is random, there are initial and central moments of the random amount of concentration resource. They can be defined by the formu-

la (13). However, this path is difficult enough to produce calculations. Therefore, we will take a simpler and more visible way. To do this, we will perform two examples.

Example 5. Again, reference is made to Example 1 discussed above. Example. at the beginning of article. It set four points in time t on Figure 1 and nine argument values x . Each moment t has its own function of concentration distribution in Figures 2 and 4. On value of the moment t and to arguments x the probability value can be determined from their inherent values. This example relies on a normal theoretical distribution and a set of desired probability values of the concentration values. If the researcher wishes, all these initial values can be set.

Example 6. Leans on Example 4. Articles related to the construction and determination of the values of the concentration functions of the triangular membership function to the theory of fuzzy sets by L. A. Zade [3]. Its essence consists in the fact that by software first the function of concentration value distribution is built on the basis of specified initial data for the function of belonging. Note that both functions in Examples 3 and 4 are not continuous, they are characterized by discontinuity. This is illustrated in Figures 8 and 12. Then on the example of one of them we use an expression known from the theory of random processes for the probability of achieving some event (in the theory of reliability, it is the probability of no-sign operation of the system), having the form:

$$P(t) = e^{-\int_0^t \lambda(z) dz}, \quad (14)$$

where $\lambda(t)$ — the rate of occurrence of the event (for example, failure). Expression (7) can be represented as

$$P(t) = e^{-r(t)}, \quad (15)$$

where $r(t) = \int_0^t \lambda(z) dz$ it is commonly referred to as «reliability resource in the sense of professor N. M. Sedyakin» [5]. It can be interpreted as a «safety margin» that can be consumed during system operation. From our point of view, it can be interpreted as a value of distribution concentration. Consider the functions (Fig. 10 and 11) of the 4 examples and the resulting graphs of Figure 12. Let's enter designation to write the concentration function by going from (10) to $Q(t) = 1 - e^{-r(t)}$, and replacing the variable in this formula t for x , we get the concentration value distribution function for the triangular function of accessories. And by applying the concept of resource according to N. M. Sedyakin [5] directly to the concept of resource concentration, we will get its graphical representation. The presented transition is displayed using the functions below and Figure 13. The necessary initial values of the membership function parameters can be replaced.

$$a := 5, b := 20, d := 35,$$

$$Q(x) := \begin{cases} \frac{(x-5)^2}{450}, & \text{if } a < x \leq b; \\ 0,5 + \frac{(20-x)(x-50)}{450}, & \text{if } b < x \leq d; \end{cases}$$

$$r(t) = -\ln(1 - Q(t)).$$

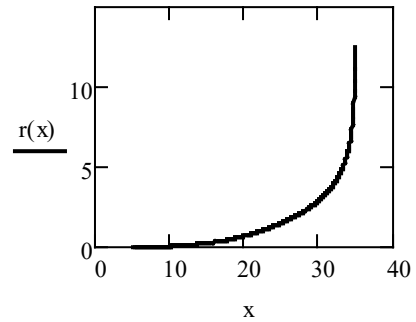


Fig. 13. Concentration value distribution function $r(x)$

The values of the variable t may be selected at the discretion of the researcher in accordance with (1), may also be considered to estimate the value x to construct the concentration value distribution function. For example, in our example, choose $t = 5, 10, 15, 20, 30$. For these values, the concentration value is estimated as follows:

$$\begin{aligned} r(5,01) &= 2,222 \cdot 10^{-7} & r(5,1) &= 2,222 \cdot 10^{-5} \\ r(8) &= 0,020 & r(10) &= 0,057 & r(15) &= 0,251 & (16) \\ r(18) &= 0,471 & r(30) &= 2,890 \dots \end{aligned}$$

From the values of these obtained numbers it can be concluded that the value of the concentration function for the triangular function of accessory with increase of the initial basic moment of time counting monotonically increases. The scale for the resource quantity can be divided into several identical intervals and a concentration function can be constructed for each value. And then for any value of them find the amount of risk and the amount of effect (or losses) depending on the set goal of solving the problem. In this way, an answer can be found to solving some efficiency problem.

CONCLUSION

In the presented article authors consider the mathematical function of concentration proposed by P. Levi [6, 7] for research and solution of problems in the field of random processes. A concentration function is a function of the distribution of a plurality of random quantities depending on the magnitude of the concentration interval located on the positive real axis of the original, basic function of the distribution of random quantities. The concentration interval is defined as the distance between two fixed moments of time, its magnitude can vary from zero to an infinite value. The power of the concentration function (probability) depends on the length of this interval and the random values enclosed inside it, provided that the interval can be located anywhere in the axis of the basic distribution function. Thus, for any basic distribution, the built concentration function is a monotonically increasing function from zero to a unit value.

The built concentration function based on the first basic function can itself be regarded as a new basic function for constructing a new concentration function, etc. This conclusion is drawn by us, the authors of this article, on the basis of the study of the first concentration function. For the construction of functions (13) and (14) the principle of linear prediction from the book [11] was used.

The principle of the construction of the concentration function by the authors of this article extends to the membership function of the theory of fuzzy sets, provided that the membership function is normalized. This allows you to work not only with continuous functions, but also with functions that have breaks. Two examples are given to confirm this fact.

In addition, the authors have shown that the value of concentration can be determined on the basis of the value of the «reliability resource» proposed by Professor N. M. Sedya-kin [5] in 1965. The use of concentration function can be used in solving many problems of a variety of nature, for example, in efficiency theory, in intelligent information system, in modern metrology and in decision theory.

REFERENCES

1. Dugué D. *Traité de Statistique Théorique et Appliquée. Analyse Aléatoire — Algèbre Aléatoire* [Teoreticheskaya i prikladnaya statistika], Moscow, Nauka Publishers, 1972, 383 p.
2. Soviet Encyclopedic Dictionary. Fourth Edition [Sovetskiy entsiklopedicheskiy slovar'. Chetvertoe izdanie], Moscow, Soviet Encyclopedia Publishers, 1989, 1633 p.
3. Zadeh L. A. Fundamentals of a New Approach to the Analysis of Complex Decision-Making Processes [Osnovy novogo podkhoda k analizu slozhnykh protsessov prinyatiya resheniy], *Mathematics today: Collected papers [Matematika segodnya: Sbornik statey]*, Moscow, Znanie Publishing House, 1974, Pp. 5–49.
4. Zadeh L. A. The concept of a linguistic variable and its application to making approximate decisions [Ponyatie lingvisticheskoy peremennoy i ego primenenie k prinyatiyu priblizhennykh resheniy], Moscow, Mir Publishers, 1976, 165 p.
5. Sedyakin N. M. About One Physical Principle of Reliability Theory [Ob odnom fizicheskom printsipe teorii nadezhnosti], *News of the Academy of Sciences of the USSR. Technical Cybernetics [Izvestiya Akademii Nauk SSSR. Tekhnicheskaya kibernetika]*, 1966, No. 3. Pp. 80–87.
6. Lévy P. *Théorie de l'addition des variables aléatoires*. Deuxième édition, Paris, Gauthier-Villars, 1954, 405 p.
7. Lévy P., Loève M. *Processus stochastiques et mouvement brownien*, Paris, Gauthier-Villars, 1948, 367 p.
8. van der Waerden B. L. *Matematische Statistik [Matemachicheskaya statistika]*, Foreign Literature Publishing House, 1960, 434 p.
9. Wintner A. The Fourier transform of probability distributions: Lectures (Based on lecture notes taken by Dr. F. W. Light at Johns Hopkins University during the 1942–43 academic year.), Baltimore, 1947, 185 p.
10. Dugué D. *Arithmétique des lois de probabilités, Mémorial des Sciences Mathématiques. Fascicule CXXXVII*, Paris, Gauthier-Villars, 1957, 51 p.
11. Kir'yanov D. V. *Mathcad 12*, St. Petersburg, BHV-Peterburg, 2005, 557 p.

Применение функции концентрации в теории нечетких множеств

д.т.н., профессор В. А. Смагин

заслуженный деятель науки РФ,
действит. член Международной академии информатизации
Санкт-Петербург, Россия
va_smagin@mail.ru

к.т.н. Е. М. Шурыгин

Петербургский государственный университет
путей сообщения Императора Александра I
Санкт-Петербург, Россия
evgeniyok62@yandex.ru

Аннотация. На примерах теории вероятностей для нормального и экспоненциального распределений детально изучается новый термин «функция концентрации», предложенный французским ученым Д. Дюге. Предпринята попытка распространить это нововведение помимо теории вероятностей на теорию нечетких чисел Л. Заде. Детально рассмотрены два примера для трапециевидальной и треугольной функций принадлежности. Даются рекомендации на применение функции концентрации в различных прикладных областях науки. Предложена новая математическая модель для функции концентрации на основе принципа Н. М. Седакина и рекомендация для дальнейшего развития изучаемого математического объекта.

Ключевые слова: функция концентрации, распределение вероятностей, функция принадлежности.

Литература

1. Дюге Д. Теоретическая и прикладная статистика = *Traité de Statistique Théorique et Appliquée. Analyse Aléatoire — Algèbre Aléatoire* / Перевод с фр. В. М. Калинина; под ред. акад. Ю. В. Линника. — М.: Наука, 1972. — 383 с.
2. Советский энциклопедический словарь / гл. ред. А. М. Прохоров. — 4-е изд., испр. и доп. — М.: Советская энциклопедия, 1989. — 1633 с.
3. Заде Л. А. Основы нового подхода к анализу сложных процессов принятия решений // *Математика сегодня: Сборник статей* / Пер. с англ. В. А. Горелика, С. А. Орловского, Н. И. Ринго; сост. А. В. Шилейко. — М.: Знание. — 1974. — С. 5–49. — (Новое в жизни, науке, технике. Серия «Математика, кибернетика»).

4. Заде Л. А. Понятие лингвистической переменной и его применение к принятию приближенных решений / Пер. с англ. Н. И. Ринго; под ред. Н. Н. Моисеева и С. А. Орловского. — М.: Мир, 1976. — 165 с. — (Математика. Новое в зарубежной науке).

5. Седакин Н. М. Об одном физическом принципе теории надежности // *Известия Академии наук СССР. Отделение технических наук. Техническая кибернетика*. 1966. № 3. С. 80–87.

6. Lévy P. *Théorie de l'addition des variables aléatoires*. Deuxième édition. — Paris, Gauthier-Villars, 1954. — 405 p.

7. Lévy P., Loève M. *Processus stochastiques et mouvement brownien*. — Paris, Gauthier-Villars, 1948. — 367 p.

8. ван дер Варден Б. Л. *Математическая статистика = Mathematische Statistik* / Пер. с нем. Л. Н. Большева; под ред. Н. В. Смирнова. — М.: Издательство иностранной литературы. Редакция литературы по математическим наукам, 1960. — 434 с.

9. Wintner A. *The Fourier transform of probability distributions: Lectures (Based on lecture notes taken by Dr. F. W. Light at Johns Hopkins University during the 1942–43 academic year)*. — Baltimore, 1947. — 185 p.

10. Dugué D. *Arithmétique des lois de probabilités // Mémoires des Sciences Mathématiques. Fascicule CXXXVII*. — Paris, Gauthier-Villars, 1957. — 51 p.

11. Кирьянов Д. В. *Mathcad 12: Наиболее полное руководство*. — СПб.: БХВ-Петербург, 2005. — 557 с. — (В подлиннике).

Перспективы развития спутниковых услуг

В. Б. Каткалов

Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского
Санкт-Петербург, Россия
vkatkalov@mail.ru

Аннотация. Рассматриваются состояние и перспективы развития космических спутниковых услуг. Представлены примеры функционирования, принцип действия и назначение сервисных космических аппаратов. Оценены проблемы, возникающие при создании спутниковых услуг. Приведен перечень функционирующих и планируемых к запуску сервисных космических аппаратов. Показаны основные направления оказания и применения спутниковых услуг для решения целевых задач. В том числе: продление ресурса спутников, заправка космических аппаратов топливом, поддержание орбиты и ориентации спутников, автоматизированные ремонты на борту, техническая инспекция космических аппаратов.

Ключевые слова: космический аппарат орбитальных сервисных услуг (КА ОСУ), продление ресурса спутников, заправка космических аппаратов топливом, поддержание орбиты и ориентации спутников, автоматизированные ремонты на борту, техническая инспекция.

ВВЕДЕНИЕ

Известно, что в ближайшем к Земле окружающем космическом пространстве работает примерно 1 300 крупных космических аппаратов, и только около 500 — это функционирующие спутники. И они, как и люди, к сожалению, не вечны. Может закончиться топливо, а полезная нагрузка еще в великолепной форме; может выйти из строя аккумуляторная батарея, а аппаратура еще может работать; могут солнечную батарею повредить микрометеориты, но, заменив ее, можно продлить жизнь КА; можно повесить

дополнительный блок, и КА станет работать в 2 раза лучше... Увы, но на современной космической технике большинство из указанных операций по замене элементов выполнить без помощи человека-оператора весьма затруднительно. Для этого уже будущие космические аппараты надо приводить к виду, ремонтпригодному в космосе, с помощью робототехнических устройств, которые могли бы работать с помощью манипуляторов без присутствия человека.

Еще в 2000 году агентство перспективных военных разработок США (Defense Advanced Research Projects Agency, DARPA) инициировало проект Orbital Express, целью которого подразумевалась отработка методов взаимодействия сервисного спутника и спутника-клиента при осуществлении процесса реконфигурации и дозаправки. Согласно плану проекта было разработано два космических аппарата: ASTRO (Autonomous Space Transport Robotics Operations) и NextSat (Next Generation Satellite). Внешний вид аппаратов представлен на рисунке 1 [1].

ASTRO, выполнявший роль сервисного спутника, согласно плану эксперимента, должен был состыковаться с NextSat и произвести установку в его грузовой отсек доставляемых элементов. Параллельно с этим должна была осуществляться перекачка топлива. Конструкция NextSat предполагала кооперацию с ASTRO. Весь процесс контролировался посредством множества датчиков и радиосвязи между космическими аппаратами.



Рис. 1. Аппараты ASTRO и NextSat

ASTRO оборудовался манипулятором, позволяющим проводить имитацию сервисного обслуживания, а также дающим возможность проведения стыковки без использования бортовых двигателей, что и изображено на рисун-

ке 2. Продолжение разработок в этом направлении также подразумевает использование одного манипулятора, однако с иными габаритами и параметрами (рис. 3, 4) [2].



Рис. 2. Ход эксперимента Orbital Express 1.2 Phoenix

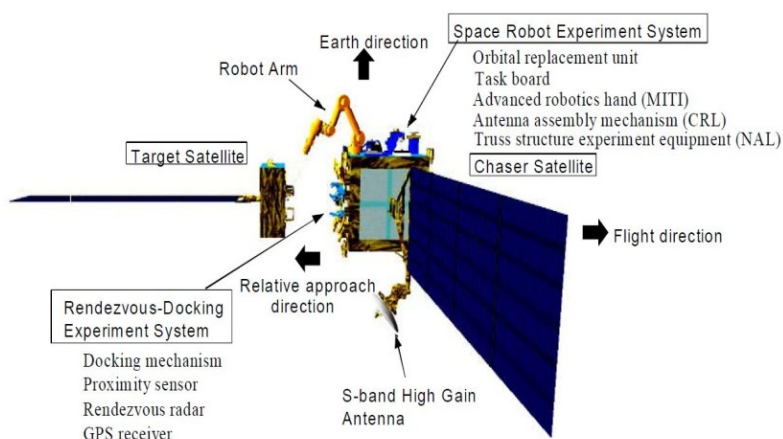


Рис. 3. Схема применения КА

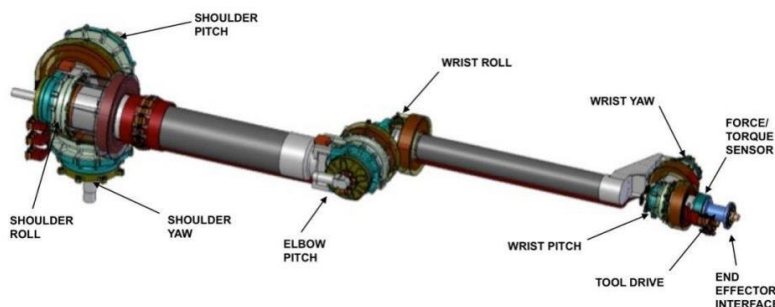


Рис. 4. Манипулятор FRENД проекта Phoenix

Эксперимент предполагал сближение, стыковку, маневр, перекачку топлива, имитацию технического обслуживания и сопровождение одним спутником другого на удалении, максимально допустимом согласно возможностям радиосвязи. Эксперимент был начат в марте 2007 г. и продолжался на протяжении 3 месяцев.

За последние годы не только в США, но и в других странах начали уделять значительное внимание появлению орбитальных сервисных услуг (ОСУ) с помощью малых космических аппаратов (МКА). Так, например, компания Effective Space Solutions (Великобритания) разрабатывает специальную станцию-базу [3] с помощью которой предполагается организовать ряд услуг по увеличению

срока активного существования спутников до пяти лет. Компания Space Systems Loral (SSL, США) работает над автоматизированным обслуживанием геосинхронной программы спутников с управлением перспективного планирования оборонных научно-исследовательских работ (DARPA). Практически одновременно такие же услуги анонсировали компании Intelsat (англ. *The International Telecommunications Satellite Organization* — Международная организация спутниковой связи), Orbital ATK и Maxar Technologies (все — США) [4]. Предполагалось, что орбитальные услуги начнут оказываться в 2018 году. Но, как всегда, хорошие начинания происходят с задержкой, и поэтому плановое начало работ состоялось в октябре 2019 года. Так, Orbital ATK и ее дочерняя компания Space Lo-

gistics LLC запланировали продлить ресурс одного из спутников Intelsat на пять лет, используя собственный аппарат Mission Extension Vehicle (MEV, аппарат для продления миссий) [5]. Аппарат MEV-1 должен был иметь возможность автономно пристыковываться к соплу апогейного двигателя обслуживаемого спутника (рис. 5). После этого аппарат взял бы на себя функции по обеспечению поддержания орбиты и ориентации телекоммуникационного спутника, находящегося на геостационарной орбите. Возможно и другое решение — КА ОСУ мог бы осуществить заправку не одного обслуживаемого КА, а нескольких, находящихся на ближних орбитах. Кроме того, подобный аппарат мог бы использоваться для снятия с орбиты спутников, выслуживших свой срок.

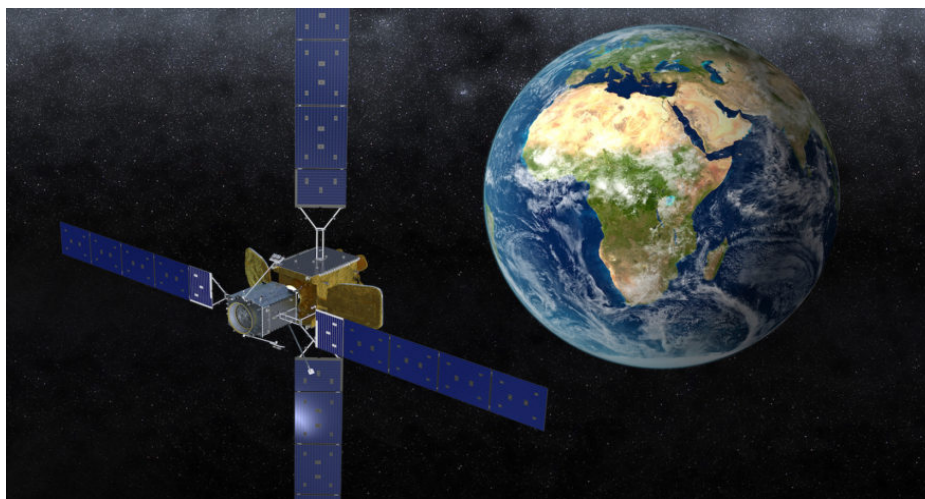


Рис. 5. Аппарат MEV компании Orbital ATK (слева) при стыковке с коммерческим спутником

Американский спутник MEV-1 (рис. 6, 7) был изготовлен корпорацией Northrop Grumman, куда в 2018 году вошла компания Orbital ATK, и запущен с космодрома Байконур российской ракетой-носителем «Протон-М» с раз-

гонным блоком «Бриз-М» 9 октября 2019 года. Вес спутника составил 2 326 кг. В качестве двигателей выступают два электроракетных (ионных) двигателя.

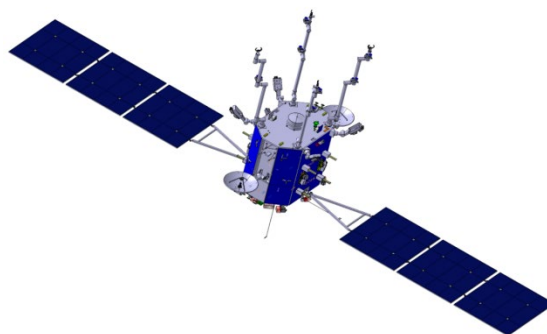


Рис. 6. Космический аппарат MEV-1

Спустя некоторое время после проведенных испытаний, в 2020 году, MEV-1 планируется состыковать с КА Intelsat IS-901 на орбите захоронения, расположенной 332 километрами выше геостационарной дуги и далее, после проведения тестов в состыкованном состоянии и проверки работоспособности всех систем, продолжить с ним работу после перемещения в точку стояния (342° восточной долготы) в течение 5 лет. Заметим, что спутнику, который будет обслуживаться MEV-1, чуть более 18 лет. И если

даже во время тестирования что-то пойдет не так, то он после расстыковки сможет состыковаться с другим спутником Intelsat, испытывающим нехватку топлива и находящимся поблизости. Известен Eutelsat 5 West A (IS-901) тем, что по версии западных СМИ он был одним из двух аппаратов, «обследованных» российским спутником-инспектором «Олимп-К» в апреле 2015 года и работавшим в С- и Ku-диапазонах. На сегодня спутники MEV могут пристыковываться к 80–90 % геостационарных

спутников на орбите, даже если они изначально не были для этого предназначены. Следующий спутник MEV-2 планируется запустить с помощью ракеты-носителя Ariane-5 ECA (Evolution Cryotechnique type A) в 2020 году с космодрома Куру, и, в случае успешных операций

с MEV-1, MEV-2 состыкуется с целевым спутником сразу на геостационарной орбите. Каждый MEV имеет 15-летнюю гарантию и разработан так, чтобы выполнить десятки стыковок и перемещений за это время.



Рис. 7. Космический аппарат MEV-1 в сборочном цехе

Следует отметить, что в такой ситуации продление ресурса спутников позволит операторам продлить срок эксплуатации полезной нагрузки своих спутников даже после того, как топливо на их борту закончится. Возможность спутниковых операторов продолжать использовать ресурс полезной нагрузки своих аппаратов, исходя из их фактического состояния, является одной из главных причин повышенного интереса к орбитальному сервисному обслуживанию. Причем ресурс КА может быть продлен не только в виде поддержания орбиты и ориентации спутника, заправки топливом, но и за счет простого ремонта и замены выносных сменных узлов (блоков). КА ОСУ мог бы в ближайшей перспективе выполнять простые автоматизированные ремонты, например по выпуску панели солнечных батарей, которая была не в состоянии развернуться должным образом.

В Европе и Канаде (люксембургская компания SES S.A. (фр. *Société Européenne des Satellites* — Европейское Общество Спутников) и канадская MDA Corp. (MacDonald, Dettwiler and Associates)) еще в 2016 году заявили о готовности инвестировать в создание технологий, которые в будущем должны обеспечить дозаправку спутников, находящихся на орбите, а также замену установленной на них полезной нагрузки.

MDA Corp. (теперь — часть Maxar Technologies) разработала орбитальный аппарат-дозаправщик, который

стыкуется с обслуживаемыми спутниками, заправляет их топливом, а затем отправляется на дозаправку других КА. Первое из подобных устройств установлено на спутнике SES-16, заказчиком которого для нужд Министерства обороны страны и других союзников по НАТО выступило LuxGovSat, совместное предприятие SES и правительства Люксембурга [4]. Запуск SES-16/GOVSAT-1 был произведен 31 января 2018 г. с помощью ракеты-носителя Falcon-9 FT (англ. *Full Thrust* — «полная тяга»).

Перечень функционирующих и планируемых к запуску сервисных космических аппаратов, представлен в таблице 1. Планируется, что новые телекоммуникационные спутники SES будут доставлять на геостационарную орбиту дополнительные модули для дооснащения еще функционирующих спутников, а также снимать с них выработавшую свой ресурс полезную нагрузку, прежде чем приступить к выполнению своих основных телекоммуникационных задач [4]. Тем более, что технология стыковок, необходимая для таких операций уже отработана на ряде других проектов.

Другим, но не менее важным применением малых сервисных спутников будет являться безоператорная техническая инспекция дорогостоящих отечественных КА, введенных на орбиту, но по каким-либо причинам потерявшим работоспособность. Безусловно, если его работа с высокой степенью вероятности обеспечит выявление

возможных причин неисправности. Такие сервисные космические аппараты (СКА), в свою очередь, должны быть оборудованы прожекторной техникой, теле- и фотокаме-

рами с вариообъективами, а также соответствующими каналами передачи изображений и дистанционного управления.

Таблица 1

Сервисные космические аппараты

Тип спутника	Запуск	Ракета-носитель	Назначение	Компания	Проект
SES-16 / GOVSAT-1	31.01.2018	Falcon-9 FT	Заправка КА	MDA Corp., SES, LuxGovSat	
MEV-1	09.10.2019	Протон-М	Ориентация и поддержание орбиты	Orbital ATK, Northrop Grumman	
MEV-2	Планируется в середине 2020 г.	Ariane-5 ECA	Заправка КА Intel-sat 10-02 на геосинхронной орбите	Maxar Technologies, MDA Corp.	MDASIS

В качестве примера можно упомянуть, что первое инспектирование спутника программы раннего оповещения о пусках DSP-23, который прекратил свою работу спустя несколько месяцев после запуска, прошло в 2008 году с помощью пары малых сверхсекретных спутников MiTeX DSP (227 кг), изготовленных по заказу DARPA (USA-187 и USA-188).

Вполне возможно, что в недалеком будущем, вероятно в массовом порядке также применение и автономных роботизированных систем, установленных на СКА (рис. 8). Очень подробно о режимах функционирования монтажно-сервисных роботизированных космических модулей изложено в статье «Космическая робототехника для монта-

жа и сервиса: потенциальные задачи, концепции перспективных систем» [6]. В будущем, на более высоком уровне применения, станет также возможным перепрограммирование миссий находящихся на орбите КА.

Поскольку СКА в настоящее время предназначены для решения сравнительно простых задач, то их весовые и стоимостные характеристики будут находиться на относительно низких уровнях. Кроме того, оперативность применения СКА с учетом их относительно низкой стоимости и простоты использования позволит быстро принимать меры по восстановлению специализированных космических аппаратов.



Рис. 8. Схема применения роботизированной системы СКА

Говоря об использовании СКА, нельзя не сказать несколько слов о такой важной стороне вопроса как унификация и стандартизация рассматриваемых аппаратов. Это

в первую очередь затронет разработку однотипных стыковочных узлов с сервисными космическими аппаратами, которые будут способны не только осуществлять заправку

топливом, заменять или добавлять полезную нагрузку на спутнике, но и в простейшем виде поддерживать ориентацию обслуживаемых КА при невозможности их заправки.

Таким образом, в гражданских (и не только) целях возможна:

1. Техническая инспекция КА, в том числе осмотр КА при помощи установленных на СКА видеокamer и предоставление информации о состоянии КА владельцу.

2. Установка на функционирующие КА дополнительной полезной нагрузки.

3. Сборка структуры космических аппаратов в определенную систему, автоматическая сборка крупных конструкций в космосе.

4. Довыведение на целевую орбиту в случае аварии разгонных блоков или спуск с орбиты космического мусора [7].

5. Транспортировка и подъем действующих космических аппаратов с низких круговых орбит на рабочую орбиту.

6. Корректировка положения действующего КА на орбите, у которого полностью израсходован запас рабочего тела.

7. С целью систематизации использования сервисных космических аппаратов можно предложить в схемном виде структуру сервисных операций, фактически изложенную в виде описания в источнике [6] (рис. 9).

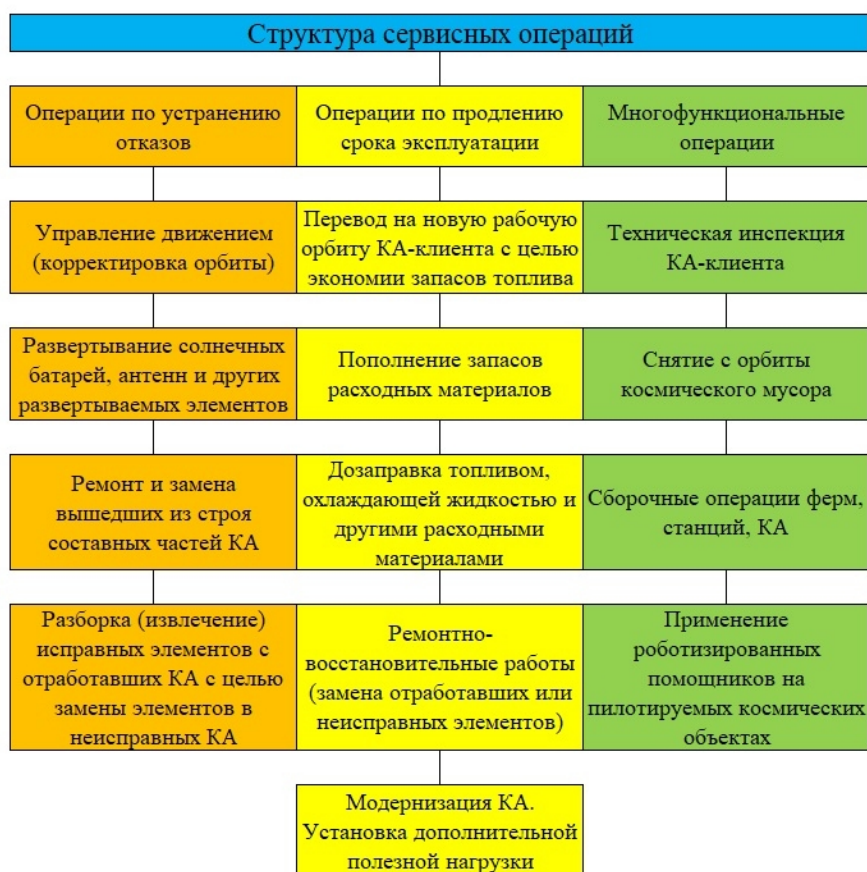


Рис. 9. Структура сервисных операций

В недалекой перспективе по мере развития космической техники с помощью СКА можно будет снимать с орбиты вышедшие из строя, но представляющие ценность КА, проводить чистку геостационарной орбиты (ГСО) от отслуживших КА, изготавливать в космосе многокилометровые каркасы космических станций, фермы антенн, базовые структуры солнечных электростанций, огромные телескопы и т. д., уничтожать опасные для Земли астероиды. Причем принципы и технологию сервисного обслуживания спутников можно использовать не только в космосе, но и на земле [8]. Это касается сельского хозяйства и проведения работ в труднодоступных районах.

Россия по отношению к другим странам также не стоит на месте в этом направлении развития. На настоящее время уже существуют некоторые наработки по приме-

нению СКА, ведется научная работа. Так, например, госкорпорация «Роскосмос» разместила заказ на создание нового спутника-инспектора для обслуживания космических аппаратов, находящихся на геостационарных орбитах. Работа должна быть завершена к 15 ноября 2020 г. Из выполненных работ следует упомянуть, что в июле 2019 года с космодрома Плесецк были выведены на орбиту военные аппараты «Космос-2535», «Космос-2536», которые предназначены для «изучения воздействия на аппараты российской орбитальной группировки искусственных и естественных факторов космического пространства» [9].

25 ноября 2019 г. на орбиту был запущен КА «Космос-2543» для мониторинга состояния отечественных спутников, который, по версии американской стороны, опасно сблизился с американским КА USA-245 [10].

Разведка США считает российские спутники-инспекторы угрозой. По ее мнению, они могут использоваться для нейтрализации космических аппаратов других стран.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Очевидно, что кроме создания СКА и развития спутниковых услуг понадобится также создание инфраструктуры, обеспечивающей их жизнедеятельность. С целью обеспечения взаимодействия всех заинтересованных ведомств структура будет иметь в основном научный и управленческий характер.

Исходя из задач военной направленности, СКА можно будет использовать в военное время не только для указанных выше задач, но и для выполнения других различных функций [11–13].

ЛИТЕРАТУРА

1. Orbital Express // DARPA Fact Sheet. March 2007. URL: http://archive.darpa.mil/orbitalexpress/pdf/oe_fact_sheet_final.pdf (дата обращения 21.01.2020).
2. Foust J. Orbital ATK Signs Intelsat As First Satellite Servicing Customer. — 12.04.2016 // SpaceNews. URL: <http://spacenews.com/orbital-atk-signs-intelsat-as-first-satellite-servicing-customer> (дата обращения 21.01.2020).
3. Van Wagenen J. Effective Space Solutions Secures Letter of Intent for 2018 In-Orbit Servicing Mission — 15.04.2016 // Via Satellite. URL: <http://www.satellitetoday.com/innovation/2016/04/15/effective-space-solutions-secures-letter-of-intent-for-2018-in-orbit-servicing-mission> (дата обращения 21.01.2020).
4. de Selding P. B. SES Ready to Invest in Reusable Rockets, In-Orbit Satellite Servicing. — 08.04.2016 // SpaceNews. URL: <http://spacenews.com/ses-ready-to-invest-in-reusable-rockets-in-orbit-satellite-servicing> (дата обращения 21.01.2020).
5. Caleb H. Intelsat Announces Five-Year In-Orbit Servicing Agreement with Orbital ATK — 13.04.2016 // Via Satellite. URL: <http://satellitetoday.com.technology/2016/04/13/intelsat-announces-five-year-in-orbit-servicing-agreement-with-orbital-atk> (дата обращения 21.01.2020).
6. Белоножко П. П. Космическая робототехника для монтажа и сервиса. Потенциальные задачи, концепции перспективных систем // Воздушно-космическая сфера. 2019. № 2 (99). С. 84–97.
7. Российские специалисты предложили создать спутники для обслуживания космических аппаратов. — 30.01.2017 // Новости ВПК. URL: http://vpk.name/news/173608_rossiiskie_specialisty_predlozhili_sozdad_sputniki_dlya_obslyzhivaniya_kosmicheskikh_apparatorov.html (дата обращения 21.01.2020).
8. Нго Т. К. Концептуальная и графовая модели взаимодействия беспилотного летательного аппарата с наземной робототехнической сервисной платформой // Интеллектуальные технологии на транспорте. 2019. № 3 (19). С. 35–39.
9. Валагин А. Россия создаст новый спутник-инспектор. — 17.09.2019 // Специальный проект «Русское оружие» / Российская газета. URL: <http://rg.ru/2019/09/17/rossiia-sozdat-novuj-sputnik-inspektor.html> (дата обращения 21.01.2020).
10. Анпилогов А. Сверхсекретный российский спутник встревожил американских военных. — 17.02.2020 // Взгляд. URL: <http://vz.ru/society/2020/2/17/1024055.html> (дата обращения 29.02.2020).
11. Ключников В. Ю. Современные проблемы анализа и синтеза космических систем. Тема 3. Техническое обслуживание космических аппаратов на орбите / Ключников В. Ю.; ЦНИИ машиностроения; Московский авиационный ин-т. URL: <http://ppt-online.org/678214> (дата обращения 29.02.2020).
12. Силантьев С., Фоминов И., Королев С. Роботы на орбите // Воздушно-космическая сфера. 2016. № 2 (87). С. 118–123.
13. Пентагон закупит «буксир» для спутников, продлевающие срок их службы. — 02.10.2019 // Военное обозрение. URL: <http://topwar.ru/163122-pentagon-zakupit-buksiry-dlja-sputnikov-prodlevajuschie-srok-ih-sluzhby.html> (дата обращения 29.02.2020).

Prospects for the Development of Satellite Services

V. B. Katkalov

A. F. Mozhaisky Military Space Academy
Saint Petersburg, Russia
vkatkalov@mail.ru

Abstract. The state and prospects of the development of space satellite services are considered. Examples of functioning, the principle of operation and the purpose of service spacecraft are presented. The problems arising in the creation of satellite services are estimated. A list of functioning and planned to launch service spacecraft is given. The main directions of providing and using satellite services to solve targets are shown. Including: extending the life of satellites, refueling spacecraft with fuel, maintaining the orbit and orientation of satellites, automated repairs on board, technical inspection of spacecraft.

Keywords: spacecraft of orbital services, extension of a resource of satellites, filling of the spacecrafts with fuel, maintenance of an orbit and orientation of satellites, the automated repairs onboard spacecrafts, technical inspection of spacecrafts.

REFERENCES

1. Orbital Express, *DARPA Fact Sheet*, March 2007. Available at: http://archive.darpa.mil/orbitalexpress/pdf/oe_fact_sheet_final.pdf (accessed 21 Jan 2020).
2. Foust J. Orbital ATK Signs Intelsat As First Satellite Servicing Customer, *SpaceNews*. Published at 12 April, 2016. Available at: <http://spacenews.com/orbital-atk-signs-intelsat-as-first-satellite-servicing-customer> (accessed 21 Jan 2020).
3. Van Wagenen J. Effective Space Solutions Secures Letter of Intent for 2018 In-Orbit Servicing Mission, *Via Satellite*. Published at 15 April, 2016. Available at: <http://www.satellitetoday.com/innovation/2016/04/15/effective-space-solutions-secures-letter-of-intent-for-2018-in-orbit-servicing-mission> (accessed 21 Jan 2020).
4. de Selding P. B. SES Ready to Invest in Reusable Rockets, In-Orbit Satellite Servicing, *SpaceNews*. Published at 08 April, 2016. Available at: <http://spacenews.com/ses-ready-to-invest-in-reusable-rockets-in-orbit-satellite-servicing> (accessed 21 Jan 2020).
5. Caleb H. Intelsat Announces Five-Year In-Orbit Servicing Agreement with Orbital ATK, *Via Satellite*. Published at 13 April, 2016. URL: <http://satellitetoday.com/technology/2016/04/13/intelsat-announces-five-year-in-orbit-servicing-agreement-with-orbital-atk> (accessed 21 Jan 2020).
6. Belonozhko P. P. Space Robotics for Mounting and Service. Potential Aims, Concepts of Advanced Systems [Kosmicheskaya robototekhnika dlya montazha i servisa. Potentsial'nye zadachi, kontseptsii perspektivnykh sistem], *Aerospace Sphere Journal [Vozdushno-kosmicheskaya sfera]*, 2019, No. 2 (99), Pp. 84–97.
7. Russian experts have proposed the creation of satellites for servicing spacecraft [Rossiyskie spetsialisty predlozhili sozdat' sputniki dlya obsluzhivaniya kosmicheskikh apparatov], *VPK News [Novosti VPK]*. Published at 30 January, 2017. Available at: http://vpk.name/news/173608_rossiiskie-specialisty-predlozhili-sozdat-sputniki-dlya-obsluzhivaniya-kosmicheskikh-apparatov.html (дата обращения 21 Jan 2020).
8. Ngo T. Q. Conceptual and Graph Models of Interaction of Unmanned Aerial Vehicle with Ground Robotic Service Platform [Kontseptual'naya i grafovaya modeli vzaimodeystviya bespilotnogo letatel'nogo apparata s nazemnoy robototekhnicheskoy servisnoy platformoy], *Intellectual Technologies on Transport [Intellektual'nye tekhnologii na transporte]*, 2019, No. 3 (19), Pp. 35–39.
9. Valagin A. Russia Will Create the New Satellite Inspector [Rossiya sozdat novyy sputnik-inspektor], *Russian Newspaper [Rossiyskaya gazeta]*. Published at 17.09.2019. Available at: <http://rg.ru/2019/09/17/rossiia-sozdat-novyy-sputnik-inspektor.html> (accessed 21 Jan 2020).
10. Anpilogov A. The Top-Secret Russian Satellite Disturbed the American Military [Sverkhsekretnyy rossiyskiy sputnik vstrevozhil amerikanskikh voennykh], *Vzglyad newspaper [Vzglyad]*. Published at 17 February, 2020. Available at: <http://rg.ru/2019/09/17/rossiia-sozdat-novyy-sputnik-inspektor.html> (accessed 21 Jan 2020).
11. Klyushnikov V. Yu. Modern Problems of Analysis and Synthesis of Space Systems. Theme 3. Maintenance of Spacecraft in Orbit [Sovremennye problemy analiza i sinteza kosmicheskikh sistem. Tema 3. Tekhnicheskoe obsluzhivanie kosmicheskikh apparatov na orbite]. Available at: <http://ppt-online.org/678214> (accessed 29 Feb 2020).
12. Silantsev S., Fominov I., Korolyov S. Robots in Orbit [Roboty na orbite], *Aerospace Sphere Journal [Vozdushno-kosmicheskaya sfera]*, 2016, No. 2 (87), Pp. 118–123.
13. The Pentagon Will Purchase «Tugs» for Satellites, Extending Their Life [Pentagon zakupit «bucsiry» dlya sputnikov, prodlevayushchie srok ikh sluzhby], *Military Review [Military Review]*. Published at 02 October, 2019. Available at: <http://topwar.ru/163122-pentagon-zakupit-bucsiry-dlja-sputnikov-prodlevajushchie-srok-ih-sluzhby.html> (accessed 29 Feb 2020).

Подход к оцениванию живучести транспортно-логистических систем

А. Н. Павлов

Санкт-Петербургский институт информатики
и автоматизации РАН,
Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского
Санкт-Петербург, Россия
pavlov62@list.ru

Д. А. Павлов, В. Н. Воротягин

Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского
Санкт-Петербург, Россия

Аннотация. Анализ современных методов оценки устойчивости транспортно-логистических систем (ТЛС) при управлении их конфигурацией и реконфигурацией в условиях деструктивных воздействий показал, что при проектировании и создании ТЛС необходимо разработать концептуально новый методологический подход к выявлению сценариев деградации, путей восстановления в ТЛС и провести анализ такого важного свойства ТЛС, как структурная устойчивость их конфигурации. Результаты этого исследования представляют собой полезный инструмент поддержки принятия решений, позволяющий выявлять сценарии нарушения на различных уровнях неприятия риска на основе количественной оценки структурной устойчивости с использованием метода генома и наблюдения за масштабами распространения нарушения. Наши результаты могут быть полезны для лиц, принимающих решения, чтобы сравнить различные структурные конструкции ТЛС относительно надежности и определить сценарии разрушения, которые прерывают операции ТЛС в различной степени.

Ключевые слова: транспортно-логистическая система, графовые модели, структурно-функциональная живучесть.

ВВЕДЕНИЕ

Структурный дизайн ТЛС может измениться из-за сбоев, определяемых как «события, которые прерывают регулярный поток товаров или услуг в системе» [1]. Современные ТЛС выросли в масштабе и сложности, все больше подвергая фирмы различным и рассеянным разрушительным событиям [2, 3]. Создание действительно эффективных ТЛС возможно путем обеспечения их надежности и живучести как в номинальных условиях функционирования, так и при возникновении расчетных и нерасчетных нештатных ситуаций. Живучесть ТЛС стала одной из ключевых категорий исследований за последнее десятилетие [4]. Причем под живучестью понимается свойство системы сохранять и восстанавливать свои характеристики (векторный показатель качества функционирования ТЛС) при воздействиях среды катастрофического характера на производственно-логистический процесс. Для оценивания живучести ТЛС с учетом рисков срывов при возникновении расчетных нештатных ситуаций или «нормальных» условий функционирования, как правило, применяют детерминированный подход, методы теории

надежности и имитационного моделирования [5–16]. Производится имитация производственно-логистических процессов ТЛС. Организуется также имитация отказов элементов, ключевых узлов и связей ТЛС, нарушения которых приводят к потере живучести ТЛС, в зависимости от моделируемого уровня надежности. Для каждого момента времени имитации производится проверка работоспособности функциональных элементов ТЛС. В случае отказа оценивается случайное время вынужденных перерывов в работе того или иного узла ТЛС, значения целевых показателей. Расчет прекращается при отказах элементов ТЛС, при которых невозможно дальнейшее функционирование (возникновение критичных отказов). Такого рода расчеты проводятся для различных уровней надежности расчетных нештатных ситуаций. На каждом уровне производится заданное количество статистических испытаний или такое количество, которое обеспечивает заданную точность моделирования. Рассчитанные значения показателей откладываются на лучевой диаграмме (Кивиата). Для определения показателя живучести ТЛС осуществляется сравнение площади фигуры на диаграмме с площадями фигур, отражающих исходные и предельно допустимые значения целевых показателей. Если хотя бы один из целевых показателей оказывается меньше допустимого значения, то это соответствует потере живучести ТЛС, что требует принятия решения о характере дальнейшего ее функционирования.

Однако проблема указанного подхода состоит в том, что в настоящее время такие зависимости получают лишь по результатам эксплуатации уже созданных ТЛС. При проектировании же новых ТЛС используются результаты статистических обработок предшествовавших или эксплуатирующихся ТЛС. Это допустимо при создании аналогичных по структуре и составу ТЛС. Но если разрабатываемая ТЛС существенно отличается от ранее созданных, то такой подход не всегда приемлем.

Кроме расчетных нештатных ситуаций бывают нерасчетные, то есть такие, каких никто заранее не может предвидеть, а посему и невозможно заранее подготовиться к ним. И что немаловажно, в реальных условиях функционирования эти нерасчетные нештатные ситуации случа-

ются если не чаще, то, по крайней мере, по частоте проявляются соизмеримо с расчетными. В этих условиях модели и методы, применяемые в теории надежности, имитационного моделирования становятся не применимы для обеспечения живучести ТЛС, что требует разработки концептуально нового подхода к обеспечению живучести ТЛС.

ТРАДИЦИОННЫЙ ПОДХОД К ОЦЕНКЕ СТРУКТУРНОЙ ЖИВУЧЕСТИ ТЛС В УСЛОВИЯХ ДЕСТРУКТИВНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ

В рамках исследований, посвященных разработке методологических и методических основ обеспечения живучести ТЛС, требуется проведение анализа такого важного свойства, как структурная живучесть конфигурации ТЛС. В широком смысле под *структурной живучестью* ТЛС понимается такая способность рассматриваемого объекта, которая позволяет ему сохранять в определенных пределах качество своего целевого функционирования (или восстанавливать такую способность) путем изменения (формирования) соответствующих структур (конфигураций).

Смена структурных состояний ТЛС связана как с распространением и восстановлением нарушений функционирования элементов структуры ТЛС, так и в процессе выполнения заказов. Отказавшим (неработоспособным) будем считать функциональный элемент (ФЭ) ТЛС, который не способен выполнить все возложенные на него производственно-технологические операции. ФЭ будет считаться частично работоспособным при возможности выполнения им хотя бы одной из возложенных производственно-технологических операций. Очевидно, что значения частных показателей качества функционирования ТЛС в каждом состоянии зависят от: множества отказавших, работоспособных, частично работоспособных ФЭ; распределения производственно-технологических операций; перераспределения этих операций между работоспособными или частично работоспособными ФЭ.

Важным и неотъемлемым условием изучения возможностей ТЛС является проведение анализа и оценивания архитектуры его структурных состояний, отражающих как функциональные, так и производственно-технологические особенности управления ТЛС.

Структурные модели функционирования большинства сложных технических систем корректно могут описываться [17–20] блок-схемами, деревьями отказов и событий, графами связности, многотерминальными сетями и т.п. Однако данные структурные модели могут описывать функционирование только монотонных систем. В монотонных моделях невозможно учитывать логически сложные и противоречивые связи и отношения между ФЭ, например, которые в одних структурных состояниях системы увеличивают, а в других — уменьшают показатель эффективности ее функционирования. Также монотонные модели не представляют системы, в которых одновременно функционируют элементы, часть из которых обеспечивает увеличение, например, надежности или живучести, а другая часть является причиной возникновения отказов или аварий, т.е. оказывает противоположное, вредное влияние на безопасность системы в целом.

При исследовании живучести ТЛС, структура которой описывается с помощью графовых моделей (монотонная система [21]), считают ТЛС «разрушенной», если в случае удаления вершин или ребер граф она будет удовлетворять одному или нескольким из следующих условий: граф состоит минимум из двух компонент связности; не существует направленных путей для определенных множеств вершин; количество вершин в наибольшей компоненте графа, меньше некоторого заранее заданного числа; кратчайший путь превышает некоторую заданную величину. Соответственно, ТЛС считается живой, если эти условия не выполняются.

Для анализа свойства структурной живучести ТЛС в данных условиях, а также для синтеза системы, обладающей требуемым свойством структурной живучести, необходимо ввести количественную оценку, адекватно отражающую рассматриваемое свойство.

При исследовании структурной живучести ТЛС согласно подходу, предложенного в [21], вводится понятие обобщенного отказа i -ой кратности, при котором рассматриваются структурные состояния ТЛС, образующиеся при последовательном отказе всевозможных сочетаний (C_n^i) из всего множества ФЭ структуры по i различным ФЭ ($i \leq n$, где n — число ФЭ рассматриваемой структуры ТЛС). Среди множества структурных состояний для данного обобщенного отказа определяется множество работоспособных состояний, мощность которого обозначим R_i , или множество неработоспособных состояний, мощность которого обозначим N_i ($N_i + R_i = C_n^i$).

Для сравнения различных структур определяется *относительная функция структурной живучести* ТЛС $\Psi \left(\frac{i}{n} \right) \left(\Psi(i) = G_i = \frac{R_i}{C_n^i} = 1 - \frac{N_i}{C_n^i} \right)$, производится ее линейная интерполяция кусочно-линейной функцией $\tilde{\Psi}(x), x \in [0,1]$ и вводится интегральный показатель структурной живучести ТЛС в виде следующего функционала $F_g = \int_0^1 \tilde{\Psi}(x) dx$.

Будем считать, что ТЛС находится в неработоспособном структурном состоянии, если при обобщенном отказе удалены все элементы, входящие по крайней мере хотя бы в одно из минимальных сечений отказов структуры ТЛС.

В самом общем случае структура ТЛС характеризуется k минимальными сечениями отказов, каждый из которых состоит из $m_j (j = 1, \dots, k)$ элементов. Причем сечения отказов имеют общие элементы.

В данной ситуации число неработоспособных структурных состояний при обобщенном отказе i -ой кратности примет следующий вид [21]:

$$N_i = \sum_{j=1}^k \delta(i - m_j) C_{n-m_j}^{i-m_j} - \sum_{j_1=1}^k \sum_{j_2 > j_1}^k \delta(i - m_{j_1} - m_{j_2} + m_{j_1 j_2}) C_{n-m_{j_1}-m_{j_2}+m_{j_1 j_2}}^{i-m_{j_1}-m_{j_2}+m_{j_1 j_2}} + \sum_{j_1=1}^k \sum_{j_2 > j_1}^k \sum_{j_3 > j_2}^k \delta(i - m_{j_1} - m_{j_2} - m_{j_3} + m_{j_1 j_2 j_3}) C_{n-m_{j_1}-m_{j_2}-m_{j_3}+m_{j_1 j_2 j_3}}^{i-m_{j_1}-m_{j_2}-m_{j_3}+m_{j_1 j_2 j_3}} \dots (-1)^{k-1} \delta(i - m_{j_1} - m_{j_2} - \dots - m_{j_k} + m_{j_1 j_2 \dots j_k}) C_{n-m_{j_1}-m_{j_2}-\dots-m_{j_k}+m_{j_1 j_2 \dots j_k}}^{i-m_{j_1}-m_{j_2}-\dots-m_{j_k}+m_{j_1 j_2 \dots j_k}}, \quad (1)$$

где $\delta(x) = \begin{cases} 1, & x \geq 0 \\ 0, & x < 0 \end{cases}$ — дискретная функция Хэвисайда.

В формуле (1) величины $m_{j_1 j_2 \dots j_k}$ представляют собой суммарное число общих элементов в минимальных сечениях отказов с номерами j_1, j_2, \dots, j_k .

Используя формулы (1), можно вычислить относительную функцию структурной живучести ТЛС, имеющих монотонную структуру, и соответственно определить интегральный показатель структурной живучести системы $F_g = \int_0^1 \tilde{\Psi}(x) dx$.

Для вычисления структурной живучести необходим набор минимальных сечений отказов, а также определение общих ФЭ в этих сечениях. В общем случае, нахождение минимальных сечений отказов является NP-трудной задачей. При этом вычисление показателя структурной живучести с использованием обобщенной формулы (1) является суперсложной комбинаторной задачей. При этом следует отметить, что не все монотонные структуры могут быть описаны с использованием графовых моделей.

КОНЦЕПЦИЯ ГЕНОМА ДЛЯ ОЦЕНКИ СТРУКТУРНО-ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ ЖИВУЧЕСТИ ТЛС В УСЛОВИЯХ ДЕСТРУКТИВНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ

Для преодоления указанных особенностей оценивания структурной живучести ТЛС предлагается следующий подход, в основе которого лежит концепция генома структуры [18]. Как правило, структурный анализ функционирования сложного объекта начинается с построения его схемы функциональной целостности (СФЦ) [18]. СФЦ представляет собой логически универсальное графическое средство структурного представления исследуемых свойств системных объектов. СФЦ позволяют корректно представлять как все традиционные виды структурных схем (блок-схемы, деревья отказов, деревья событий, графы связности с циклами), так и принципиально новый класс немонотонных (некогерентных) структурных моделей различных свойств исследуемых систем. Разработка СФЦ ТЛС означает, прежде всего, графическое представление логических условий реализации собственных функций элементами и подсистемами ТЛС. Второй важной стороной построения и дальнейшего использования СФЦ является указание конкретной цели моделирования — логических условий реализации исследуемого системного свойства, например, безотказности или отказа ТЛС и т. п.

Известно, что геном структуры $\chi = (\chi_0, \chi_1, \chi_2, \dots, \chi_n)$ [21], являющийся концентрированным представлением структурного состояния объекта, содержит и позволяет определить следующую информацию в процессе структурного исследования сложных объектов: во-первых, сведения о топологических свойствах структуры монотонной системы; во-вторых, информацию о принадлежности исследуемого объекта к классу монотонных или немонотонных систем; в-третьих, провести оценивание показателей структурно-функциональной живучести системы.

Для формального описания и анализа процесса деградации (восстановления) ТЛС в качестве факторов, с помощью которых можно изменять структуру бортовых систем малых космических аппаратов (БС МКА), будем рассматривать операцию удаления (восстановления) критичных элементов $\{P_{j_1}, P_{j_2}, \dots, P_{j_N}\} = \tilde{P}$ из схемы функциональной целостности. В общем случае в качестве критичных элементов могут рассматриваться все ФЭ ТЛС.

В процессе удаления (восстановления) элементов структура ТЛС может находиться в одном из своих промежуточных состояний S_α .

Согласно концепции генома структуры структурные состояния S_α (начальное, финальное, промежуточные) характеризуются своими геномами $\vec{\chi}_\alpha$ (под $\vec{\chi}_\alpha$ при данном изложении материала будем понимать двойственный аналог генома), при этом показатели структурно-функциональной живучести ТЛС, состоящую из однородных, неоднородных ФЭ по надежности выполнения своих функций, можно вычислять по следующим формулам [21]:

$$F_{однор}(\vec{\chi}_\alpha) = \vec{\chi}_\alpha \cdot (1, \frac{1}{2}, \frac{1}{3}, \dots, \frac{1}{n+1})^T,$$

$$F_{неоднор}(\vec{\chi}_\alpha) = \vec{\chi}_\alpha \cdot (1, \frac{1}{2}, \frac{1}{2^2}, \dots, \frac{1}{2^n})^T, \quad (2)$$

$$F_{однорвозм}(\vec{\chi}_\alpha) = \sup_{\mu \in [0,1]} \min\{\vec{\chi}_\alpha \cdot (1, \mu, \mu^2, \dots, \mu^n)^T, g(\mu)\}.$$

Будем считать, что структурное состояние S_α , характеризующееся геномом $\vec{\chi}_\alpha$, непосредственно связано со структурным состоянием S , описываемого геномом $\vec{\chi}$, если существует ФЭ ($\exists P_j \in \tilde{P}$), отказ (восстановление) которого ($P_j = 0$ или $P_j = 1$) переводит систему из состояния S в состояние S_α (из состояния S_α в состояние S).

Данную вариацию структурного состояния ТЛС обозначим следующим образом: $\vec{\chi} \xrightarrow{P_j} \vec{\chi}_\alpha$. Множество всех структурных состояний, непосредственно связанных с состоянием $\vec{\chi}$, обозначим $X(\vec{\chi})$.

Одну из возможных траекторий реконфигурации структуры ТЛС в процессе возникновения отказов (восстановления) можно описать следующей цепочкой переходов:

$$\vec{\chi}_{\alpha_0} \xleftarrow{P_{j_1}} \vec{\chi}_{\alpha_1} \xleftarrow{P_{j_2}} \vec{\chi}_{\alpha_2} \xleftarrow{P_{j_3}} \dots \xleftarrow{P_{j_{N-1}}} \vec{\chi}_{\alpha_{N-1}} \xleftarrow{P_{j_N}} \vec{\chi}_{\alpha_N},$$

где $\vec{\chi}_{\alpha_0} = \vec{\chi}_0, \vec{\chi}_{\alpha_N} = \vec{\chi}_f$, множество $\{P_{j_1}, P_{j_2}, \dots, P_{j_N}\} = \tilde{P}$, т. е. множество отказавших (восстановленных) ФЭ ТЛС в цепочке перехода является перестановкой элементов множества \tilde{P} .

Структурные изменения, происходящие в промежуточном состоянии $\vec{\chi}_\alpha$ на траектории реконфигурации, будем оценивать одним из показателей структурно-функциональной живучести ТЛС (2), входящим в рассматриваемое множество

$$F_{над}(\vec{\chi}_\alpha) \in \{F_{однор}(\vec{\chi}_\alpha), F_{неоднор}(\vec{\chi}_\alpha), F_{однорвозм}(\vec{\chi}_\alpha)\}.$$

Кроме того, в каждом промежуточном структурном состоянии $\vec{\chi}_\alpha$ ТЛС характеризуется некоторым набором структурно-топологических ограничений

$$\Psi_l(\vec{\chi}_\alpha) \leq 0, \quad l = 1, 2, \dots, L,$$

формально заданных и количественно оцениваемых с помощью [21] соответствующих показателей структурной живучести, гибкости, достижимости, сложности структурного построения и т. д. Другими словами, данные ограничения задают область допустимых вариаций, которую в дальнейшем будем обозначать Ξ .

Тогда задачу построения оптимистического (пессимистического) сценария реконфигурации ТЛС можно представить в виде следующих оптимизационных задач (3).

$$\sum_{j=0}^N F_{nad}(\vec{\chi}_{\alpha_j}) \rightarrow \max(\min) \quad (3)$$

$$\begin{aligned} & \vec{\chi}_{\alpha_j} \in X(\vec{\chi}_{\alpha_{j-1}}) \\ & \vec{\chi}_{\alpha_0} = \vec{\chi}_0, \vec{\chi}_{\alpha_N} = \vec{\chi}_f, \\ & \Psi_l(\vec{\chi}_{\alpha_j}) \leq 0, l=1,2,\dots,L \\ & \{P_{j_1}, P_{j_2}, \dots, P_{j_N}\} = \vec{P} \end{aligned}$$

В работе [13] обоснован комбинированный метод случайного направленного поиска вариантов решения поставленной задачи и разработан алгоритм, реализующий приведенный метод. Комбинированный метод и соответствующий ему алгоритм позволяет осуществлять поиск как оптимистической и пессимистической траекторий, так и промежуточных траекторий, выбираемых случайным образом.

Тогда в качестве обобщенного показателя структурно-функциональной живучести ТЛС в процессе его структурной реконфигурации по сценарию $\mu_c^{(k)}$ можно предложить отношение $J^k = \frac{S_0^k}{S^k}$.

Здесь

$$S_0^k = \sum_{j=0}^{N-1} \frac{F_{nad}(\vec{\chi}_{\alpha_j}^{(k)}) + F_{nad}(\vec{\chi}_{\alpha_{j+1}}^{(k)})}{2}$$

равна суммарной структурно-функциональной живучести функционирования ТЛС в процессе реконфигурации в рамках сценария $\mu_c^{(k)}$, а $S^k = \max_{j=0,1,\dots,N} \{F_{nad}(\vec{\chi}_{\alpha_j}^{(k)})\} \cdot N$ пропорциональна суммарному показателю структурно-функциональной живучести функционирования ТЛС вдоль траектории в случае сохранения возможной максимальной живучести функционирования при развитии рассматриваемого сценария.

Следует отметить, что максимальное значение *обобщенного показателя структурно-функциональной живучести* $J^{max} = \max_k \{J^k\}$ будет достигаться на оптимистическом сценарии реконфигурации ТЛС, а минимальное значение $J^{min} = \min_k \{J^k\}$ — на пессимистическом. Проведем M имитационных экспериментов. На каждом k -ом эксперименте строится последовательность

$$\mu_c^{(k)} = [\vec{\chi}_{\alpha_0}, \vec{\chi}_{\alpha_1}^{(k)}, \vec{\chi}_{\alpha_2}^{(k)}, \dots, \vec{\chi}_{\alpha_{N-1}}^{(k)}, \vec{\chi}_{\alpha_N}],$$

где $\vec{\chi}_{\alpha_0} = \vec{\chi}_0, \vec{\chi}_{\alpha_N} = \vec{\chi}_f$, соответствующая траектории реконфигурации ТЛС. Для построенной траектории вычисляется значение обобщенного показателя структурно-функциональной живучести $J^k = \frac{S_0^k}{S^k}$. Далее находим среднее значение структурной живучести всех испытаний $J^0 = \frac{1}{M} \sum_{k=1}^M J^k$. Тогда можно утверждать, что реальные значения *обобщенного показателя структурно-функциональной живучести* ТЛС J_{SG} лежат в интервале $[J^{min}, J^{max}]$ и наиболее ожидаемое значение равно J^0 . При этом прогнозные значения показателя J_{SG} можно задавать нечетким треугольным числом (a, α, β) , где $a = J^0, \alpha = J^0 - J^{min}, \beta = J^{max} - J^0$.

Кроме того, вычисление значений показателя структурно-функциональной живучести

$$F_{nad}(\vec{\chi}_\alpha) \in \{F_{однор}(\vec{\chi}_\alpha), F_{неоднор}(\vec{\chi}_\alpha), F_{однорвозм}(\vec{\chi}_\alpha)\}$$

может осуществляться из предположения, что структура ТЛС состоит только из однородных по надежности выполнения своих функций элементов, только из неоднородных по надежности выполнения своих функций элементов, и, наконец, имеются возможные отказы выполнения своих функций элементов. Для каждого из этих трех случаев, произведя расчет значений показателя J_{SG} , получим соответственно три нечетких треугольных результата: $(a^o, \alpha^o, \beta^o), (a^n, \alpha^n, \beta^n), (a^b, \alpha^b, \beta^b)$. Тогда в качестве значения *обобщенного показателя структурно-функциональной живучести ТЛС* J_{SG} будем полагать среднюю величину полученных результатов

$$J_{SG} = \frac{(a^o, \alpha^o, \beta^o) + (a^n, \alpha^n, \beta^n) + (a^b, \alpha^b, \beta^b)}{3}$$

Таким образом, задача вычисления значения *обобщенного показателя структурно-функциональной живучести* ТЛС свелась к анализу оптимистического, пессимистического или случайных (произвольных) траекторий структурно-функциональной реконфигурации объекта, вызванных отказами (восстановлением) ФЭ ТЛС.

Следует отметить, что отказ (восстановление) того или иного элемента приводит к отказу (восстановлению) логически с ним связанных остальных ФЭ ТЛС. Поэтому кроме введенного *обобщенного показателя структурно-функциональной живучести* ТЛС J_{SG} можно ввести *абсолютный показатель структурно-функциональной живучести* ТЛС. Каждая траектория реконфигурации структуры ТЛС характеризуется количеством уровней деградации J_D , последний из которых соответствует переводу ТЛС в неработоспособное состояние. Так, для пессимистической траектории количество уровней минимально и равно J_D^{min} , для оптимистической траектории оно максимально — J_D^{max} . Значения абсолютного показателя структурно-функциональной живучести ТЛС J_{AG} будут лежать в интервале $[J_D^{min}, J_D^{max}]$, а также можно вычислить наиболее ожидаемое значение равно J_D^0 . При этом значения показателя J_{AG} аналогично, как и J_{SG} , можно задавать нечетким треугольным числом (a_A, α_A, β_A) , где $a_A = J_D^0, \alpha_A = J_D^0 - J_D^{min}, \beta_A = J_D^{max} - J_D^0$.

ЧИСЛЕННЫЙ ПРИМЕР

Объясним основные элементы предлагаемого метода на примере. Рассмотрим пример ТЛС, приведенный на рисунке 1.

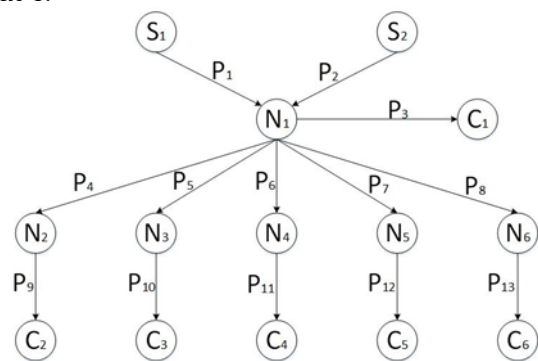


Рис. 1. Структура ТЛС

Структура ТЛС содержит четырнадцать узлов и тринадцать дуг — элементов ТЛС. Узлы S1 и S2 являются ис-

точниками, т. е. поставщиками продукции. Узел N_1 — главный склад, который получает продукцию от поставщиков. Узлы N_2-N_6 — региональные склады, которые получают продукцию от основного склада. Узел C_1 — региональные клиенты, который обслуживается основным складом. Узлы C_2-C_6 — региональные клиенты, которые обслуживаются региональными складами. P_1-P_{13} — вероятности безотказной поставки продукции по соответствующим дугам.

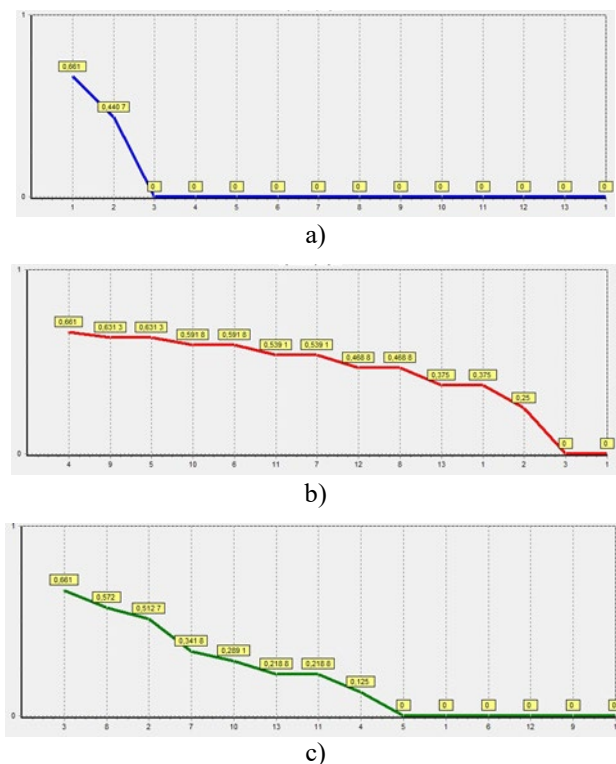


Рис. 2. Сценарии деградации структуры ТЛС:

а) пессимистический сценарий, б) оптимистический сценарий, в) произвольный сценарий

На рисунке 2 показаны сценарии деградации структуры. Получаемые структурные состояния, в которых нарушены операции (ребра) в ТЛС из рисунка 1 описываются индексами по шкале абсцисс. Переходы состояний обусловлены их нарушением. Таким образом, полная живучесть или полный отказ пути в динамике структуры ТЛС могут быть вычислены с помощью уравнения (2). Так, на рисунке 2 показаны различные уровни деградации. Первый уровень деградации отражает состояния с отказом в одном элементе, который не приводит к отказу каких-либо других элементов ТЛС. Преимущество использования расчета живучести методом генома состоит в том, что это позволяет идентифицировать как сценарий деградации, так и соответствующий путь волнового эффекта. Таким образом, результаты этого структурного анализа могут быть использованы в дальнейшем для оптимизации путей реконфигурации сети с учетом эксплуатационных параметров ТЛС, таких как мощности, интенсивность обработки и хранение запасов. Однако даже при структурном анализе без параметрической оптимизации предложенный метод позволяет выявить критические элементы ТЛС, нарушение которых привело бы к отказу поставок.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Целью данного исследования было установить явную взаимосвязь между распознаванием сценария прерывания и оптимизацией путей реконфигурации ТЛС — отличительный и существенный вклад, внесенный нашим исследованием. Наше исследование явно включает в себя неприятие риска лицами, принимающими решения, как в обнаружении сценария нарушения, так и в оптимизации пути реконфигурации. Такое сочетание является уникальным в литературе и имитирует сложность бизнес-реальности, позволяя более реалистично применять проектирование ТЛС и планирование источников. Отличительной особенностью и новизной предлагаемого подхода является то, что на единой методологической основе (оригинальная концепция генома структурного построения структурно сложных объектов) можно проводить исследование структурно-функциональных свойств и осуществлять оперативный расчет интервальных, оптимистических и пессимистических оценок показателей структурной жизнеспособности как монотонных, немонотонных, так и однородных, гетерогенных структур. Предложенные показатели функциональной структурной устойчивости, в случае предсказуемых и особенно непредсказуемых сбоев, позволят проанализировать и оценить устойчивость конкретной конфигурации ТЛС.

ЛИТЕРАТУРА

- Blackhurst J., Dunn K. S., Craighead C. W. An Empirically Derived Framework of Global Supply Resiliency // *Journal of Business Logistics*. 2011. Vol. 32, Is. 4. Pp. 374–391. DOI: 10.1111/j.0000-0000.2011.01032.x.
- Dubey R., Ganasekaran A., Childe S. J., Fosso Wamba S., Roubaud D., Foropon C. Empirical Investigation of Data Analytics Capability and Organizational Flexibility as Complements to Supply Chain Resilience // *International Journal of Production Research*. 2019. Published online at 27 Feb 2019. DOI: 10.1080/00207543.2019.1582820.
- Hosseini S., Barker K. A Bayesian Network Model for Resilience-Based Supplier Selection // *International Journal of Production Economics*. 2016. Vol. 180. Pp. 68–87. DOI: 10.1016/j.ijpe.2016.07.007.
- Gunasekaran A., Subramanian N., Rahman S. Supply Chain Resilience: Role of Complexities and Strategies // *International Journal of Production Research*. 2015. Vol. 53, Is. 22. Pp. 6809–6819. DOI: 10.1080/00207543.2015.1093667.
- Colbourn C. J. *The Combinatorics of Network Reliability* (International Series of Monographs on Computer Science, Book 4). — New York: Oxford University Press, 1987. — 160 p.
- Das K., Lashkari R. S. Risk Readiness and Resiliency Planning for a Supply Chain // *International Journal of Production Research*. 2015. Vol. 53, Is. 22. Pp. 6752–6771. DOI: 10.1080/00207543.2015.1057624.
- Ivanov D., Sokolov B. Control and System-Theoretic Identification of The Supply Chain Dynamics Domain for Planning, Analysis and Adaptation of Performance Under Uncertainty // *European Journal of Operational Research*. 2013. Vol. 224, Is. 2. Pp. 313–323. DOI: 10.1016/j.ejor.2012.08.021.
- Ivanov D., Sokolov B., Pavlov A. Dual Problem Formulation and its Application to Optimal Redesign of an Integrated Production–Distribution Network with Structure Dynamics and Ripple Effect Considerations // *International Journal of*

Production Research. 2013. Vol. 51, Is. 18. Pp. 5386–5403. DOI: 10.1080/00207543.2013.774503.

9. Fox M. S., Barbuceanu M., Teigen R. Agent-Oriented Supply Chain Management // International Journal of Flexible Manufacturing Systems. 2000. No. 12. Pp. 165–188. DOI: 10.1023/A:1008195614074.

10. Rabelo R. J., Pereira-Klen A. A., Klen E. A Multi-Agent System for Smart Coordination of Dynamic Supply Chains // Collaborative Business Ecosystems and Virtual Enterprises: Proceedings of the IFIP TC5 / WG5.5 Third Working Conference on Infrastructures for Virtual Enterprises (PRO-VE'02), 1–3 May, 2002, Sesimbra, Portugal. Pp. 379–386. DOI: 10.1007/978-0-387-35585-6.

11. Ivanov D., Pavlov A., Sokolov B. Exact and Heuristic Methods for Integrated Supply Chain Design Reliability Analysis // International Journal of Integrated Supply Management (IJISM). 2016. Vol. 10, No. 2. Pp. 206–224. DOI: 10.1504/IJISM.2016.077075.

12. Kim Y., Chen Y.-S., Linderman K. Supply Network Disruption and Resilience: A Network Structural Perspective // Journal of Operations Management. 2015. No. 33–34, Pp. 43–59. DOI: 10.1016/j.jom.2014.10.006.

13. Munoz A., Dunbar M. On the Quantification of Operational Supply Chain Resilience // International Journal of Production Research. 2015. Vol. 53, Is. 22. Pp. 6736–6751. DOI: 10.1080/00207543.2015.1057296.

14. Simchi-Levi D., Schmidt W., Wei Y. From Superstorms to Factory Fires: Managing Unpredictable Supply-Chain Disruptions // Harvard Business Review. 2014. Vol. 92, No. 1–2. Pp. 96–102.

15. Snyder L.V., Zümbül A., Peng P., Rong Y., Schmitt A. J., Sinoysal B. OR/MS Models for Supply Chain Disruptions: A Review // IIE Transactions. 2016. Vol. 48, Is. 2. Pp. 89–109. DOI: 10.2139/ssrn.1689882.

16. Xu M., Wang X., Zhao L. Predicted Supply Chain Resilience Based on Structural Evolution Against Random Supply Disruptions // International Journal of Systems Science: Operations & Logistics. 2014. Vol. 1, Is. 2. Pp. 105–117. DOI: 10.1080/23302674.2014.934748.

17. Ivanov D., Pavlov A., Dolgui A., Pavlov D., Sokolov B. Disruption-Driven Supply Chain (Re)-planning and Performance Impact Assessment with Consideration of Pro-Active and Recovery Policies // Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review. 2016. Vol. 90. Pp. 7–24. DOI: 10.1016/j.tre.2015.12.007.

18. Копытов Е. А., Павлов А., Зелентсов В. New Methods of Calculating the Genome of Structure and the Failure Criticality of the Complex Objects' Elements // Transport and Telecommunication. 2010. Vol. 11, No. 4. Pp. 4–13.

19. Применение общего логико-вероятностного метода для анализа технических, военных организационно-функциональных систем и вооруженного противоборства: Монография / В. И. Поленин, И. А. Рябинин, С. К. Свирин, И. А. Гладкова; под ред. А. С. Можаяева. — СПб.: Санкт-Петербургское региональное отделение РАЕН, 2011. — 416 с.

20. Системный анализ организационно-технических систем космического назначения: Учебник / Е. Н. Алешин, С. В. Зиновьев, Е. В. Копкин, С. А. Осипенко, А. Н. Павлов, Б. В. Соколов; под общ. ред. А. Н. Павлова. — СПб.: ВКА имени А. Ф. Можайского, 2018. — 370 с.

21. Pavlov A., Ivanov D., Dolgui A., Sokolov B. Hybrid Fuzzy-Probabilistic Approach to Supply Chain Resilience Assessment // IEEE Transactions on Engineering Management. 2018. Vol. 65, Is. 2. Pp. 303–315. DOI: 10.1109/TEM.2017.2773574.

The Approach to the Assessment of Resilience of Transport and Logistics Systems

A. N. Pavlov

St. Petersburg Institute for Informatics and Automation
of the Russian Academy of Sciences,
A. F. Mozhaisky Military Space Academy
Saint Petersburg, Russia
pavlov62@list.ru

D. A. Pavlov, V. N. Vorotyagin

A. F. Mozhaisky Military Space Academy
Saint Petersburg, Russia

Abstract. Analysis of modern methods of evaluation of resilience of transport and logistics systems (TLS) in the management of their configuration and reconfiguration under conditions of destructive effects has shown that in the design and creation of TLS it is necessary to develop conceptually new methodological approach to the detection of disruption scenarios, recovery paths in TLS and carry out analysis of such important property of TLS as structural resilience of their configuration. The outcomes of this research constitute a useful decision-making support tool that allows detecting disruption scenarios at different risk-aversion levels based on the quantification of the structural robustness with the use of the genome method and observing the scope of disruption propagation. Our results can be of value for decision-makers to compare different TLS structural designs regarding the robustness and to identify disruption scenarios that interrupt the TLS operations to different extents.

Keywords: transport and logistics systems, graph models, structural and functional survivability.

REFERENCES

1. Blackhurst J., Dunn K. S., Craighead C. W. An Empirically Derived Framework of Global Supply Resiliency, *Journal of Business Logistics*, 2011, Vol. 32, Is. 4, Pp. 374–391. DOI: 10.1111/j.0000-0000.2011.01032.x.
2. Dubey R., Gunasekaran A., Childe S. J., Fosso Wamba S., Roubaud D., Foropon C. Empirical Investigation of Data Analytics Capability and Organizational Flexibility as Complements to Supply Chain Resilience, *International Journal of Production Research*, 2019. Published online at 27 Feb 2019. DOI: 10.1080/00207543.2019.1582820.
3. Hosseini S., Barker K. A Bayesian Network Model for Resilience-Based Supplier Selection, *International Journal of Production Economics*, 2016, Vol. 180, Pp. 68–87. DOI: 10.1016/j.ijpe.2016.07.007.
4. Gunasekaran A., Subramanian N., Rahman S. Supply Chain Resilience: Role of Complexities and Strategies, *International Journal of Production Research*, 2015, Vol. 53, Is. 22, Pp. 6809–6819. DOI: 10.1080/00207543.2015.1093667.
5. Colbourn C. J. The Combinatorics of Network Reliability (International Series of Monographs on Computer Science, Book 4), New York, Oxford University Press, 1987, 160 p.
6. Das K., Lashkari R. S. Risk Readiness and Resiliency Planning for a Supply Chain, *International Journal of Production Research*, 2015, Vol. 53, Is. 22, Pp. 6752–6771. DOI: 10.1080/00207543.2015.1057624.
7. Ivanov D., Sokolov B. Control and System-Theoretic Identification of The Supply Chain Dynamics Domain for Planning, Analysis and Adaptation of Performance Under Uncertainty, *European Journal of Operational Research*, 2013, Vol. 224, Is. 2, Pp. 313–323. DOI: 10.1016/j.ejor.2012.08.021.
8. Ivanov D., Sokolov B., Pavlov A. Dual Problem Formulation and its Application to Optimal Redesign of an Integrated Production–Distribution Network with Structure Dynamics and Ripple Effect Considerations, *International Journal of Production Research*, 2013, Vol. 51, Is. 18, Pp. 5386–5403. DOI: 10.1080/00207543.2013.774503.
9. Fox M. S., Barbuceanu M., Teigen R. Agent-Oriented Supply Chain Management, *International Journal of Flexible Manufacturing Systems*, 2000, No. 12, Pp.165–188. DOI: 10.1023/A:1008195614074.
10. Rabelo R. J., Pereira-Klen A. A., Klen E. A Multi-Agent System for Smart Coordination of Dynamic Supply Chains, *In: Collaborative Business Ecosystems and Virtual Enterprises: Proc. of the IFIP TC5 / WG5.5 Third Working Conference on Infrastructures for Virtual Enterprises (PRO-VE'02), 1–3 May, 2002, Sesimbra, Portugal*, Pp. 379–386. DOI: 10.1007/978-0-387-35585-6.
11. Ivanov D., Pavlov A., Sokolov B. Exact and Heuristic Methods for Integrated Supply Chain Design Reliability Analysis, *International Journal of Integrated Supply Management (IJISM)*, 2016, Vol. 10, No. 2, Pp. 206–224. DOI: 10.1504/IJISM.2016.077075.
12. Kim Y., Chen Y.-S., Linderman K. Supply Network Disruption and Resilience: A Network Structural Perspective, *Journal of Operations Management*, 2015, No. 33–34, Pp. 43–59. DOI: 10.1016/j.jom.2014.10.006.
13. Munoz A., Dunbar M. On the Quantification of Operational Supply Chain Resilience, *International Journal of Production Research*, 2015, Vol. 53, Is. 22, Pp. 6736–6751. DOI: 10.1080/00207543.2015.1057296.
14. Simchi-Levi D., Schmidt W., Wei Y. From Superstorms to Factory Fires: Managing Unpredictable Supply-Chain Disruptions, *Harvard Business Review*, 2014, Vol. 92, No. 1–2, Pp. 96–102.

15. Snyder L.V., Zümbül A., Peng P., Rong Y., Schmitt A. J., Sinsosal B. OR/MS Models for Supply Chain Disruptions: A Review, *IIE Transactions*, 2016, Vol. 48, Is. 2, Pp. 89–109. DOI: 10.2139/ssrn.1689882.

16. Xu M., Wang X., Zhao L. Predicted Supply Chain Resilience Based on Structural Evolution Against Random Supply Disruptions, *International Journal of Systems Science: Operations & Logistics*, 2014, Vol. 1, Is. 2, Pp. 105–117. DOI:10.1080/23302674.2014.934748.

17. Ivanov D., Pavlov A., Dolgui A., Pavlov D., Sokolov B. Disruption-Driven Supply Chain (Re)-planning and Performance Impact Assessment with Consideration of Pro-Active and Recovery Policies, *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 2016, Vol. 90, Pp. 7–24. DOI: 10.1016/j.tre.2015.12.007.

18. Kopytov E. A., Pavlov A., Zelentsov V. New Methods of Calculating the Genome of Structure and the Failure Criticality of the Complex Objects' Elements, *Transport and Telecommunication*, 2010, Vol. 11, No. 4, Pp. 4–13.

19. Polenin V. I., Ryabinin I. A., Svirin S. K., Gladkova I. A. The use of a common logical and probabilistic method for the analysis of technical, military organizational and functional systems and armed confrontation: Monograph [Primenenie obshchego logiko-veroyatnostnogo metoda dlya analiza tekhnicheskikh, voennykh organizatsionno-funktsional'nykh sistem i vooruzhennogo protivoborstva: Monografiya], Saint Petersburg, Russian Academy of Natural Science, 2011, 416 p.

20. Aleshin E. N., Zinoviev S. V., Pavlov A. N., et al. System analysis of organizational and technical systems for space purposes: Textbook [Sistemnyy analiz organizatsionno-tekhnicheskikh sistem kosmicheskogo naznacheniya: Uchebnik], Saint Petersburg, A. F. Mozhaisky Military Space Academy, 2018, 370 p.

21. Pavlov A., Ivanov D., Dolgui A., Sokolov B. Hybrid Fuzzy-Probabilistic Approach to Supply Chain Resilience Assessment, *IEEE Transactions on Engineering Management*, 2018, Vol. 65, Is. 2, Pp. 303–315. DOI: 10.1109/TEM.2017.2773574.

Метод определения информационной близости на основе спектрального преобразования текстовых документов

М. А. Бутакова, А. В. Чернов, Г. С. Мизиуков
Ростовский государственный университет путей сообщения
Ростов-на-Дону, Россия
butakova@rgups.ru, avcher@rgups.ru, mgs_cmko@rgups.ru

Аннотация. Процесс выявления ключевой информации в неструктурированных наборах текстовой информации является сложным и многоаспектным. В связи с этим активно развиваются различные методы и технологии, способные улучшить процесс анализа и сократить разрыв между качеством полученных результатов и вычислительными ресурсами, необходимыми для анализа. В данной статье приведен пример альтернативного метода определения информационной близости в больших массивах текстовой информации. Отличительной особенностью данного метода является применение спектрального преобразования информации и средств дескрипционной логики для логического вывода результатов анализа массива текстовых документов. Рассмотрены основные составляющие метода, а также условия и утверждения логического вывода результатов анализа. Приведен анализ полученных результатов по итогам апробации метода. Полученные результаты наглядно демонстрируют возможность применения метода для задач семантической классификации в информационных системах принятия решений.

Ключевые слова: неструктурированные данные, семантическая классификация, информационная близость, спектральное преобразование, дескрипционная логика.

ВВЕДЕНИЕ

В условиях современной тенденции, связанной с цифровизацией различных аспектов предметных областей знания, происходит накопление больших массивов информации различной структуры. Преобладающим типом в данных массивах является неструктурированная информация, представленная в виде множества мультимедийных и текстовых файлов различных форматов и языковой принадлежности. Для анализа таких типов информации применяют технологии интеллектуального анализа [1, 2]. Интеллектуальный анализ представляет собой комплекс междисциплинарных связей, посредством которых осуществляется построение базовой модели, на основе которой в дальнейшем производится применение различных методов. Наиболее часто применяемыми являются методы классификации, прогнозирования, кластеризации, ассоциации и моделирования временных рядов. Однако немаловажной задачей в рамках интеллектуального анализа текстовых данных считается задача семантического анализа [3]. Несмотря на то, что существуют различные решения и

подходы в области семантического анализа текстовой информации, не все они способны в полной мере обеспечить качественный процесс анализа, так как существует ряд проблем, в первую очередь связанных с выявлением семантических связей между анализируемыми объектами. Стоит также отметить и отличительную особенность неструктурированной информации от структурированной или слабоструктурированной, которая заключается в том, что данный тип информации не имеет структуры, описывающей хранимые данные, а также для нее характерен антропогенный характер. Такое обилие разнородной информации приводит к тому, что необходимо применять комбинации из нескольких различных методов для достижения требуемого результата. Поэтому в данной статье предлагается метод определения информационной близости в больших массивах текстовой информации, отличительной особенностью которого является применение спектрального преобразования информации и средств дескрипционной логики для логического вывода результата анализа массива текстовых документов с целью классификации возникающих ситуаций и выявления избыточности в больших массивах текстовой информации. Статья устроена следующим образом. Раздел 2 включает информацию об имеющихся на текущий момент времени научных исследованиях в выбранной области. В разделе 3 содержится описание предлагаемого метода. Рассматриваются основные переменные метода, функции, а также условия и утверждения, на которых базируется логический вывод результатов. Раздел 4 содержит описание результатов апробации метода. Раздел 5 описывает дальнейшее научное применение метода. Раздел 6 завершает статью.

ПРЕДШЕСТВУЮЩИЕ РАБОТЫ

Тема определения информационной близости в больших массивах неструктурированной текстовой информации, в частности подхода к семантической классификации [4, 5], представляет особый интерес для научных исследований. На текущий момент существует большое количество различных методов и технологий, применяемых для анализа текстовой информации. Среди методов можно выделить метод извлечения знаний из информации, методы поиска информации в связанных текстах, кластериза-

ции, классификации и суммаризации [6]. Из технологий наиболее перспективной и активно развивающейся является технология Big Data [7, 8]. Однако, несмотря на постоянное развитие данных подходов, существуют и трудности, которые в той или иной мере препятствуют качественному анализу текстовой информации. В статье [9] автор рассматривает некоторые из наиболее часто возникающих трудностей при анализе текстовой информации. Особое внимание хотелось бы уделить методам классификации и определения информационной близости между текстовыми документами. Наиболее интересные подходы для решения задач в данной области изложены в статьях [10, 11]. В статье [10] авторы предлагают подход, основанный на расчете семантического сходства коротких текстов на основе построенной языковой сети и семантики слов. В [11] авторы предлагают для определения информационной близости и классификации текстов группу вспомогательных методов, которые осуществляют дополнение сформированной семантической модели структурной информацией для классификации. В следующих разделах предлагается альтернативный подход для определения информационной близости и семантической классификации текстов на основе спектрального преобразования информации и логического вывода средствами дескрипционной логики.

НАЗНАЧЕНИЕ МЕТОДА

Процесс определения информационной близости между анализируемыми объектами в больших массивах текстовой информации предполагает выявление схожих точек пересечения, на основе которых можно сделать предположение об информационной близости двух объектов. Однако данный процесс также определяет и уникальные свойства объектов анализа, которые выступают ограждающим условием и не позволяют по первичным признакам отнести объекты анализа к одной категории, тем самым делая процесс определения информационной близости более качественным и эффективным. Таким образом, при проектировании метода ставились следующие задачи:

1. Выявить общие и уникальные свойства объектов анализа. В данном случае это определение общих и уникальных лексических единиц в текстовом информационном потоке в процессе анализа.
2. Сформировать структуру представления выявленных лексических единиц.
3. Определить информационную близость между объектами анализа при условии, что структуры выявленных лексических единиц могут быть одинаковыми, но при этом объекты анализа относятся к разным категориям; структуры могут быть разными, но объекты относятся к одной категории.

Для решения вышеизложенных задач предлагается метод определения информационной близости в текстовых массивах информации, который базируется на методах спектрального представления информации [12, 13] и методах логического вывода средствами дескрипционной логики [14]. Применение спектрального подхода к представлению текстовой информации обуславливается высокой эффективностью процесса вычислений за счет оперирования числовыми значениями в процессе анализа. Средства дескрипционной логики выступают в качестве основ-

ного механизма (ядра метода), который на основании сформулированных утверждений осуществляет определение информационной близости между объектами анализа путем логического вывода. Условно метод можно разделить на три составляющие. Первая составляющая метода описывает наборы множеств и базовые функции, выполняемые после инициализации всех объектов. Вторая часть отвечает за процесс спектрального анализа и получение спектров анализируемых объектов. Заключительная часть представляет собой набор критериев и утверждений дескрипционной логики.

Процесс определения информационной близости начинается с инициализации всех объектов, представленных в виде множества неструктурированных текстовых документов $D = \{d_1, d_2, \dots, d_n\}$, где d_n — текстовый документ. В свою очередь каждый элемент d_n множества D представляет собой набор лексических единиц $L = \{l_1, l_2, \dots, l_n\}$, где l_n — лексическая единица. Совокупность лексических единиц множества L образует смысловые семантические связи, отождествляющие контекст K каждого элемента d_n множества D . Таким образом, на первом этапе метода происходит инициализация объектов D , L и K , после чего следует выполнение функций $ReBuildTextStruct()$ и $Intersection()$. Назначение функции $ReBuildTextStruct()$ заключается в первичной структуризации набора лексических единиц и получении модели данных в виде набора пар «ключ-значение». Далее следует выполнение функции $Intersection()$, которая возвращает словарь данных — φ , содержащий одинаковые элементы, входящие в состав первичной модели данных, полученной с помощью функции $ReBuildTextStruct()$. Ниже приведен пример фрагмента алгоритма, отвечающий за инициализацию и выполнение первых двух функций.

```

D ← ∅
D ← ΔD
for each instance d ∈ D do
    firstDataModelRBTS(d) ← ReBuildTextStruct(d),
    где firstDataModelRBTS(d) =
    = [ fDMRBTS(d)x1, ..., fDMRBTS(d)xn;
      fDMRBTS(d)y1, ..., fDMRBTS(d)yn ] ⇒
    ⇒ fDMRBTS(d)xn : fDMRBTS(d)yn
    интерпретация функции ReBuildTextStruct(d):
    return
    ← SELECT
    * WHERE { ? a Vdcriterion . ? a Vdvalue ? b. OPTIONAL
             { ? a Vdchild ? c . ? c Vdvalue ? d }
end for
for each instance d ∈ D do
    for each instance fDM ∈ firstDataModelRBTS(d) do
        φ ← Intersection(fDM, d),
        где Intersection(fDM, d) — запрос, который
        проверяет fDMn ∩ dn ≠ ∅
        интерпретация функции Intersection(fDM, d):
        return ← fDM.SELECT xk → xki ∧ xv
                → xvi. WHERE xvi
                = rd.ToDictionary()
    end for
end for
    
```

После первичной подготовки данных следует выполнение этапа спектрального преобразования. В качестве основного подхода для получения спектра информации был выбран метод сингулярного преобразования, более подробно с работой которого можно ознакомиться в статьях [15, 16]. На этом этапе выполняются две функции: *GetAdjacencyMatrix()* и *SVD()*. Результатом данного этапа является получение собственных значений, которые в терминологии спектральной теории представляют собой спектр анализируемого объекта данных множества *D*. Фрагмент второй части алгоритма представлен ниже.

```
for each instance  $fDM \in firstDataModel_{R BTS(d)}$  do
     $M_{fDM} \leftarrow GetAdjacencyMatrix(fDM)$ 
     $SV_{M_{fDM}} \leftarrow SVD(M_{fDM})$ ,
    где  $SVD()$  — метод сингулярного преобразования;
     $SV_{M_{fDM}}$  — сингулярные значения
     $\{SV_{M_{fDM}_1}, SV_{M_{fDM}_2}, \dots, SV_{M_{fDM}_n}\}$ 
end for
```

Завершающим этапом в методе является выполнение функции *IsSimilar()*, которая возвращает результат — ψ , в котором содержится ответ об информационной близости между объектами анализа. Функция *IsSimilar()* представляет собой совокупность условий выполнимости процесса определения информационной близости между объектами и набор утверждений, предполагающих возможность информационной близости между объектами. Ниже приведен завершающий фрагмент алгоритма, включающий описание функции *IsSimilar()*.

```
 $\psi \leftarrow IsSimilar(SV_{M_{fDM}}, \varphi)$ 
интерпретация функции  $IsSimilar()$ :
 $K = T \cup A$ , где  $K$  – база знаний;  $T$  –  $Tbox$ ,  $A$  –  $Abox$ .
Условия выполнимости функции  $IsSimilar()$ :
1. Завершаемость. Для любых  $(SV_{M_{fDM}}, \varphi, T)$  функция  $\Theta$  выдает ответ  $\theta(SV_{M_{fDM}}, \varphi, T)$  через конечное время  $t^m$ , где  $m$  —  $SV_{M_{fDM}_x} \times SV_{M_{fDM}_y} = \{(j, h) \mid j \in SV_{M_{fDM}_x}, h \in SV_{M_{fDM}_y} \wedge \varphi_x \times \varphi_y = \{(s, e) \mid s \in \varphi_x, e \in \varphi_y\}$ .
2. Корректность. Для любых  $(SV_{M_{fDM}}, \varphi, T)$ , если концепты  $SV_{M_{fDM}}, \varphi$  выполнимы относительно  $T$ , то  $\Theta(SV_{M_{fDM}}, \varphi, T) = 1$ .
3. Полнота. Для любых  $(SV_{M_{fDM}}, \varphi, T)$ , если  $\Theta(SV_{M_{fDM}}, \varphi, T) = 1$ , то концепты  $SV_{M_{fDM}}, \varphi$  выполнимы относительно  $T$ .
Условия выполнимости 2 и 3 сводится к

$$U(T) = \begin{cases} \top, & \text{если } U \models T \\ \perp, & \text{если } U \not\models T \end{cases}$$

Утверждения:
1. Для любых концептов  $SV_{M_{fDM}_x}, SV_{M_{fDM}_y}$  и терминологии  $T$  существует концепт  $SV_{M_{fDM}_y} \subseteq SV_{M_{fDM}_x}$ , то есть

$$T \models SV_{M_{fDM}_y} \equiv SV_{M_{fDM}_x} \Leftrightarrow T \models SV_{M_{fDM}_y} \subseteq SV_{M_{fDM}_x}$$
 и
```

```
 $T \models SV_{M_{fDM}_x} \subseteq SV_{M_{fDM}_y}$  и  $\models \varphi_y \subseteq \varphi_x$ .
2. Существует хотя бы один индивид  $i_{SV_{M_{fDM}_y}}$  такой, что принадлежит концепту
 $SV_{M_{fDM}_x} \Leftrightarrow \exists i_{SV_{M_{fDM}_y}} \in SV_{M_{fDM}_x}$ , то есть
 $K \models i_{SV_{M_{fDM}_y}} : SV_{M_{fDM}_x} \Leftrightarrow (T, A \cup i_{SV_{M_{fDM}_y}} : SV_{M_{fDM}_x})$ .
Аналогичны утверждения будут для концепта  $\varphi$ .
Таким образом, если утверждение  $2 = \top$ , то и утверждение  $1 = \top$ , то есть существует такая интерпретация  $I = (\Delta, I)$ , для которой

$$K \models i_{SV_{M_{fDM}_y}} : SV_{M_{fDM}_x}$$
.
Доказательство утверждений сводится к следующим правилам:
1.  $\forall \vec{z} \{ \vec{z} \models T \mid \vec{z} \in \Delta^I \}$ 
2.  $\exists \vec{z} \{ \vec{z} \models T \mid \vec{z} \in \Delta^I \}$ ,
где  $\vec{z} = \{z_1, z_2, \dots, z_n\}$  — сингулярные значения концептов  $SV_{M_{fDM}_x}$  и  $SV_{M_{fDM}_y}$ 
if  $\top \Psi$ 
    return  $\leftarrow (bool)similar \Rightarrow true$ 
else if  $\perp \Psi$ 
    return  $\leftarrow (bool)not\ similar \Rightarrow false$ 
end if
```

ОПИСАНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Для апробации предлагаемого метода был сформирован массив, состоящий из более чем 10 000 неструктурированных текстовых документов разной предметной направленности. Каждый документ в массиве имел различное расширение и языковую принадлежность. В качестве тестовой среды был выбран сервер следующей конфигурации:

- CPU'S: 40 * Intel® Xeon® CPU E5-2690v2@3.00 GHz;
- ОЗУ: 257826 Мб;
- OS: Ubuntu Server Edition;
- Apache: 2.4.10;
- MySQL: 5.7.21-20;
- Nginx: 1.13.4;
- PHP: 7.3.

Качество полученных результатов оценивалось по следующим критериям:

- процент определения информационной близости;
- количество выявленных классификационных групп;
- возможность информационной близости при одинаковом спектре и контексте;
- возможность информационной близости при одинаковом спектре на разном контексте;
- возможность информационной близости при разном спектре, но одинаковом контексте;
- возможность информационной близости при разных спектре и контексте.

Таким образом, на основе вышеизложенных критериев были получены результаты работы (рис. 1, 2) предлагаемого метода определения информационной близости. На рисунке 1 показана динамика определения информационной близости. Из диаграммы видно, что процент информационной близости варьируется от 20 до 90%, при этом средняя граница определения информационной близости

равна ~61%. Также стоит отметить то, что обе кривые имеют одинаковое распределение, которое свидетельствует о непротиворечивости результатов, полученных после сравнения двух режимов работы алгоритма (утверждения 1, 2).

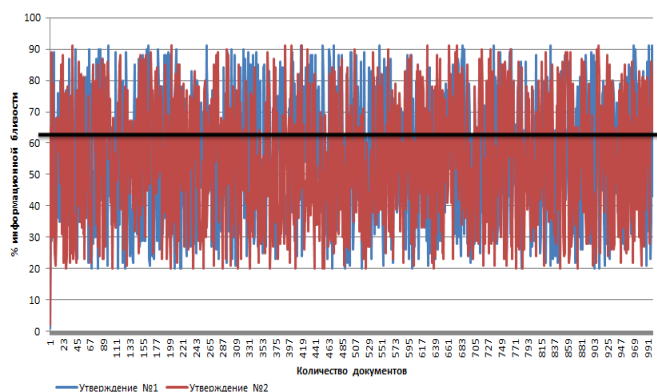


Рис. 1. Динамика определения информационной близости

Рисунок 2 отображает финальное распределение массива неструктурированных документов. Данное распределение показывает, что по результатам работы алгоритма было выявлено 10 наиболее приоритетных категорий, между которыми происходила дальнейшая классификация анализируемых документов. Каждая выявленная классификационная группа включала от 6 до 10% документов из общего числа, содержащихся в массиве.

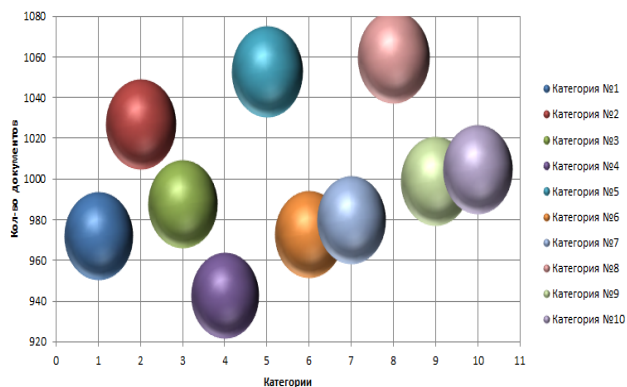


Рис. 2. Распределение документов по классификационным категориям

Будущие исследования

Процесс определения информационной близости между анализируемыми текстовыми документами в больших массивах информации обладает значительным потенциалом в задачах семантической классификации. Полученные в результате апробации наборы данных могут быть использованы для построения более полных тематических словарей предметных областей, которые можно применять в системах принятия управленческих решений и ситуационном управлении. Кроме того, процесс вывода результатов логических утверждений может сопровождаться визуализацией, чтобы более полно отражать карту семантических связей между различными текстовыми документами в информационных массивах.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье рассмотрен метод, предполагающий альтернативный подход к задаче определения информационной близости между множествами объектов, представленных в виде набора неструктурированных текстовых документов. Полученные результаты проведенного опыта показывают высокую степень определения информационной близости при оптимальном соотношении времени выполнения всех операций и использовании вычислительных ресурсов. Исходя из этого, предлагается применение данного метода для задач семантической классификации в информационных системах принятия решений с целью классификации возникающих ситуаций и выявления избыточности в больших массивах текстовой информации, тем самым сокращая объемы необходимой хранимой информации и времени реагирования на поступающий запрос.

ЛИТЕРАТУРА

1. Lijun C., Hongkui Y., Yuxiang L., Xiyin, L. Research and Exploration of Text Mining Technology, *Proceedings of the 2nd International Conference on Advanced Computer Control*, 27–29 March 2010, Shenyang, China, 2010, Vol. 5, Pp. 435–439. DOI: 10.1109/ICACC.2010.5487091.
2. Mingyang J., Yuxin Z., Xiaojing F., Qinghu W., Xinhong Z., ZhiFeng Z., Jie L., Pei Z. A Variety of Text Mining Technology and Tools Research, *Proceedings of the 2014 International Conference on Mechatronics, Electronic, Industrial and Control Engineering (MEIC 2014)*, 15–17 November 2014, Shenyang, China, 2014, Pp. 918–921. DOI: 10.2991/meic-14.2014.203.
3. Sarkar D.: Semantic Analysis. In: *Text Analytics with Python*. Apress, Berkeley, CA, 2019, Pp. 519–566. DOI: 10.1007/978-1-4842-4354-1_8 (дата обращения 10.11.2019).
4. Bouaziz A., Dartigues-Pallez C., da Costa Pereira C., Precioso F., Lloret P. Short Text Classification Using Semantic Random Forest. In: *Bellatreche L., Mohania M. K. (eds) Proceedings of the 16th International Conference Data Warehousing and Knowledge Discovery (DaWaK 2014)*, 2–4 September, 2014, Munich, Germany. *Lecture Notes in Computer Science*, 2014, Vol. 8646, Pp. 288–299. DOI: 10.1007/978-3-319-10160-6_26 (дата обращения 10.11.2019).
5. Ma H., Zhou R., Liu F., Lu X. Effectively Classifying Short Texts via Improved Lexical Category and Semantic Features. In: *Huang DS., Bevilacqua V., Premaratne P. (eds) Intelligent Computing Theories and Application. Proceedings of the 12th International Conference on Intelligent Computing (ICIC 2016)*, 2–5 August 2016, Lanzhou, China. *Part I. Lecture Notes in Computer Science*, 2016, Vol. 9771, Pp. 163–174. DOI: 10.1007/978-3-319-42291-6_16 (дата обращения 10.11.2019).
6. Tandel S. S., Jamadar A., Dudugu S. A Survey on Text Mining Techniques, *Proceedings of the 5th International Conference on Advanced Computing & Communication Systems (ICACCS 2019)*, 15–16 March 2019, Coimbatore, India, 2019, Pp. 1022–1026. DOI: 10.1109/ICACCS.2019.8728547 (дата обращения 10.11.2019).
7. Fadiya S., Sari A. The Importance of Big Data Technology, *International Journal of Engineering & Technology*, 2018, vol. 7, No. 4.5, Pp. 485–488. DOI: 10.14419/ijet.v7i4.5.21139.

8. Oussous A., Benjelloun F.-Z., Lahcen A. A., Belfkih S. Big Data Technologies: A Survey, *Journal of King Saud University — Computer and Information Sciences*, 2017, Vol. 30, Is. 4, Pp. 431–448. DOI: 10.1016/j.jksuci.2017.06.001 (дата обращения 10.11.2019).

9. Justicia de la Torre C., Sánchez D., Blanco I., Martin-Bautista M. J. Text Mining: Techniques, Applications, and Challenges, *International Journal of Uncertainty Fuzziness and Knowledge-Based Systems*, 2018, Vol. 26, No. 4, Pp. 553–582. DOI: 10.1142/S0218488518500265 (дата обращения 10.11.2019).

10. Zhan Z., Lin F., Yang X. Semantic Similarity Calculation of Short Texts Based on Language Network and Word Semantic Information. In: Wu J., Chen H., Wang X. (eds) *Proceedings of the 10th Annual Advanced Computer Architecture Conference (ACA 2014), 23–24 August, 2014, Shenyang, China. Communications in Computer and Information Science*, 2014, Vol. 451, Pp. 215–228.

DOI: 10.1007/978-3-662-44491-7_17 (дата обращения 10.11.2019).

11. Fishbein J. M., Eliasmith C. Methods for Augmenting Semantic Models with Structural Information for Text Classification. In: Macdonald C., et al. (eds) *Advances in Information Retrieval. Proceedings of the 30th European Conference on IR Research (ECIR 2008), 30 March–3 April, 2008, Glasgow, Scotland. Lecture Notes in Computer Science*, 2008, Vol. 4956, Pp. 575–579. DOI: 10.1007/978-3-540-78646-7_58 (дата обращения 10.11.2019).

12. Vasudeva H. L. Spectral Theory and Special Classes of Operators. In: *Elements of Hilbert Spaces and Operator Theory*. Springer Nature Singapore Pte Ltd, Singapore, 2017, Pp. 233–371. DOI: 10.1007/978-981-10-3020-8_4 (дата обращения 10.11.2019).

13. Godsil C., Holton D. A., McKay B.: The Spectrum of a Graph. In: Little C. H. C. (eds) *Combinatorial Mathematics V. Proceedings of the Fifth Australian Conference, 24–26 August, 1976, Melbourne, Australia. Lecture Notes in Mathematics*, 1977, Vol. 622, Pp. 91–117. DOI: 10.1007/BFb0069184 (дата обращения 10.11.2019).

14. Krisnadhi A., Hitzler P. Description Logics. In: Alhajj R., Rokne J. (eds) *Encyclopedia of Social Network Analysis and Mining, Second Edition*, Springer, New York, 2018, Pp. 572–581.

15. Мизюков Г. С. Нахождение подобия между неструктурированными объектами данных на основе метода сингулярного разложения спектра графа // *Инженерный вестник Дона*. 2018. № 1. URL: http://www.ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD_19_Miziukov_N.pdf_e0a3d9ae84.pdf (дата обращения 10.11.2019).

16. Malamud M. M. On Singular Spectrum of Finite-Dimensional Perturbations (toward the Aronszajn–Donoghue–Kac Theory), *Doklady Mathematics*, 2019, Vol. 100, Is. 1, Pp. 358–362. DOI: 10.1134/S1064562419040124 (дата обращения 10.11.2019).

Method for Determining Information Proximity Based on Spectral Conversion of Text Documents

M. A. Butakova, A. V. Chernov, G. S. Miziukov

Rostov State Transport University
Rostov-on-Don, Russia

butakova@rgups.ru, avcher@rgups.ru, mgs_cmko@rgups.ru

Abstract. The process of identifying key information in unstructured sets of textual information is complex and multiple-aspect. In this regard various methods and technologies are being actively developed that can improve the analysis process and reduce the gap between the quality of the obtained results and the computational resources required for the analysis. This article provides an example of an alternative method for determining information proximity in large arrays of textual information. A distinctive feature of this method is the application of spectral conversion of the information and means of descriptive logic for the logical inference of analysis results of the text documents array. The main components of the method as well as conditions and statements of the logical inference of the analysis results are considered. The analysis of the obtained results based on the results of the approbation of the method is given. The obtained results clearly demonstrate the possibility of applying the method for semantic classification problems in information decision-making systems.

Keywords: unstructured data, semantic classification, information proximity, spectral transformation, descriptive logic.

REFERENCES

1. Lijun C., Hongkui Y., Yuxiang L., Xiyin, L. Research and Exploration of Text Mining Technology, *Proceedings of the 2nd International Conference on Advanced Computer Control*, 27–29 March 2010, Shenyang, China, 2010, Vol. 5, Pp. 435–439. DOI: 10.1109/ICACC.2010.5487091.
2. Mingyang J., Yuxin Z., Xiaojing F., Qinghu W., Xinhong Z., ZhiFeng Z., Jie L., Pei Z. A Variety of Text Mining Technology and Tools Research, *Proceedings of the 2014 International Conference on Mechatronics, Electronic, Industrial and Control Engineering (MEIC 2014)*, 15–17 November 2014, Shenyang, China, 2014, Pp. 918–921. DOI: 10.2991/meic-14.2014.203.
3. Sarkar D.: Semantic Analysis. In: *Text Analytics with Python*. Apress, Berkeley, CA, 2019, Pp. 519–566. DOI: 10.1007/978-1-4842-4354-1_8 (accessed 10 Nov 2019).
4. Bouaziz A., Dartigues-Palleg C., da Costa Pereira C., Precioso F., Lloret P. Short Text Classification Using Semantic Random Forest. In: *Bellatreche L., Mohania M. K. (eds) Proceedings of the 16th International Conference Data Warehousing and Knowledge Discovery (DaWaK 2014)*, 2–4 September, 2014, Munich, Germany. *Lecture Notes in Computer Science*, 2014, Vol. 8646, Pp. 288–299. DOI: 10.1007/978-3-319-10160-6_26 (accessed 10 Nov 2019).
5. Ma H., Zhou R., Liu F., Lu X. Effectively Classifying Short Texts via Improved Lexical Category and Semantic Features. In: *Huang DS., Bevilacqua V., Premaratne P. (eds) Intelligent Computing Theories and Application. Proceedings of the 12th International Conference on Intelligent Computing (ICIC 2016)*, 2–5 August 2016, Lanzhou, China. Part I. *Lecture Notes in Computer Science*, 2016, Vol. 9771, Pp. 163–174. DOI: 10.1007/978-3-319-42291-6_16 (accessed 10 Nov 2019).
6. Tandel S. S., Jamadar A., Dudugu S. A Survey on Text Mining Techniques, *Proceedings of the 5th International Conference on Advanced Computing & Communication Systems (ICACCS 2019)*, 15–16 March 2019, Coimbatore, India, 2019, Pp. 1022–1026. DOI: 10.1109/ICACCS.2019.8728547 (accessed 10 Nov 2019).
7. Fadiya S., Sari A. The Importance of Big Data Technology, *International Journal of Engineering & Technology*, 2018, vol. 7, No. 4.5, Pp. 485–488. DOI: 10.14419/ijet.v7i4.5.21139.
8. Oussous A., Benjelloun F.-Z., Lahcen A. A., Belfkih S. Big Data Technologies: A Survey, *Journal of King Saud University — Computer and Information Sciences*, 2017, Vol. 30, Is. 4, Pp. 431–448. DOI: 10.1016/j.jksuci.2017.06.001 (accessed 10 Nov 2019).
9. Justicia de la Torre C., Sánchez D., Blanco I., Martín-Bautista M. J. Text Mining: Techniques, Applications, and Challenges, *International Journal of Uncertainty Fuzziness and Knowledge-Based Systems*, 2018, Vol. 26, No. 4, Pp. 553–582. DOI: 10.1142/S0218488518500265 (accessed 10 Nov 2019).
10. Zhan Z., Lin F., Yang X. Semantic Similarity Calculation of Short Texts Based on Language Network and Word Semantic Information. In: *Wu J., Chen H., Wang X. (eds) Proceedings of the 10th Annual Advanced Computer Architecture Conference (ACA 2014)*, 23–24 August, 2014, Shenyang, China. *Communications in Computer and Information Science*, 2014, Vol. 451, Pp. 215–228. DOI: 10.1007/978-3-662-44491-7_17 (accessed 10 Nov 2019).
11. Fishbein J. M., Eliasmith C. Methods for Augmenting Semantic Models with Structural Information for Text Classification. In: *Macdonald C., et al. (eds) Advances in Information Retrieval. Proceedings of the 30th European Conference on IR Research (ECIR 2008)*, 30 March–3 April, 2008, Glasgow, Scotland. *Lecture Notes in Computer Science*, 2008,

Vol. 4956, Pp. 575–579. DOI: 10.1007/978-3-540-78646-7_58 (accessed 10 Nov 2019).

12. Vasudeva H. L. Spectral Theory and Special Classes of Operators. In: *Elements of Hilbert Spaces and Operator Theory*. Springer Nature Singapore Pte Ltd, Singapore, 2017, Pp. 233–371. DOI: 10.1007/978-981-10-3020-8_4 (accessed 10 Nov 2019).

13. Godsil C., Holton D. A., McKay B.: The Spectrum of a Graph. In: *Little C. H. C. (eds) Combinatorial Mathematics V. Proceedings of the Fifth Australian Conference, 24–26 August, 1976, Melbourne, Australia. Lecture Notes in Mathematics*, 1977, Vol. 622, Pp. 91–117. DOI: 10.1007/BFb0069184 (accessed 10 Nov 2019).

14. Krisnadhi A., Hitzler P. Description Logics. In: *Alhajj R., Rokne J. (eds) Encyclopedia of Social Network Analysis and Mining, Second Edition*, Springer, New York, 2018, Pp. 572–581.

15. Miziukov G. S. Finding Similarity Between Unstructured Data Objects on the Basis of the Method of Singular Decomposition of the Spectrum of a Graph [Nakhozhdenie podobiya mezhdru nestrukturirovannymi ob"ektami dannykh

na osnove metoda singulyarnogo razlozheniya spektra grafa], *Engineering Journal of Don [Inzhenernyy vestnik Dona]*, 2018, No. 1. Available at: http://www.ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD_19_Miziukov_N.pdf_e0a3d9ae84.pdf (accessed 10 Nov 2019).

16. Malamud M. M. On Singular Spectrum of Finite-Dimensional Perturbations (toward the Aronszajn–Donoghue–Kac Theory), *Doklady Mathematics*, 2019, Vol. 100, Is. 1, Pp. 358–362. DOI: 10.1134/S1064562419040124 (accessed 10 Nov 2019).

Применение самообучаемых систем для решения задач поиска отказов на железной дороге

Е. А. Благовещенская

Петербургский государственный университет путей
сообщения Императора Александра I
Санкт-Петербург, Россия
kblag2002@yahoo.com

Н. В. Груздев

ООО «СвязьСтройСервис»
Санкт-Петербург, Россия
Nik_gru@mail.ru

С. В. Бочкарев

ООО «ГК ИМСАТ»
Санкт-Петербург, Россия
bochkareffsv@yandex.ru

Д. В. Зуев

ООО «ГК ИМСАТ»
Санкт-Петербург, Россия
zuevdv@gmail.com

Аннотация. Наиболее частой причиной нарушения графика движения поездов является отказ технических средств инфраструктурного комплекса. От скорости поиска и устранения отказов зависит время простоя поездов и, как следствие, экономические потери ОАО «РЖД».

На сегодняшний день поиск отказов осуществляется интуитивным путем. На практике такой путь приводит к излишним затратам времени. При изучении методов построения алгоритмов они были классифицированы с точки зрения возможности построения модели, в которой каждый шаг является функцией всех предыдущих шагов, а функции охватывают все пространство неудач.

Построены эти функции и описана модель их генерации. Такая модель генерации (построения) функций может быть применима к любой технической отрасли. Для железнодорожной инфраструктуры получено 6 функций. Автоматическая самообучающаяся система представляет собой многослойную нейронную сеть, построенную по рекуррентной модели. На основе этой модели реализован и апробирован аппаратно-программный комплекс.

Ключевые слова: нейронные сети, системы технической диагностики и мониторинга, рекуррентная модель, железнодорожная инфраструктура, автоматический поиск отказов, отказ технических средств, обучение нейронных сетей, аппаратно-программный комплекс.

ВВЕДЕНИЕ

Доля грузооборота железных дорог в транспортной системе России составляет 45%, при этом продолжается рост грузовых перевозок: в 2018 году он составил 2 596,9 млрд ткм.

Распоряжением правительства от 19 марта 2019 года № 466-р утверждена долгосрочная программа развития ОАО «Российские железные дороги» до 2025 года, которая предусматривает переход на «цифровую железную дорогу». В соответствии с этим продолжается активное развитие систем технической диагностики и мониторинга (СТДМ).

Техническое диагностирование — это определение технического состояния объекта [1]. Объект железнодорожной автоматики и телемеханики (ЖАТ) может находиться в одном из следующих состояний [1] (рис. 1):

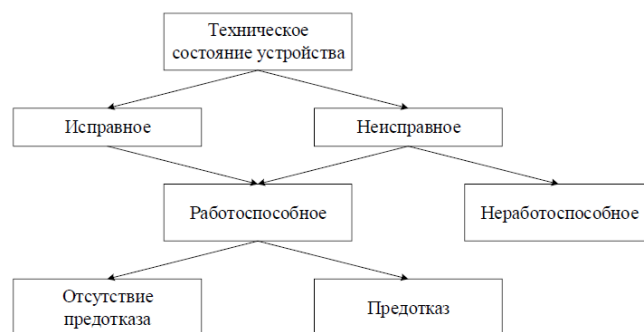


Рис. 1. Технические состояния объектов ЖАТ

1. Исправное — состояние объекта, при котором он соответствует всем требованиям, установленным в нормативно-технической документации на него.

2. Неисправное — состояние объекта, при котором он не соответствует хотя бы одному из требований, установленных в нормативно-технической документации на него.

3. Работоспособное — состояние объекта, в котором значения всех параметров, характеризующих способность выполнять заданные функции, соответствуют требованиям, установленным в нормативно-технической документации на этот объект.

4. Неработоспособное — состояние, в котором значение хотя бы одного из параметров, характеризующих способность выполнять заданные функции, не соответствует требованиям в нормативно-технической документации на этот объект.

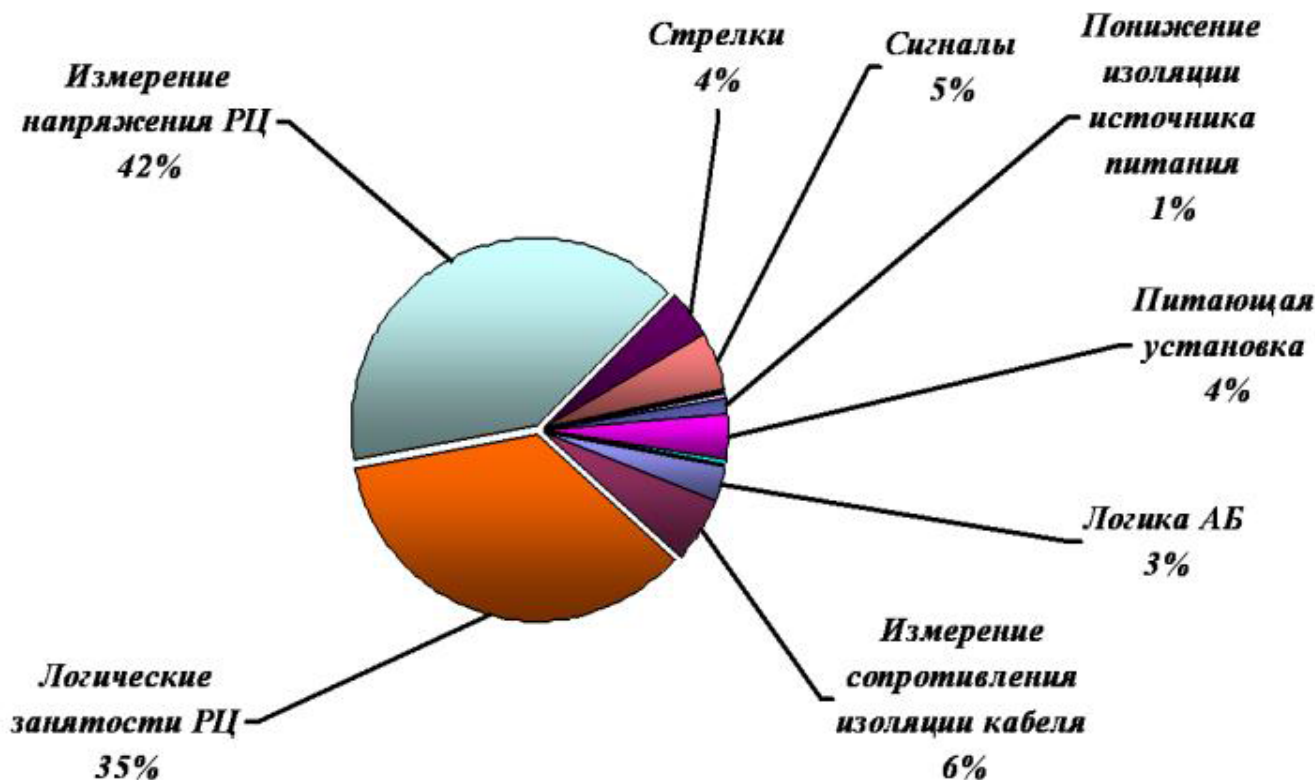


Рис. 2. Распределение предотказов, возникающих из-за недостатков СТДМ

5. Предотказное — состояние объекта, характеризующее повышенным риском его отказа [1, 2]. Отказ — это событие, заключающееся в нарушении работоспособного состояния объекта.

При отсутствии логического анализа и аналитического прогнозирования накапливается большое количество предотказных состояний, поскольку любые несущественные изменения диагностических параметров (например, напряжения) отмечаются системой [3, 4] (рис. 2).

Фиксация «ложных» предотказных состояний может привести либо к отказу, который может вызвать нарушение безопасности и бесперебойности движения поездов, либо к «ложному» реагированию обслуживающего персонала, что приведет к увеличению трудозатрат.

Для повышения качества и снижения времени поиска неисправностей активно развиваются системы мониторинга железнодорожной автоматики и телемеханики.

Направления развития технической диагностики и мониторинга ЖАТ:

1. Полный комплекс измерений.
2. Анализ работы устройств.
3. Прогноз изменения состояния устройств.
4. Выдача рекомендаций по обслуживанию устройств.
5. Охват всех устройств средствами диагностики.

На сегодняшний день к недостаткам технического диагностирования можно отнести:

- «ручную» обработку диагностической информации, которая приводит к увеличению времени на ее анализ и принятие решения;
- отсутствие выявления причины отказа;

- отсутствие научно-обоснованных методов фиксации предотказных состояний;

- отсутствие алгоритмов поиска неисправностей, встроенных в СТДМ;

- отсутствие оптимального набора контролируемых диагностических параметров, что приводит к низкой достоверности определения технического состояния.

Следовательно, расширение функциональных возможностей систем выявления причин отказа, определение оптимального алгоритма поиска неисправностей и определение оптимального набора контролируемых параметров является актуальной задачей.

При росте грузооборота должна быть увеличена пропускная способность железных дорог, на что тратятся серьезные ресурсы. Только в 2018 году на развитие железнодорожной инфраструктуры ОАО «РЖД» было потрачено около 300 млрд рублей. Но все вложения нивелируются в случаях отказа технических средств.

Наиболее частой причиной нарушения графика движения поездов является отказ технических средств инфраструктурного комплекса. От времени поиска и устранения отказов зависит количество и продолжительность простоя поездов и, как следствие, экономические потери ОАО «РЖД».

На сегодняшний день поиск отказов осуществляется интуитивным путем. На практике такой путь приводит к излишним временным затратам.

ПРОЦЕСС ПОИСКА ОТКАЗОВ

Анализ выявленных отказов показывает, что основной их причиной является нарушение технологического про-

цесса эксплуатации (эксплуатационные отказы). На эксплуатационные отказы приходится до 86% всех отказов устройств ЖАТ [5–7]. По статистическим данным большая часть эксплуатационных отказов вызывает задержки поездов.

Несмотря на целый ряд мероприятий по повышению надежности устройств ЖАТ, к которым относят планово-профилактические работы, организацию новых методов обслуживания [8], обучение обслуживающего персонала правилам и методам устранения отказов, время поиска локализации и устранения неисправностей остается относительно большим.

Большое время поиска и устранения отказа объясняется рядом объективных и субъективных факторов. К объективным факторам относятся территориальная рассредоточенность, затрудненный доступ к некоторым наполненным устройствам СЦБ и порой отсутствие полной технической документации. К субъективным факторам можно отнести нехватку опыта и квалификации обслуживающего персонала дистанции, неумение читать принципиальные и монтажные схемы.

Уменьшение влияния человеческого фактора на технологический процесс является необходимой мерой для по-

вышения его качества, а это возможно только повышением уровня его (технологического процесса) автоматизации.

Процесс поиска и устранения неисправностей происходит в следующей последовательности (рис. 3):

1. После появления информации о неисправности начинаются подготовительные действия по ее поиску и устранению: определение отказавшего устройства, сбор и анализ дополнительной информации, изучение технической документации, анализ поездной обстановки для локализации места отказа и его характера, далее — сбор необходимых инструментов и материалов.

2. Доставка работника к месту.

3. На месте производятся дополнительные проверки и устранение выявленной неисправности.

Бывают ситуации, когда у электромеханика возникают трудности при поиске неисправности: например, неправильно локализовано место поиска неисправности, когда неисправность в релейном помещении. В таких ситуациях возрастает роль автоматизированных алгоритмов, которые систематизируют и структурируют поиск неисправности.

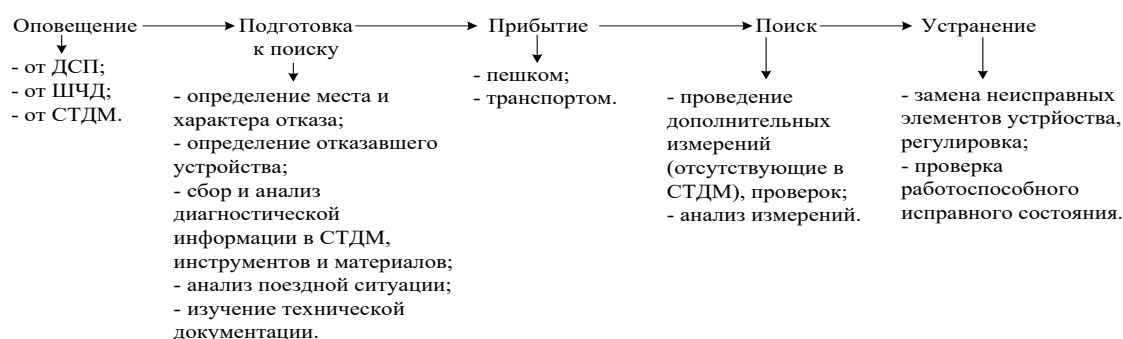


Рис. 3. Процесс восстановления работоспособности устройств

Произведем сравнение времени восстановления функции работоспособности устройств с автоматизированными алгоритмами поиска неисправности и без них.

Среднее время восстановления T_v функции работоспособности устройств систем железнодорожной автоматики и телемеханики по 1 региону на Московской железной дороге:

$$T_v = t_{\text{опв}} + t_{\text{ср.п}} + t_{\text{ср.у}} + t_{\text{тз}} = 40 \text{ мин.},$$

где $t_{\text{опв}}$ — время оповещения о неисправности (1 мин.);

$t_{\text{ср.п}}$ — среднее время поиска неисправности (20 мин.);

$t_{\text{ср.у}}$ — среднее время устранения неисправности (9 мин.);

$t_{\text{тз}}$ — техническая задержка (10 мин.).

Разработка и внедрение автоматизированных алгоритмов поиска неисправностей минимизирует величину $t_{\text{ср.п}}$. При стремлении этого времени к минимуму, соотношение примет следующий вид:

$$T_v = t_{\text{опв}} + t'_{\text{ср.п}} + t_{\text{ср.у}} + t_{\text{тз}} = 29 \text{ мин.},$$

где $t'_{\text{ср.п}}$ — время поиска неисправности с учетом СТДМ (14 мин.);

$t_{\text{тз}}$ — техническая задержка (5 мин.).

Отметим, что подготовительный период является наиболее длительным от начала отказа и до его устранения. От знаний и умений работника зависит безопасность железнодорожного транспорта и его бесперебойность. Поэтому мы направили усилия по минимизации человеческого фактора.

Идеальная модель устранения проблемы Генриха Сауловича Альтшуллера говорит о том, что проблема должна устраняться сама по себе, автоматически.

Для решения проблемы таким образом реализован автоматический поиск неисправностей.

АЛГОРИТМ ПОИСКА ОТКАЗОВ

Существуют два пути составления алгоритма поиска отказов [9]:

1. Расписать все возможные алгоритмы, и, в зависимости от входных данных, выдавать оптимальный путь поиска. Таких алгоритмов хоть и конечное число, но с практической точки зрения большое, поэтому такой путь не является разумным.

2. Второй путь — построить динамическую рекуррентную модель, где каждый шаг будет функцией всех

предыдущих шагов. Но такой алгоритм на все случаи строить также не оптимально.

Поэтому мы классифицировали все виды алгоритмов с точки зрения возможности построения таких функций и покрытия функциями всего пространства отказов. Были построены эти функции и описана модель генерации таких функций. Для железнодорожной инфраструктуры получилось 6 функций. Подобная модель построения функций может быть применима к любой технической отрасли.

В общем виде методы классификации [10, 11] можно отнести к следующим типам:

1. Метод линейного классификатора.
2. Метод нелинейного классификатора.
3. Метод построения деревьев решений.

Линейный классификатор [3] позволяет определить линейную разделяющую поверхность. В случае двух классов такой поверхностью является гиперплоскость, разделяющая пространство признаков на два полупространства. К линейным классификаторам относят метод опорных векторов, байесовский классификатор и другие методы.

В методе опорных векторов [12, 13] для каждого состояния предлагается набор обучающих примеров, заданных как точки в многомерном пространстве. Эти точки образуют области в пространстве, соответствующие разным классам. Крайние точки класса называются опорными, а расстояние между двумя опорными точками является длиной опорного вектора. Требуется найти такую гиперплоскость, чтобы длина опорных векторов была максимальной. Для применения этого метода необходимо, чтобы классы были линейно-разделимы между собой. Недостатком метода является то, что он подходит для решения задачи классификации только с двумя линейно-разделимыми классами. Для решения задачи с большим числом классов применяется разбиение задачи на подзадачи классификации по схеме «один-против-остальных». При этом необходимо решить задачу объединения результатов.

Байесовский классификатор [14] — метод, основанный на теореме, утверждающей, что если плотности распределения каждого из классов известны, то искомым алгоритм можно выписать в явном аналитическом виде. Для каждого из классов определяются функции правдоподобия, по которым вычисляются апостериорные вероятности классов. Объект относится к тому классу, для которого апостериорная вероятность максимальна. Как правило, на практике плотности распределения классов неизвестны, и их приходится восстанавливать по обучающей выборке. Восстановление возможно только с некоторой погрешностью, и чем меньше обучающая выборка, тем выше вероятность появления эффекта переобучения, когда метод теряет свои обобщающие свойства и верно классифицирует только примеры из обучающей выборки. Также эффективность метода резко падает при ошибке в гипотезах о плотности распределения классов.

Линейные классификаторы эффективны для задач классификации с двумя классами. Для решения задачи классификации в случае с многими классами рекомендуется применять нелинейные классификаторы [15], то есть классификаторы, использующие для разделения классов нелинейную поверхность. Примером таких классификаторов является нейронная сеть.

Нейронная сеть является распределенным параллельным процессором, состоящим из связанных между собой элементарных единиц обработки информации (нейронов), накапливающих экспериментальные знания для их последующей обработки [15, 16]. Нейроны реализованы нелинейной функцией активации от одного аргумента — взвешенной суммы всех входных сигналов. Совокупность связанных между собой нейронов определяет структуру сети и задачи, которые способна решать нейронная сеть. Весовые коэффициенты, характеризующие силу связи между двумя нейронами, называются синаптическими коэффициентами.

В процессе подбора синаптических коэффициентов (обучения) [16, 17] каждому классу сопоставляется массив входных значений (признаков класса). Нейронные сети способны обобщать информацию, полученную во время обучения. Также преимуществом использования нейронных сетей является отсутствие необходимости корректировки алгоритмов при изменении количества или признаков классов. Недостатком применения нейронных сетей может являться большая вычислительная сложность [18] при использовании сложных структур сети, например сверточных нейронных сетей [16–18].

Метод построения деревьев решений позволяет построить наглядный алгоритм классификации объекта. Дерево решений состоит из узлов (называемых также вершинами) и ветвей, соединяющих узлы. Самый первый узел называется корнем дерева, а крайние узлы — листьями. Каждой вершине сопоставляется некоторая характеристика, описывающая объект, а ветвям — области значения этой характеристики. Процедура построения дерева решений представляет собой итерационный процесс, в котором для очередной вершины дерева выбирается признак, наилучшим образом удовлетворяющий некоторому критерию ветвления [17]. Критерий ветвления выбирается в зависимости от используемого алгоритма. Популярными алгоритмами для построения дерева решений являются ID3 [17, 18] (или его усовершенствованная версия C4.5 [17, 18]) и алгоритм CART [17, 18]. Различие между алгоритмами состоит в способе выбора признака ветвления.

Преимуществом деревьев решений является наглядность получаемой модели и простота ее интерпретации человеком. Недостатком метода является проблема переобучения, то есть возможность построения чрезмерно большого дерева, которое будет недостаточно полно представлять данные. Также существует необходимость построения дерева с нуля (полного изменения алгоритма диагностики) при изменении количества классов и описания входных данных.

Нейронные сети обеспечивают многоклассовую классификацию вне зависимости от линейной делимости классов. Они способны определить наличие у анализируемого примера признаков нескольких классов. Эффективность применения нейронных сетей для классифицирования технического состояния устройств показана в [19, 20]. Поэтому для разработки методов и алгоритмов выявления неисправностей используются нейронные сети.

Для решения задачи классификации сеть необходимо обучить примерам различных образов. В обучающую выборку необходимо включать примеры, которые в полной

мере описывают образ. В практических задачах для достижения наиболее полного описания возможных образов в обучающей выборке необходимо собрать достаточное количество примеров. Примеры могут быть расположены в разных частях соответствующего образа области в пространстве ДК.

Для решения задачи обучения нейронной сети существует множество алгоритмов [16, 17]. Для обучения нейронных сетей, спроектированных для решения задачи классификации, применяют обучение с учителем. Наиболее популярным алгоритмом обучения с учителем является алгоритм обратного распространения ошибки (англ. *backpropagation*) [18], основанный на методе градиентного спуска по гиперплоскости функции ошибки, и его модифицированная версия RProp [16–18], которая является одним из лучших алгоритмов обучения первого порядка.

Процесс восстановления работоспособности устройства с использованием автоматической самообучающейся системы, представляющей собой многослойную нейронную сеть на основе рекуррентной модели, проиллюстрирован на рисунке 4.

В итоге был изменен процесс поиска неисправности. Осуществлено объединение информационных потоков, автоматизирован процесс подготовки к поиску неисправности, произведен расчет и получен оптимальный алгоритм действий.

В ходе устранения отказа осуществлена корректировка оптимального алгоритма при изменении входных данных (по результатам измерений, изменению поездной обстановки, проведенных испытаний), выдан ряд рекомендаций, после устранения отказа проведена проверка работоспособности.

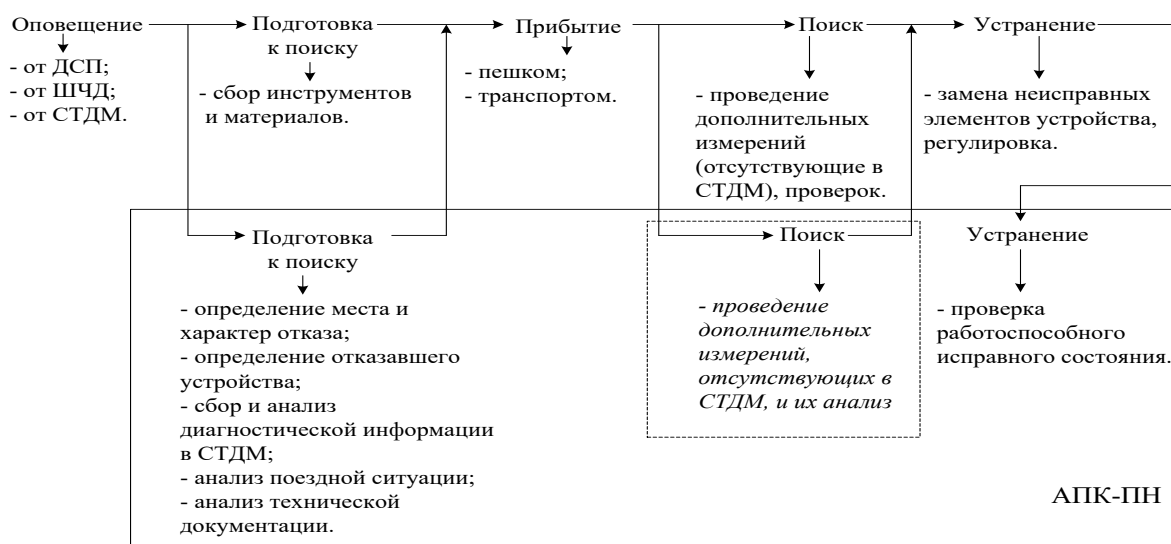


Рис. 4. Процесс восстановления работоспособности устройства при использовании автоматической самообучающейся системы

ОПИСАНИЕ СИСТЕМЫ АПК-ПН

Аппаратно-программный комплекс автоматизированного поиска неисправности (АПК-ПН) с мобильным измерительно-программным комплексом предназначена для автоматизации поиска неисправности устройств ЖАТ, протоколирования процесса поиска неисправности, проверки работоспособности устройства после устранения неисправности и предоставления информации оперативному персоналу. Внедрение АПК-ПН предполагает достижение следующих результатов:

- сокращение времени восстановления работоспособности устройства;
- повышение безопасности и бесперебойности движения поездов;
- сокращение эксплуатационных расходов;
- развитие информационного обмена между смежными отделениями.

Основными целями создания АПК-ПН являются:

- сокращение времени поиска неисправности;
- сокращение количества задержек поездов и их продолжительность;

- сокращение влияния человеческого фактора на процесс поиска неисправности;
- уменьшение трудоемкости работ по восстановлению работоспособности устройств ЖАТ;
- сокращение «послепрофилактических» отказов.

Для автоматизации вышеперечисленных операций система АПК-ПН обеспечивает:

- сбор информации от СТДМ;
- загрузку технической документации из автоматизированного рабочего места ведения технической документации (АРМ-ВТД);
- отображение алгоритма поиска неисправности;
- выделение на принципиальных схемах возможных неисправных элементов и указание точек дополнительных измерений;
- протоколирование процесса поиска неисправности;
- интеграцию с действующими системами контроля,
- взаимодействие с базами данных комплексной автоматизированной системы управления хозяйством централизации, сигнализации и блокировки второго поколения (АСУ-Ш-2).

На основе поставленных выше задач и целей представляем структуру системы АПК-ПН. Система АПК-ПН включает в себя подсистемы:

- сбора информации в СТДМ;
- загрузки технической документации по устройствам ЖАТ;
- анализа диагностической информации из СТДМ и технической документации из АРМ-ВТД;
- построения и отображения алгоритма поиска неисправности устройства ЖАТ, а также изображения точек подключения для дополнительных измерений и выделения проверяемых элементов на технической документации (принципиальной схеме);
- проверки работоспособности устройства ЖАТ после устранения неисправности;
- измерения диагностических параметров и их анализа.

Устройства, для которых система АПК-ПН осуществляет построение алгоритмов поиска неисправности:

- централизации стрелок и сигналов;
- путевой блокировки;
- переездной и заградительной централизации;
- формирования и передачи сигналов автоматической локомотивной сигнализации непрерывного действия (АЛСН);
- другие устройства ЖАТ, контролируемые СТДМ на базе аппаратно-программного комплекса диспетчерского контроля (АПК-ДК).

На основе общих сформулированных требований к системе АПК-ПН выбран иерархический принцип построения и выделено два уровня:

- линейный пункт сбора информации (ЛПС), представляющий собой мобильный измерительно-программный комплекс (уровень 1);
- центральный пункт построения алгоритмов поиска неисправности (ЦППА-ПН) в дистанциях сигнализации, централизации и блокировки (СЦБ) (уровень 2).

Иерархическая структура системы АПК-ПН приведена на рисунке 5. На уровне 1 расположены линейные пункты сбора дополнительной диагностической информации (ЛПС), выполняющие дополнительные измерения диагностических параметров объекта контроля и функции приема с центрального пункта алгоритма поиска неисправности.

В случае отсутствия технической документации на отказавшее устройство необходимо загрузить типовую схему для соответствующей системы ЭЦ или АБ, в составе которой эксплуатируется устройство.

После получения полного объема информации АПК-ПН начинает синтез алгоритма поиска неисправности на основе своей базы знаний и выдается список минимального количества возможных неисправных элементов в той последовательности, в которой необходимо осуществлять проверки с целью сокращения времени поиска. В случае недостаточного объема диагностической информации для формирования списка из минимального количества возможных неисправных элементов, в АПК-ПН синтезируется алгоритм дополнительных измерений диагностических параметров устройства для сокращения области поиска и выявления неисправного элемента. Также предусматрива-

ется выделение элементов на принципиальных схемах устройства, полученных из АРМ-ВТД, которые необходимо проверить, и указываются точки дополнительных измерений.

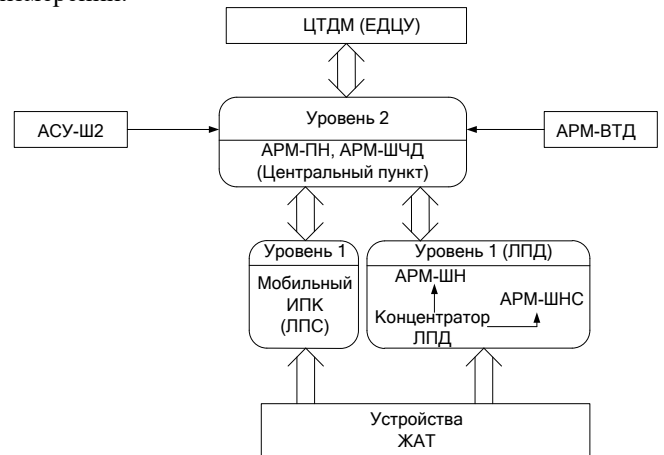


Рис. 5. Структурная схема АПК-ПН

Далее сформированный список минимального количества возможных неисправных элементов либо синтезированный алгоритм дополнительных измерений диагностических параметров устройства передается на линейный пункт СТДМ — автоматизированное рабочее место механика (АРМ-ШН) и на линейный пункт сбора информации — мобильный измерительно-программный комплекс. С помощью мобильного измерительно-программного комплекса осуществляются дополнительные измерения диагностических параметров устройства и производится анализ результатов измерений. На основе анализа результатов измерения формируется список возможных неисправных элементов. Данные о результатах поиска неисправности передаются на сетевой принтер, где печатается итоговый протокол. Также информация передается обратно на рабочее место диспетчера станции СЦБ (АРМ-ШЧД), после чего информация заносится в базу данных АСУ-Ш-2.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Произведен расчет экономического эффекта за счет сокращения неплановых перерывов в движении поездов.

Экономия за счет сокращения времени простоя составила

$$Э_n = T_{скр.г.} \cdot C_{пп.г.} + T_{скр.п.} \cdot C_{пп.п.} + T_{скр.пр.} \cdot C_{пп.пр.} = 290\ 764 \text{ руб.}$$

Расчет экономии за счет сокращения времени простоя поездов при сокращении времени поиска отказов в устройствах СЦБ. К задержкам поездов привели около 41,9% всех отказов; количество отказов $N_{отк/зп} = 255$.

Приведенные затраты, связанные с одной остановкой поезда $C_{оп} = 191 \text{ руб.}$

Экономия поездо-часов при уменьшении времени устранения отказа на 27,5% $\Delta T_n = 0,64$.

Сокращение количества задержанных поездов при уменьшении времени устранения отказа на 27,5% $\Delta N_n = 165$.

Экономия за счет сокращения времени простоя поездов при сокращении времени поиска отказов в устройствах СЦБ составит (на один отказ):

$$Э_{по}(1) = (C_{ппп} + C_{ппг} + C_{пппр}) \cdot \Delta T_n + C_{оп} \cdot \Delta N_n = 36\ 516 \text{ руб.}$$

При $N_{\text{отк/зп}} = 255$ экономия составит:

$$\mathcal{E}_{\text{по}} = N_{\text{отк/зп}} \cdot \mathcal{E}_{\text{по}}(1) = 9\,311\,570 \text{ руб.}$$

Годовой экономический эффект:

$$\mathcal{E}_{\text{г}} = \mathcal{E}_{\text{п}} + \mathcal{E}_{\text{по}} = 290\,764 + 9\,311\,570 = 9\,602\,333 \text{ руб.}$$

Описанный АПК успешно применяется в дистанции СЦБ на Октябрьской железной дороге.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ефанов Д. В. Основы построения и принципы функционирования систем технического диагностирования и мониторинга устройств железнодорожной автоматики и телемеханики: Учебное пособие / Д. В. Ефанов, А. А. Лыков. — СПб.: ПГУПС, 2012. — 59 с.

2. Бочкарев С. В. Выявление предотказных состояний устройств железнодорожной автоматики и телемеханики / С. В. Бочкарев, А. А. Лыков // Интеллектуальные технологии на транспорте («ИнтеллектТранс-2012»): Сборник материалов II международной научно-практической конференции, 28–31 марта 2012 г., Санкт-Петербург. — СПб.: ПГУПС, 2012. — С. 82–88.

3. Калявин В. П. Надежность и диагностика элементов электроустановок: Учебное пособие / В. П. Калявин, Л. М. Рыбаков. — СПб.: Элмор, 2009. — 336 с.

4. Ефанов Д. В. Непрерывное диагностирование устройств СЦБ / Д. В. Ефанов, П. А. Плеханов // Автоматика, связь, информатика. 2012. № 6. С. 18–20.

5. Анализ состояния безопасности движения поездов, надежности работы систем и устройств ЖАТ в хозяйстве автоматики и телемеханики в 2012 году. — М.: ОАО «РЖД», 2013. — 156 с.

6. Анализ состояния безопасности движения поездов, надежности работы систем и устройств ЖАТ в хозяйстве автоматики и телемеханики ОАО «РЖД» в 2009 году на соответствие требованиям системы менеджмента качества. — М.: ОАО «РЖД», 2010. — 156 с.

7. Надежность систем железнодорожной автоматики, телемеханики и связи: Учебное пособие для студентов вузов железнодорожного транспорта. Издание первое / Вал. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников, В. И. Шаманов; под ред. Вл. В. Сапожникова. — М.: УМК МПС РФ, 2002. — 285 с.

8. Аксаментов Н. Н. Применение специализированного автотранспорта в дистанциях // Автоматика, связь, информатика. 2009. № 1. С. 48–50.

9. Благовещенская Е. А. Синтез моделей автоматического поиска неисправностей железнодорожной инфраструктуры / Е. А. Благовещенская, П. Е. Булавский, Н. В. Груздев // Материалы XXI Международной конференции по Вычислительной Механике и Современным Прикладным Про-

граммным Системам (ВМСППС'2019), 24–31 мая 2019 г., Алушта. — М.: Изд-во МАИ, 2019. — С. 134–135.

10. Дмитренко И. Е. Техническая диагностика и автоконтроль систем железнодорожной автоматики и телемеханики. — 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Транспорт, 1986. — 142 с.

11. Зорич В. А. Математический анализ: Учебник для студентов математических и физико-математических факультетов и специальностей высших учебных заведений: в 2-х частях. — Изд. 5-е. — М.: Изд-во МЦНМО; Ч. 1. — 2007. — 654 с.; Ч. 2. — 2007. — 804 с.

12. Надежность и эффективность в технике: в 10 т. — М.: Машиностроение, 1986.

Т. 9: Техническая диагностика / И. М. Синдеев [и др.]; под общ. ред. В. В. Клюева, П. П. Пархоменко. — М.: Машиностроение, 1987. — 351 с.

13. Основы технической диагностики: (Оптимизация алгоритмов диагностирования, аппаратные средства) / П. П. Пархоменко, Е. С. Согомоян; под ред. П. П. Пархоменко. — М.: Энергоиздат, 1981. — 319 с. — (Применение вычислительных машин в исследованиях и управлении производством).

14. Сапожников Вал. В. Основы технической диагностики: Учебное пособие для студентов вузов железнодорожного транспорта / Вал. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников. — М.: Учебно-методический центр МПС России: Маршрут, 2004. — 316 с.

15. Круглов В. В. Нечеткая логика и искусственные нейронные сети: Учебное пособие для студентов вузов, обучающихся по специальности «Прикладная информатика» / В. В. Круглов, М. И. Дли, Р. Ю. Голунов. — М.: Физматлит, 2001. — 224 с.

16. Каллан Р. Основные концепции нейронных сетей = The Essence of Neural Networks / Пер с англ. А. Г. Сивака. — М.: Вильямс, 2001. — 287 с.

17. Хайкин С. Нейронные сети: полный курс = Neural Networks: A Comprehensive Foundation. Second Edition / Пер. с англ. Н. Н. Кузсуль, А. Ю. Шелестова. — Изд. 2-е, испр. — М.: Вильямс, 2008. — 1103 с.

18. Haykin S. O. Neural Networks: A Comprehensive Foundation. Second Edition. — Prentice Hall, Upper Saddle River (NJ), 1998. — 842 p.

19. Zuev D., Bochkarev S. Solution of the Problem of Noninvariance of Using Connectionist Method for Image Recognition // European Science and Technology: Materials of the II International Research and Practice Conference, 18–19 December, 2012, Munich, Germany. — Munich, 2012, Vol. I, Pp. 257–259.

20. Зуев Д. В. Анализ диагностической информации / Д. В. Зуев, С. В. Бочкарев, В. В. Дмитриев // Автоматика, связь, информатика. 2013. № 9. С. 16–18.

The Use of Self-Learning Systems to Solve the Problems of Finding Failures on the Railway

E. A. Blagoveshchenskaya
Emperor Alexander I Petersburg
State Transport University
Saint Petersburg, Russia
kblag2002@yahoo.com

N. V. Gruzdev
Svyazstroyservice LLC
Saint Petersburg, Russia
Nik_gru@mail.ru

S. V. Bochkarev
Group of Companies IMSAT LLC
Saint Petersburg, Russia
bochkareffsv@yandex.ru

D. V. Zuev
Group of Companies IMSAT LLC
Saint Petersburg, Russia
zuevdv@gmail.com

Abstract. The most frequent reason for the violation of the train schedule is the failure of the technical facilities of the infrastructure complex. The number and duration of train downtime and, as a result, the economic losses of Russian Railways JSC depends on the time of search and elimination of failures.

Today, failure search is carried out in an intuitive way. In practice, such a path leads to unnecessary time costs.

In the study of methods for constructing algorithms, they were classified in terms of the possibility of constructing a model in which each step is a function of all previous steps and the functions cover the entire space of failures. We built these functions and described the generation model of such functions. Such a model for constructing functions can be applied to any technical branch. For the railway infrastructure, 6 functions were obtained. An automatic self-learning system has been developed, which is a multilayer neural network constructed according to a recurrence model.

Based on this model, a hardware-software complex was implemented and tested.

Keywords: neural networks, systems of technical diagnostics and monitoring, recurrent model, railway infrastructure, automatic search for failures, failure of technical means, neural networks, hardware and software complex.

REFERENCES

1. Efanov D. V., Lykov A. A. Bases of construction and principles of functioning of systems of technical diagnostics and monitoring of devices of railway automatics and telemechanics: Study guide [Osnovy postroeniya i printsipy funktsionirovaniya sistem tekhnicheskogo diagnostirovaniya i monitoringa ustroystv zheleznodorozhnoy avtomatiki i telemekhaniki: Uchebnoe posobie], Saint Petersburg, PSTU, 2012, 59 p.
2. Bochkarev S. V., Lykov A. A. Identification of Pre-Failure States of Railway Automation and Telemechanics Devices [Vyyavlenie predotkaznykh sostoyaniy ustroystv zheleznodorozhnoy avtomatiki i telemekhaniki], *Intellectual Technologies on the Transport (IntellectTrans 2012): Proceedings of the II International Scientific and Practical Conference [Intellektual'nye tekhnologii na transporte («Intel-*

lektTrans-2012»): Sbornik materialov II mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, Saint Petersburg, 28–31 March, 2012, Saint Petersburg, PSTU, 2012, Pp. 82–88.

3. Kalyavin V. P., Rybakov L. M. Reliability and diagnostics of elements of electrical installations: Study guide [Nadezhnost' i diagnostika elementov elektroustanovok: Uchebnoe posobie], Saint Petersburg, Elmor Publishing, 2009, 336 p.

4. Efanov D. V., Plekhanov P. A. Continuous Diagnostics of CTC Devices [Neprieryvnoe diagnostirovanie ustroystv STsB], *Automation, Communication and Informatics [Avtomatika, svyaz', informatika]*, 2012, No. 6, Pp. 18–20.

5. Analysis of the safety of train traffic, the reliability of RAT systems and devices in the automation and telemechanics sector in 2012 [Analiz sostoyaniya bezopasnosti dvizheniya poezdov, nadezhnosti raboty sistem i ustroystv ZhAT v khozyaystve avtomatiki i telemekhaniki v 2012 godu], Moscow, Russian Railways JSC, 2013, 156 p.

6. Analysis of the safety condition of train traffic, the reliability of the RAT systems and devices in the automation and telemechanics sector of Russian Railways JSC in 2009 for compliance with the requirements of the quality management system [Analiz sostoyaniya bezopasnosti dvizheniya poezdov, nadezhnosti raboty sistem i ustroystv ZhAT v khozyaystve avtomatiki i telemekhaniki OAO «RZhD» v 2009 godu na sootvetstvie trebovaniyam sistemy menedzhmenta kachestva], Moscow, Russian Railways JSC, 2010, 156 p.

7. Sapozhnikov Val. V., Sapozhnikov Vl. V., Shamanov V. I. Reliability of railway automation, telemechanics and communication systems: Study guide. First Edition [Nadezhnost' sistem zheleznodorozhnoy avtomatiki, telemekhaniki i svyazi: Uchebnoe posobie. Izdanie pervoe], Moscow, Educational and Methodological Room of the Ministry of Railways of the Russian Federation, 2002, 285 p.

8. Aksamentov N. N. The Use of Specialized Vehicles in Distances [Primenenie spetsializirovannogo avtotransporta v distantsiyakh], *Automation, Communication and Informatics [Avtomatika, svyaz', informatika]*, 2009, No. 1, Pp. 48–50.

9. Blagoveshchenskaya E. A., Bulavsky P. E., Gruzdev N. V. Synthesis of Models for Automatic Troubleshooting of Railway Infrastructure [Sintez modeley avtomaticheskogo poiska neispravnostey zheleznodorozhnoy infrastruktury], In: *Proceedings of the XXI International Conference on Computational Mechanics and Modern Applied Software Systems (CMMASS'2019) [Materialy XXI Mezhdunarodnoy konferentsii po Vychislitel'noy Mekhanike i Sovremennym Prikladnym Programmnyam Sistemam (VMSPPS'2019)]*, 24–31 May, 2019, Alushta, Moscow, Moscow Aviation Institute Publishing House, 2019, Pp. 134–135.
10. Dmitrienko I. E. Technical diagnostics and auto-control of railway automation and telemechanics systems. [Tekhnicheskaya diagnostika i avtokontrol' sistem zheleznodorozhnoy avtomatiki i telemekhaniki], Moscow, Transport Publishing House, 1986, 142 p.
11. Zorich V. A. Mathematical analysis: Textbook (in two parts) [Matematicheskiy analiz: Uchebnik (v dvukh chastyakh)], Moscow, Moscow Center for Continuous Mathematical Education, 2007, 654 + 804 p.
12. Klyuev V. V., Sindeev I. M., et al. Reliability and efficiency in technology: in 10 volumes. Volume 9. Technical diagnostics [Nadezhnost' i effektivnost' v tekhnike: v 10 tomakh. Tom 9. Tekhnicheskaya diagnostika], Moscow, Mashinostroenie Publishing House, 1987, 351 p.
13. Parkhomenko P. P., Sogomonyan E. S. Fundamentals of technical diagnostics: (Optimization of diagnostics algorithms, hardware) [Osnovy tekhnicheskoy diagnostiki: (Optimizatsiya algoritmov diagnostirovaniya, apparaturnye sredstva)], Moscow, Energoizdat Publishing House, 1981, 319 p.
14. Sapozhnikov Val. V., Sapozhnikov VI. V. Fundamentals of technical diagnostics: Study guide [Osnovy tekhnicheskoy diagnostiki: Uchebnoe posobie], Moscow, Marshrut Publishing House, 2004, 316 p.
15. Kruglov V. V., Dli M. I., Golunov R. Yu. Fuzzy logic and artificial neural networks: Study guide [Nechetkaya logika i iskusstvennye neyronnye seti: Uchebnoe posobie], Moscow, Fizmatlit Publishing House, 2001, 224 p.
16. Callan R. The Essence of Neural Networks [Osnovnye kontseptsii neyronnykh setey], Moscow, Williams Publishing House, 2001, 287 p.
17. Haykin S. Neural Networks: A Comprehensive Foundation. Second Edition [Neyronnye seti: polnyy kurs. Vtoroe izdanie], Moscow, Williams Publishing House, 2008, 1103 p.
18. Haykin S. O. Neural Networks: A Comprehensive Foundation. Second Edition, Prentice Hall, Upper Saddle River (NJ) 1998, 842 p.
19. Zuev D., Bochkarev S. Solution of the Problem of Noninvariance of Using Connectionist Method for Image Recognition, In: *European Science and Technology: Proceedings of the II International Research and Practice Conference, 18–19 December, 2012, Munich, Germany*, Munich, 2012, Vol. I, Pp. 257–259.
20. Zuev D. V., Bochkarev S. V., Dmitriev V. V. Analysis of Diagnostic Information [Analiz diagnosticheskoy informatsii], *Automation, Communication and Informatics [Avtomatika, svyaz', informatika]*, 2013, No. 9, Pp. 16–18.

Расчет надежности решений, принимаемых по результатам тестирования

М. М. Луценко, Д. А. Сейтманбитов, А. М. Барановский

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I
Санкт-Петербург, Россия

ML4116@mail.ru, Dzhem93@gmail.com, bamvka@mail.ru

Аннотация. В настоящей работе формализована и решена статистическая игра, в результате этого решения было получено: оптимальное рандомизированное решающее правило, вероятность правильного решения по этому правилу, наилучшее априорное распределение уровней знаний тестируемых. Был разработан метод оценки точности и надежности принятия решения по результатам тестирования. Показано, как предложенный метод позволяет оценивать надежность решения на примере теста, содержащего 10 заданий с различными уровнями трудности и 11 различными уровнями знаний.

Ключевые слова: статистическая игра, модель Раша, тестирование, уровень знаний.

ВВЕДЕНИЕ

Главными целями педагогического тестирования являются оценка уровня знаний (подготовки) тестируемого и принятие решения по его результату. К сожалению, результат тестирования (число выполненных заданий теста) зависит не только от уровня знаний тестируемого, но и от ряда других, плохо прогнозируемых факторов. Поэтому адекватная модель задачи принятия решений должна включать вероятностные компоненты.

Гибкая модель построения оптимальных рандомизированных решений, обеспечивающая учет разнообразных видов решений, априорных распределений на множестве уровней знаний, различных уровней сложности решаемых задач может быть реализована в рамках теории статистических игр.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Обозначим через $\Theta = \{\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_m\}$ множество возможных уровней знаний тестируемых, $X(\theta)$ — случайная величина (число набранных баллов тестируемым с уровнем знаний θ при выполнении теста T). Пусть $D = \{d_1, d_2, \dots, d_n\}$ — множество возможных решений, которые может принять лицо, принимающее решение (ЛПР) по результатам тестирования.

Примерами таких решений могут быть следующие множества решений:

1. Точная (точечная) оценка уровня знаний тестируемого:

$$d_1 = \theta_1, d_2 = \theta_2, \dots, d_n = \theta_n.$$

(Решение d_j состоит в том, что уровень знаний тестируемого равен θ_j).

2. Интервальная оценка уровня знаний тестируемого:

$$d_1 = \Delta_1, d_2 = \Delta_2, \dots, d_m = \Delta_m,$$

где $\Delta_1, \Delta_2, \dots, \Delta_m \subseteq \Theta$ — набор частично пересекающихся промежутков, элементы которых можно интерпретировать как плохо подготовленные тестируемые, удовлетворительно подготовленные и т. д. или как тестируемые, готовые к выполнению работы 1, работы 2 и т. д. (Решение d_j состоит в том, что уровень знаний тестируемого θ принадлежит промежутку Δ_j)

Обозначим через $h(d, \theta)$ выигрыш ЛПР в том случае, когда он принял решение d , а уровень знаний был θ . Используя функцию выигрыша, можно моделировать как вышеперечисленные, так и многие другие наборы решений.

Например, функция выигрыша ЛПР

$$h(d, \theta) = \begin{cases} 1, & \text{если } \theta \in \Delta(d); \\ 0, & \text{иначе.} \end{cases}$$

строится по любому набору доверительных интервалов $\Delta_1, \Delta_2, \dots, \Delta_m \subseteq \Theta$.

Обозначим через $X = \{1, 2, \dots, N\}$ множество возможных значений случайной величины $X(\theta)$, а через $P_\theta(x) = P(X(\theta) = x)$ вероятность соответствующего события. Эти вероятности могут рассчитываться как по формуле Бернулли $P_\theta(x) = C_N^x p^x (1-p)^{N-x}$, если трудности всех заданий теста одинаковы. В том случае, когда трудности заданий различны, мы определим случайную величину $X_k(\theta)$, значение которой положим равным единице, если тестируемый с уровнем знаний θ выполнил k -е задание теста, и нулю — в противном случае. Обозначим через $p(k, \theta) = P(X_k(\theta) = 1)$ вероятность соответствующего события. Тогда случайная величина $X(\theta)$ равна сумме соответствующих случайных величин:

$$X(\theta) = X_1(\theta) + X_2(\theta) + \dots + X_N(\theta).$$

В этом случае вероятность $P_\theta(x)$ рассчитывается по известным формулам [1].

Обозначим через δ функцию, ставящую каждому наблюдаемому баллу x решение из множества D , то есть $\delta: X \rightarrow D$. Множество всех решающих функций мы обозначим через $D = D^X$. Обозначим через

$$H(\delta, \theta) = \sum_{k=1}^N P_{\theta}(x_k)h(\theta, \delta(x_k)). \quad (1)$$

математическое ожидание выигрыша ЛПР, если он использует решающую функцию δ , а уровень знаний тестируемого равен θ . В том случае, когда функция $h(d, \theta)$ определяется через набор доверительных интервалов, функция $H(\delta, \theta)$ равна вероятности того, что точное значение уровня знаний тестируемого находится в предъявляемом доверительном интервале, построенном по наблюдаемому баллу x в соответствии с решающей функцией δ .

Заметим, что наименьшая вероятность того, что набор $\Delta_1, \Delta_2, \dots, \Delta_m$, порожденный решающей функцией δ , накроет неизвестный параметр θ , называется доверительной вероятностью для этого набора (для этой решающей функции), то есть

$$\gamma = \gamma(\delta) = \min_{\theta \in \Theta} P(\theta \in \Delta(\delta(X_{\theta}))).$$

В тех случаях, когда априорное распределение уровней знаний v известно, то наилучшую решающую функцию δ_v можно построить в соответствии с распределением

$$H(\delta_v, v) = \max_{\delta} H(\delta, v),$$

которая называется Байесовской решающей функцией [2].

Если априорное распределение неизвестно, то наилучшую решающую функцию следует искать из решения статистической игры $\Gamma = \langle D, \Theta, H \rangle$, в которой D — множество решающих функций (множество стратегий ЛПР), Θ — множество возможных уровней знаний тестируемых (множество состояний природы), функция выигрыша ЛПР в статистической игре, значения которой находятся по формуле (1).

Для решения матричной игры составим пару взаимно двойственных задач. Из первой задачи мы найдем: наилучшую рандомизированную решающую функцию $\mu = (\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_N)$, из второй — наихудшее априорное распределение v , а общее значение этих игр — значение игры Γ .

Прямая задача:

$$v \rightarrow \max, \\ \sum_{k=1}^N \Lambda^k B \mu_k \geq v \mathbf{1}_m, \\ \sum_{j=1}^n \mu_k^j = 1; \mu_k^j \geq 0; k = \overline{1, N}; j = \overline{1, n}.$$

Двойственная задача:

$$v = \sum_{k=1}^N u_k \rightarrow \min, \\ v^t \Lambda^k B \leq u_k \mathbf{1}_n^t; k = \overline{1, N}; \sum_{i=1}^m v_i = 1.$$

Известно много способов решения задач линейного программирования. Наиболее уместным здесь был бы динамический метод [3], специально разработанный автором для статистических игр с пороговыми функциями выиг-

рыша. Однако в простейших случаях статистическую игру можно решить средствами MS Excel. Хотя эти методы часто не дают точного решения, они всегда указывают допустимые решения задач и, следовательно, верхнюю и нижнюю оценки матричной игры.

ПРИМЕР

Предположим, что тест состоит из 10 вопросов и Статистик принимает решение по результатам этого теста. Пространство наблюдений X состоит из 11 чисел: от нуля до 10. Вероятность правильного ответа на один вопрос теста равна уровню знаний тестируемого, возможные значения которого составляют множество

$$\theta = \{0,95; 0,85; 0,75; 0,65; 0,55; 0,45; 0,35; 0,25; 0,15; 0,05\}.$$

Тогда вероятность правильно ответить на x вопросов находится по формуле Бернулли:

$$P_{\theta}(x) = C_{10}^x \cdot \theta^x \cdot (1 - \theta)^{10-x}, \quad x = \overline{0; 10}.$$

Статистик, оценивая уровень знания испытуемого, ставит одну из следующих четырех оценок: $D = \{\text{отл.}, \text{хор.}, \text{уд.}, \text{неуд.}\}$. Причем отличная оценка ставится испытуемым, имеющим 95% и 85% знаний, хорошая — от 75 до 55%, удовлетворительная — от 45 до 35% и неудовлетворительная остальным.

Составим статистическую игру $\Gamma = \langle D, \Theta, H \rangle$ и решим ее в смешанных стратегиях. Матрица выигрыша в рассматриваемой игре имеет размер 44×10 . К сожалению, средства MS Excel не позволяют точно решить две взаимно-двойственные задачи. Но мы получаем верхнюю и нижнюю оценки значения игры, рандомизированную решающую функцию и наихудшее априорное распределение параметра θ [4, 5].

В результате расчетов мы для значения игры получим: нижнюю (0,519) и верхнюю (0,562) оценки значения игры.

Таблица 1

Рандомизированная решающая функция μ

		μ_{10}	μ_9	μ_8	μ_7	μ_6	μ_5	μ_4	μ_3	μ_2	μ_1	μ_0
Решения	отл	1,00	0,49	0,75	0	0	0	0	0	0	0	0
	хор	0	0,51	0,24	0,95	0,75	0,70	0	0	0	0	0
	уд	0	0	0	0,05	0,25	0,30	1,00	1,00	0	0	0
	неуд	0	0	0	0	0	0	0	0	1,00	1,00	1,00

В столбцах этой таблицы указаны вероятности, с которыми Статистик указывает то или иное решение в зависимости от наблюдения.

Итак, вероятность правильного решения Статистика об уровне знаний студента по результатам тестирования лежит в промежутке от 0,52 до 0,56. Таким образом, примерно в 50% случаев Статистик примет неверное решение об уровне знаний испытуемых [6–9].

Таблица 2

Наихудшее априорное распределение параметра θ

θ_i	0,95	0,85	0,75	0,65	0,55	0,45	0,35	0,25	0,15	0,05
v_i	0,00	0,11	0,01	0,04	0,25	0,19	0,15	0,26	0,00	0,00

Полученные значения игры являются нижней оценкой и могут быть улучшены при известном априорном распределении. Кроме того, представляется маловероятным, что априорное распределение уровней знаний совпадет с наихудшим априорным распределением.

Хотя в приведенной постановке и не учитываются все особенности организации тестирования, но при необходимости она может быть уточнена. Однако значение игры мало улучшится при введении в тест большего числа вопросов. Аналогичные примеры рассмотрены в работах [10–13].

МОДЕЛЬ РАША

Современный метод оценки уровня знаний тестируемого основан на теории параметризации педагогических тестов или, в английском варианте, Item Response Theory (IRT) [14, 15]. Перечислим основные предположения этой теории.

- Каждый тестируемый имеет некоторый уровень подготовки (знаний) θ из множества возможных (допустимых) уровней подготовки $\Theta \subseteq R$.

- Каждому заданию τ теста T приписана характеристическая функция выполнимости этого задания $p_\tau(\theta)$, значение которой — вероятность выполнения задания тестируемым с уровнем подготовленности θ . Очевидно, что $0 \leq p_\tau(\theta) \leq 1$ при $\theta \in \Theta$.

- Оценка уровня знаний тестируемого происходит по результату выполнения им N заданий $\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_N$ теста с характеристическими функциями $p_{\tau_1}(\theta), p_{\tau_2}(\theta), \dots, p_{\tau_N}(\theta)$.

- Как сложность (трудность) задания τ , так и уровень подготовки тестируемого θ можно измерять в одинаковых единицах, следовательно, разность $(\tau - \theta)$ показывает степень превышения трудности задания над уровнем подготовки тестируемого.

В теории параметризации педагогических тестов предполагается, что вероятность правильно выполнить задание трудности τ тестируемым с уровнем подготовленности θ равна

$$p_\tau(\theta) = p(\theta - \tau) = (1 + \exp(-(\theta - \tau)))^{-1}$$

(модель Раша) [3].

Перейдем теперь к общему случаю оценки параметров в модели Раша. Предположим, что n тестируемых выполняют тест T содержащий N заданий трудностей:

$$\tau_1 < \tau_2 < \dots < \tau_N.$$

Тогда вероятность того, что i -й тестируемый выполнит j -е задание теста равна

$$p_{i,j} = (1 + \exp(\theta_i - \tau_j))^{-1}, \tau_j \in R.$$

Обозначим через c_j количество участников, верно выполнивших задание с номером j (число первичных баллов j -го задания); b_i — количество верно выполненных заданий участником с номером i . (Как правило, это все целые числа от 0 до N включительно). Оценки $\hat{\theta}_0, \hat{\theta}_1, \dots, \hat{\theta}_N; \hat{\tau}_0, \hat{\tau}_1, \dots, \hat{\tau}_N$ соответствующих параметров могут быть получены по методу моментов или по методу наибольшего правдоподобия. Для этого достаточно решить систему уравнений [5]

$$\begin{cases} \sum_{j=1}^N p_{i,j} = b_i, i = \overline{1, n}; \\ \sum_{i=1}^n p_{i,j} = c_j, j = \overline{1, N}. \end{cases} \quad (2)$$

Возможные значения правых частей этой системы (числа b_i) — целые числа от 0 до N . Поэтому система (2) состоит из $2N+1$ уравнений и содержит $2N+1$ неизвестное.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе была поставлена и решена задача расчета надежности решений, принимаемых по результатам тестирования. В результате решения статистической игры найдены: оптимальное рандомизированное решающее правило (наилучшая оценка уровня знаний тестируемого), вероятность правильного решения по этому правилу, наихудшее априорное распределение уровней знаний тестируемых (такое распределение уровней знаний, при котором истинный уровень знаний тестируемого труднее всего оценить). К преимуществу данного подхода следует отнести то, что мы не накладываем никаких ограничений на распределение типов тестируемых и то, что решение этих статистических игр получено стандартными методами. Кроме того, заметим, что полученное решение довольно устойчиво к малым изменениям условий задачи.

ЛИТЕРАТУРА

1. Нейман Ю. М. Введение в теорию моделирования и параметризации педагогических тестов / Ю. М. Нейман, В. А. Хлебников. — М.: б/и, 2000. — 169 с.
2. Иванов М. А., Луценко М. М. Минимаксные доверительные интервалы для параметра гипергеометрического распределения // Автоматика и телемеханика. 2000. № 7. С. 68–76.
3. Луценко М. М. Теоретико-игровой метод оценки параметра биномиального закона // Теория вероятностей и ее применения. 1990. Т. 35, Вып. 3. С. 471–481.
4. Луценко М. М. Теория статистических решений: Учеб. пособие. — СПб.: ПГУПС, 2011–2012. — Ч. 1. — 2011. — 90 с.
5. Луценко М. М., Шадринцева Н. В. О точности педагогического тестирования // Известия Петербургского университета путей сообщения. 2011. № 4 (29). С. 250–258.
6. Сейтманбитов Д. А., Шадринцева Н. В. Надежность тестирования в модели Раша // XLII неделя науки СПбГПУ: Материалы научно-практической конференции с международным участием. Институт информационных технологий и управления СПбГПУ (02–07 декабря 2013 г., Санкт-Петербург). — СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2014. — С. 85–87.
7. Луценко М. М. О надежности тестирования в модели Раша / М.М. Луценко, Д. А. Сейтманбитов, Н. В. Шадринцева // Математическое моделирование в образовании, науке и производстве: Тезисы VIII Международной конференции, 03–05 октября 2013 г., Тирасполь. — Тирасполь: Изд-во Приднестровского ун-та, 2013. — С.156–157.
8. Шадринцева Н. В., Сейтманбитов Д. А. Надежность тестирования в модели Раша // Актуальные проблемы экономики и инноваций в образовании (Смирновские чтения): Тезисы XIII международной научно-практической конференции, 18 марта 2014 г., Санкт-Петербург. — СПб.: Изд-во МБИ им. А. Собчака, 2014.
9. Луценко М. М., Сейтманбитов Д. А. Точность тестирования в модели Раша // Ученые записки Междуна-

родного банковского института. № 8-1. Актуальные проблемы экономики и инновации в образовании / Под науч. ред. А. С. Харланова. — СПб.: Изд-во МБИ, 2014. — С.114–116.

10. Гарец С. Б., Елисеева Д. В., Сейтманбитов Д. А., Соснина А. С. О точности и надежности тестирования // Транспорт: проблемы, идеи, перспективы: Сборник трудов LXXIV Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, 21–25 апреля 2014 г., Санкт-Петербург. — СПб.: ПГУПС, 2014. — С. 314–318.

11. Луценко М. М., Сейтманбитов Д. А. Принятие решений по результатам ЕГЭ в рамках теоретико-игровой модели // Проблемы математической и естественнонаучной подготовки в инженерном образовании: Сборник трудов III Международной научно-методической конференции, Санкт-Петербург, 2014. — СПб.: ПГУПС, 2014.

12. Сейтманбитов Д. А. Теоретико-игровой метод принятия решений по результатам ЕГЭ // Транспорт: пробле-

мы, идеи, перспективы: Сборник трудов LXXV юбилейной Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, 13–17 апреля 2015 г., Санкт-Петербург. — СПб.: ПГУПС, 2015. — С. 97–98.

13. Луценко М. М., Сейтманбитов Д. А., Теоретико-игровой метод принятия решений по результатам ЕГЭ // Математика в вузе и в школе: труды Международной научно-методической конференции, 25–27 июня 2015 г., г. Псков. — СПб.: ПГУПС, 2015. — С. 86–88.

14. Lutsenko M. M., Seytmanbitov D. V. Game-Theory Method for Knowledge Assessment // European Meeting on Game Theory (SING11-GTM2015): Collected abstracts of papers presented on the European Meeting on Game Theory, July 8–10, 2015, Saint Petersburg. — St. Petersburg, St. Petersburg State University, 2015. — Pp. 125–126.

15. Handbook of Modern Item Response Theory / W. J. van der Linden, R. K. Hambleton (eds). — Springer-Verlag, New York, 1997. — 528 p.

Reliability of Decision in Testing Problems

M. M. Lutsenko, D. A. Seytmanbitov, A. M. Baranovsky
Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University
Saint Petersburg, Russia
ML4116@mail.ru, Dzhem93@gmail.com, bamvka@mail.ru

Abstract. In this paper, a statistical game was defined and solved. Its solution is: the optimal randomized decision rule, the probability of a correct decision on this rule, and the worst a priori distribution of the test subjects knowledge levels. We have developed a method for assessment the accuracy and reliability of decision making by on test results. The proposed program allows you to assessment the reliability of the solution for a test containing 10 items with different levels of difficulty, and 11 different levels of knowledge level.

Keywords: statistical game, Rasch model, testing, knowledge level.

REFERENCES

1. Neyman Yu. M., Khlebnikov V. A. Introduction to the theory of modeling and parameterization of pedagogical tests [Vvedenie v teoriyu modelirovaniya i parametrizatsii pedagogicheskikh testov], Moscow, 2000, 169 p.
2. Ivanov M. A., Lutsenko M. M. Minimax Confidence Intervals for the Parameters of Hypergeometric Distributions [Minimaksnye doveritel'nye intervaly dlya parametra gipergeometricheskogo raspredeleniya], *Automation and Remote Control [Avtomatika i telemekhanika]*, 2000, No. 7, Pp. 68–76.
3. Lutsenko M. M. Game-Theoretic Method for Assessment the Parameter of the Binomial Distribution [Teoretiko-igrovoy metod otsenki parametra binominal'nogo zakona], *Probability theory and its applications [Teoriya veroyatnostey i ee primeneniya]*, 1990, Vol. 35, No. 3, Pp. 471–481.
4. Lutsenko M. M. Statistical decision theory: Study guide. Part 1 [Teoriya statisticheskikh resheniy: Uchebnoe posobie. Chast' 1], St. Petersburg, PSTU, 2011, 90 p.
5. Lutsenko M. M., Shadrinceva N. V. Educational Testing Accuracy [O tochnosti pedagogicheskogo testirovaniya], *Proceedings of Petersburg Transport University [Izvestiya Peterburgskogo universiteta putey soobshcheniya]*, 2011, No. 4 (29), Pp. 250–258.
6. Seytmanbitov D.A., Shadrinceva N. V. Reliability of Testing in the Rasch Model [Nadezhnost' testirovaniya v modeli Rasha], In: *XLII Science Week of SPbPU: Proceedings of a Scientific and Practical Conference with International Participation, Institute of Information Technology and Management SPbPU [XLII nedelya nauki SPbGPU: Materialy nauchno-prakticheskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem. Institut informatsionnykh tekhnologiy i upravleniya SPbGPU]*, December 02–07, 2013, Saint Petersburg, St. Petersburg, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, 2014, Pp. 85–87.
7. Lutsenko M. M., Seytmanbitov D. A., Shadrinceva N. V. About the Reliability of Testing in the Rasch Model [O nadezhnosti testirovaniya v modeli Rasha], In: *Mathematical Modeling in Education, Science and Manufacturing: Theses of the VIII International Conference [Matematicheskoe modelirovanie v obrazovanii, nauke i proizvodstve: Tezisy VIII Mezhdunarodnoy konferentsii]*, October 03–05, 2013, Tiraspol, Tiraspol, T. G. Shevchenko Transnistrian State University, 2013, Pp. 156–157.
8. Shadrinceva N. V., Seytmanbitov D. A. The Reliability of Testing in the Rasch Model [Nadezhnost' testirovaniya v modeli Rasha], In: *Actual Problems of Economy and Innovations in Education (Smirnovskie chteniya): Theses of XIII International Scientific and Practical Conference [Aktual'nye problemy ekonomiki i innovatsiy v obrazovanii (Smirnovskie chteniya): Tezisy XIII mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii]*, March 18, 2014, Saint Petersburg, St. Petersburg, A. Sobchak International Banking Institute, 2014.
9. Lutsenko M. M., Seytmanbitov D. A. Test Explicitly in Rasch Model [Tochnost' testirovaniya v modeli Rasha], *Scientific Notes International Banking Institute, Is. 8-1. Actual Problems of Economy and Innovations in Education [Uchenye zapiski Mezhdunarodnogo bankovskogo instituta. Vyp. 8-1. Aktual'nye problemy ekonomiki i innovatsii v obrazovanii]*, St. Petersburg, A. Sobchak International Banking Institute, 2014, Pp. 114–116.
10. Garets S. B., Eliseeva D. V., Seytmanbitov D. A., Sosnina A. S. About the Accuracy and Reliability of Testing [O tochnosti i nadezhnosti testirovaniya], In: *Transport: Problems, Ideas, Prospects: Proceedings of the LXXIV All-Russian Scientific and Technical Conference of Students, Postgraduate Students and Young Scientists [Transport: problemy, idei, perspektivy: Sbornik trudov LXXIV Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii studentov, aspirantov i molodykh uchenykh]*, April 21–25, 2014, Saint Petersburg, St. Petersburg, PSTU, Pp. 314–318.
11. Lutsenko M. M., Seytmanbitov D. A. Making Decisions Based on the Results of the Unified State Exam in the Framework of a Game-Theoretic Model [Prinyatie resheniy po rezul'tatam EGE v ramkakh teoretiko-igrovoy modeli], In: *Problems of Mathematical and Natural Science Training in Engineering Education: Proceedings of the III International Scientific and Methodological Conference [Problemy matematicheskoy i estestvennonauchnoy podgotovki v inzhernom obrazovanii: Sbornik trudov III Mezhdunarodnoy*

nauchno-metodicheskoy konferentsii], Saint Petersburg, 2014, St. Petersburg, PSTU, 2014.

12. Seytmanbitov D. A. Game-Theoretic Method of Making Decisions Based on the Use Results of the Unified State Exam [Teoretiko-igrovoy metod prinyatiya resheniy po rezul'tatam EGE], In: *Transport: Problems, Ideas, Prospects: Proceedings of the LXXV Anniversary All-Russian Scientific and Technical Conference of Students, Postgraduate Students and Young Scientists [Transport: problemy, idei, perspektivy: Sbornik trudov LXXV yubileyoy Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii studentov, aspirantov i molodykh uchennykh]*, April 13–17, 2015, Saint Petersburg, Saint Petersburg, PSTU, 2015, Pp. 97–98.

13. Lutsenko M. M., Seytmanbitov D. A. Game-Theoretic Method of Making Decisions Based on the Use Results of the

Unified State Exam [Teoretiko-igrovoy metod prinyatiya resheniy po rezul'tatam EGE], In: *Mathematics at University and School: Proceedings of the International Scientific and Methodological Conference [Matematika v vuze i v shkole: trudy Mezhdunarodnoy nauchno-metodicheskoy konferentsii]*, June 25–27, 2015, Pskov, Saint Petersburg, PSTU, 2015, Pp. 86–88.

14. Lutsenko M. M., Seytmanbitov D. V. Game-theory Method for Knowledge Assessment, In: *European Meeting on Game Theory (SING11-GTM2015): Collected abstracts of papers presented on the European Meeting on Game Theory, July 8–10, 2015, Saint Petersburg*, St. Petersburg, St. Petersburg State University, 2015, Pp. 125–126.

15. van der Linden W. J., Hambleton R. K. (eds) *Handbook of Modern Item Response*, Springer-Verlag, New York, 1997, 528 p.