

## НАУЧНОЕ ИЗДАНИЕ

ИЗВЕСТИЯ ПЕТЕРБУРГСКОГО УНИВЕРСИТЕТА ПУТЕЙ  
СООБЩЕНИЯ, том 14, выпуск 3, 2017

ISSN (Print) 1815-588X

### Учредитель и издатель

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

### Адрес учредителя и издателя

190031, СПб., Московский пр., 9,  
тел. (812) 314-92-32

### Адрес редакции

190031, СПб., Московский пр., 9,  
тел. (812) 314-92-32  
e-mail: izvestia@izvestiapgups.org

### Свидетельство о регистрации средства массовой информации

ПИ № ФС2-7499 от 06.04.2005 г., выдано  
Федеральной службой по надзору за соблюдением  
законодательства в сфере массовых коммуникаций  
и охране культурного наследия, Управление  
по Северо-Западному федеральному округу

### Журнал зарегистрирован

в Российском индексе научного цитирования (РИНЦ)

**Журнал включен** в перечень ведущих  
рецензируемых научных журналов и изданий  
(решение Президиума Высшей аттестационной  
комиссии Минобрнауки России от 29.12.2015 г.,  
№ 6/6)

**Журнал имеет** институт рецензирования

### Журнал распространяется

по адресно-целевой подписке через редакцию  
и каталог ОАО «Роспечать» (индекс 18509)

## РЕДАКЦИЯ ЖУРНАЛА

### Главный редактор

А. Ю. Панычев, канд. экон. наук, доцент

### Заместитель главного редактора

В. В. Сапожников, д-р техн. наук, профессор

### Научный редактор

А. К. Канаев, д-р техн. наук, доцент

### Выпускающий редактор

Э. А. Горелик

### Перевод на английский язык

Ю. А. Фаттахова

### Верстка

А. А. Стуканова

### Редактор сайта

Л. А. Стрелкова

## МЕЖДУНАРОДНЫЙ РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

**Панычев Александр Юрьевич**, канд. экон. наук,  
доцент, ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия,  
председатель Совета

**Юсупов Рафаэль Мидхатович**, д-р техн. наук,  
профессор, чл.-корр. РАН, Институт информатики  
и автоматизации РАН, Санкт-Петербург, Россия

**Шнайдер Экхард**, профессор, Фраунгоферовский  
институт неразрушающего контроля, Саарбрюкен,  
Германия

**Ситаж Марек**, профессор, Силезский технический  
университет, Польша

**Христов Христо**, профессор, Технический  
университет, София, Болгария

## РЕДКОЛЛЕГИЯ

**Сапожников Валерий Владимирович**,  
д-р техн. наук, профессор, ПГУПС, Санкт-Петербург,  
Россия, председатель редколлегии

**Бадер Михаил Петрович**, д-р техн. наук,  
профессор, МГУПС (МИИТ), Москва, Россия

**Губачева Лариса Александровна**, д-р техн. наук,  
профессор, Восточно-Украинский национальный  
университет им. В. Даля, Луганск, Украина

**Гуда Александр Николаевич**, д-р техн. наук,  
профессор, РГУПС, Ростов-на-Дону, Россия

**Корниенко Анатолий Адамович**, д-р техн. наук,  
профессор, ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия

**Ледяев Александр Петрович**, д-р техн. наук,  
профессор, ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия

**Нестеров Валерий Леонидович**, д-р техн. наук,  
профессор, УрГУПС, Екатеринбург, Россия

**Титова Тамила Семеновна**, д-р техн. наук,  
профессор, ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия

**Канаев Андрей Константинович**, д-р техн. наук,  
доцент, ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия

Фото на обложке из архивов библиотеки  
ФГБОУ ВО ПГУПС. 1910 г.

**Подписано в печать** с оригинал-макета 12.10.2017.  
Формат 60×84 1/8. Бумага офсетная. Печать МФУ.  
Усл. печ. л. 22,625. Установочный тираж 300 экз.  
Заказ 822. Цена свободная.

**Отпечатано в типографии** ПГУПС  
190031, СПб., Московский пр., 9.

© ФГБОУ ВО ПГУПС, 2017

## SCIENTIFIC PUBLICATION

PROCEEDINGS OF PETERSBURG TRANSPORT UNIVERSITY, volume 14, issue 3, 2017

ISSN (Print) 1815-588X

### Founder and publisher

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University"

### Founder and publisher address

190031, St. Petersburg, Moskovskiy pr., 9, (812) 314-92-32

### Editorial address

190031, St. Petersburg, Moskovskiy pr., 9, (812) 314-92-32

e-mail: [izvestia@izvestiagups.org](mailto:izvestia@izvestiagups.org)

### Mass media registration certificate number

П И Н Ф С 2 - 7 4 9 9 dd. 06.04.2005 issued by the Federal service for the monitoring of legislation compliance in the sphere of mass communications and the preservation of cultural heritage, North West Federal district division

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

The Journal is included in the List of leading peer-reviewed scientific journals and publications

The Journal has the Peer-review division

The Journal is distributed by direct subscription via Editorial office and Rospechat catalogue (item 18509)

## JOURNAL STAFF

### Editor-in-chief

A. Yu. Panychev, Cand. of Economics, Associate Professor

### Deputy chief editor

V. Sapozhnikov, D.Eng., Professor

### Science editor

A. Kanayev, D.Eng., Associate Professor

### Executive editor

E. Gorelik

### English translation

Yu. Fattakhova

### Layout

A. Stukanova

### Online content editor

L. Strelkova

## INTERNATIONAL EDITORIAL BOARD

**Aleksander Panychev**, Cand. of Economics, Professor, Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia, Chairman of Editorial board

**Rafael Yusupov**, D.Eng., Professor, corresponding member of the Russian Academy of Sciences, St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, Russia

**Ekhard Shneider**, Professor, Fraunhofer Institute for Non-Destructive Testing, Saarbrücken, Germany

**Marek Sitazh**, Professor, Silesian University of Technology, Poland

**Khristo Khristov**, Professor, Technical University of Sofia, Bulgaria

## EDITORIAL TEAM

**Valeriy Sapozhnikov**, D.Eng., Professor, Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia, Chairman of Editorial team

**Mikhail Badyer**, D.Eng., Professor, Moscow State University of Railway Engineering, Moscow, Russia

**Larisa Gubachyeva**, D.Eng., Professor, Volodymyr Dahl East Ukrainian National University, Luhansk, Ukraine

**Aleksander Guda**, D.Eng., Professor, Rostov State Transport University, Rostov-on-Don, Russia

**Anatoliy Kornienko**, D.Eng., Professor, Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia

**Aleksander Ledyayev**, D.Eng., Professor, Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia

**Valeriy Nesterov**, D.Eng., Professor, Ural State University of Railway Transport, Ekaterinburg, Russia

**Tamila Titova**, D.Eng., Professor, Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia

**Andrey Kanayev**, D.Eng., Assoc. Professor, Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia

Published by Petersburg State Transport University  
190031, St. Petersburg., Moskovskiy pr., 9  
Open price

© Petersburg State Transport University, 2017

## СОДЕРЖАНИЕ

### → ПРОБЛЕМАТИКА ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМ

- Белозеров В. Л., Грачев А. А.**  
«Вечные» вопросы организации движения поездов на двухпутных участках 397
- Покровская О. Д., Маликов О. Б.**  
Эволюционно-функциональный подход к классификации транспортных узлов 406

### → СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ – ТРАНСПОРТУ

- Бекбаев Г. А., Привалов А. А., Ачкасов Н. Б., Кравцов А. О.**  
Модель процесса «DDOS»-атаки на телекоммуникационную сеть железнодорожного транспорта 420
- Богданов Н. А.**  
Применение метода анализа иерархий для определения текущего состояния искусственных сооружений железнодорожного транспорта на основе данных геодезического мониторинга 427
- Бороненко Ю. П., Даукша А. С.**  
Перспективы внедрения вагонов со съемными кузовами увеличенной грузоподъемности 437
- Привалов А. А., Скуднева Е. В.**  
Подход к оценке маскирования информационного обмена в сетях передачи данных оперативно технологического назначения при целевых атаках 452
- Роенков Д. Н., Плеханов П. А., Яронова Н. В.**  
Способ оценки надежности сети поездной радиосвязи 461
- Соколов Д. А.**  
Потери мощности в проводах контактной сети железных дорог переменного тока при установке компенсирующего устройства в середине межподстанционной зоны с учетом движения по ней поездов 471
- Шкурников С. В., Морозова О. С.**  
О разработке имитационной модели высокоскоростного поезда 481
- Шматченко В. В., Роенков Д. Н., Плеханов П. А., Иванов В. Г., Яронова Н. В.**  
Влияние отказов и сбоев системы радиосвязи GSM-R на готовность перевозочного процесса 490

### → ОБЩЕТЕХНИЧЕСКИЕ ЗАДАЧИ И ПУТИ ИХ РЕШЕНИЯ

- Гаранин М. А., Завьялов А. М., Дементьева Ю. В.**  
Корреляционное исследование влияния причин несчастных случаев на статистические показатели производственного травматизма 501
- Герасименко П. В., Благовещенская Е. А., Ходаковский В. А.**  
Математическое моделирование процесса изучения учебных многосеместровых дисциплин в технических вузах 513

<b>Глухих В. Н., Кирютина С. Е., Богданова А. С.</b>	
Влияние начальных напряжений в древесине на прочность и формоустойчивость деревянных конструкций	523
<b>Голоскоков К. П., Чиркова М. Ю., Логин Э. В.</b>	
Расчет временных затрат на повышение надежности и достоверности информации при проектировании информационных систем	532
<b>Гофман М. В., Корниенко А. А., Котенко А. Г., Кустов В. Н., Мирончиков Е. Т.</b>	
Модель цифрового маркирования аудиосигналов, устойчивого к передаче через воздушный аудиоканал	539
<b>Канцибер Ю. А., Пономарев А. Б.</b>	
Водно-балансовые расчеты характеристик дренажа на осушаемых территориях	554
<b>Ходаковский В. А., Дегтярев В. Г.</b>	
О теореме отсчетов и ее применении для синтеза и анализа сигналов с ограниченным спектром	562



УДК 656.22

**В. Л. Белозеров, А. А. Грачев**

## **«ВЕЧНЫЕ» ВОПРОСЫ ОРГАНИЗАЦИИ ДВИЖЕНИЯ ПОЕЗДОВ НА ДВУХПУТНЫХ УЧАСТКАХ**

Дата поступления: 19.06.2017

Решение о публикации: 03.07.2017

### **Аннотация**

**Цель:** Показать процесс развития теории пропускной способности инфраструктуры железнодорожного транспорта, доказать целесообразность использования методов расчета пропускной способности, предложенных проф. А. К. Угрюмовым в середине XX в., и рекомендовать их применение как средство регулирования системы организации движения поездов. **Методы:** Дана краткая историческая справка решения задачи определения пропускной способности при непараллельном графике движения поездов, перечислены наиболее значимые работы, в которых описан порядок решения этой задачи. Наиболее сложным ее элементом является нахождение коэффициента съема грузовых поездов пассажирскими. Этот коэффициент позволяет математически оценить влияние на пропускную способность поездов, следующих со скоростями, отличными от скорости движения грузовых поездов, которые являются единицей измерения пропускной способности. Проведен сравнительный анализ различных способов расчета коэффициента съема, приведены отличные методологические подходы к исследованию процесса съема поездов на разных этапах развития теории эксплуатации железных дорог. **Результаты:** Подробно описаны разработанный А. К. Угрюмовым и рекомендуемый действующей «Инструкцией по расчету наличной пропускной способности» (ИПС) порядок определения пропускной способности. Представлены результаты расчетов пропускной способности, выполненные по методикам А. К. Угрюмова и ИПС, а также анализа нормативного графика движения поездов. Они подтверждают корректность метода А. К. Угрюмова. Также показана зависимость участковой скорости грузовых поездов от количества пропускаемых по участку пассажирских поездов, а следовательно, и от числа обгонов ими грузовых поездов. **Практическая значимость:** Высказаны предложения по развитию общей методики: необходимость учета уровня заполнения пропускной способности при принятии решений об использовании мероприятий по ее повышению; целесообразность разделения суток на периоды с преимущественно грузовым или пассажирским движением и расчета для каждого периода своей пропускной способности.

**Ключевые слова:** Пропускная способность, коэффициент съема, непараллельный график движения, число обгонов, участковая скорость.

**Vladimir L. Belozеров**, D. Econ. Sci., professor, v.belozеров@mail.ru; \***Andrey A. Grachev**, Cand. Eng. Sci., associated professor, agrachev@outlook.ru (Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University) THE «ETERNAL» ISSUES OF OPERATION OF TRAINS AT DOUBLE-TRACK RAILWAY LINES

## Summary

**Objective:** To demonstrate the development process of working capability of railroad transport infrastructure, to prove the suitability of using the methods for working capability calculation, introduced by professor A. K. Ugryumov in the middle of the XXth century and recommend application of the methods in question as the means of controlling the system of operation of trains. **Methods:** A brief historical digression on the solution of identifying train handling capacity during a nonparallel train schedule was given, the most significant studies were enumerated, which describe the order of solving the given task. The most complicated element of the task in question is the identification of the railway line capacity coefficient of freight and passenger trains. The coefficient in question makes it possible to assess the influence of train handling capacity of trains, both moving with the speed of freight trains and with a speed different to the speed of freight trains, which are the units of measurement of train handling capacity. The comparative analysis of various methods of the railway line capacity coefficient calculation was conducted, different methodological approaches to studying the process of calculating the railway line capacity of trains were presented at all stages of railway maintenance theory development. **Results:** A detailed description of the order of train handling capacity identification, developed by A. K. Ugryumov and recommended by the current “Instruction on actual train handling capacity” (IPS), was given. Calculation data on train handling capacity, conducted by means of the methods suggested by A. K. Ugryumov and IPS, was presented, as well as the analysis of a standard train schedule. The above mentioned results corroborate the robustness of the method introduced by A. K. Ugryumov. The dependence of freight trains’ service speed on the number of passenger trains handled through the district, and, therefore, on the number of passenger train crossings by freight trains was shown. **Practical importance:** The following suggestions on the development of a common method were stated: the necessity of train handling capacity filling level account in the process of making decisions to take measures on its increase; the appropriateness of dividing the day on periods with mainly freight or passenger traffic and the calculation of train handling capacity of each period.

**Keywords:** Train handling capacity, the railway line capacity coefficient, nonparallel time schedule, the number of train crossing, service speed.

## Введение

Одним из основных направлений теории эксплуатации железных дорог является методика расчета ее пропускной способности. Связано это с тем, что именно пропускной способностью характеризуется техническая возможность железной дороги обеспечить планируемые объемы перевозок.

Пропускная способность всегда была предметом исследования ученых, занимающихся вопросами эксплуатации железных дорог. В начале XX в. В. Н. Щегловитовым были установлены зависимость пропускной способности, измеряемой в товарных поездах, от количества поездов срочного обращения (имевших преимущества перед товарными), порядок нахождения коммерческой (участковой) скорости поездов, в том числе в количестве обгонов товарных поездов поездами

срочного обращения [1]. В середине XX в. подобными вопросами занимались И. И. Васильев, Н. А. Воробьев, П. Я. Гордеенко, В. В. Гранквист, А. Д. Каретников, Ф. П. Кочнев, Б. М. Максимович. Ими был выработан общий подход к вычислению пропускной способности [2–5], который в дальнейшем был развит в общепринятую методику [6–9]. Тем не менее и в настоящее время отсутствует метод, позволяющий точно рассчитать пропускную способность железнодорожной линии при непараллельном графике движения поездов.

## Расчет коэффициента съема

Пропускная способность железнодорожных участков определяется в поездах одной категории, как правило грузовых. Поскольку

непараллельный график движения предусматривает прокладку поездов с разными скоростями, причем не только пассажирских, но и грузовых, то все категории поездов приводят к одной с помощью некоего эквивалента грузового поезда. В качестве подобного эквивалента применяется коэффициент съема грузовых поездов, например, пассажирскими ( $\varepsilon$ ), который позволяет оценить влияние пропуска поездов со скоростями следования, отличными от скорости движения грузовых поездов. Расчет коэффициента съема является наиболее сложным элементом методики определения пропускной способности железнодорожных участков.

В целом такая методика сформировалась в середине XX в. К этому времени установилось два способа нахождения коэффициентов съема, которые применяются и в настоящее время. Один был подробно описан в книге [4]. Исследовав закономерности влияния различных факторов на съем грузовых поездов пассажирскими, ее авторы предложили эмпирические формулы для определения коэффициентов съема, которые вошли в нормативные документы по расчету пропускной способности железных дорог. Последняя инструкция, в которой они были использованы, была утверждена в 1989 г. [10]. Второй способ изложил Б. М. Максимович [11]. Он предложил вычислять коэффициент съема в зависимости от взаимного расположения и времени хода грузовых и пассажирских поездов по участку, что позволяло проводить расчеты для конкретных графиков движения поездов. Однако способ определения коэффициента съема без построения графика движения поездов по участку им рекомендован не был.

Эту задачу в 1960 г. решил А. К. Угрюмов. Предваряя свою работу, он писал: «Отсутствие правильного решения не позволяет выработать исчерпывающих мер для того, чтобы нейтрализовать или по крайней мере смягчить то вредное влияние, которое оказывает прокладка поездов большой скорости на использование пропускной способности» [12, с. 34]. А. К. Угрюмов так же, как и Б. М. Мак-

симович, рекомендовал рассчитывать величину  $\varepsilon$  в зависимости от соотношения скоростей поездов различных категорий ( $\Delta$ ) и времени их хода по рассматриваемому участку ( $T$ ), но предложил доказательную методику.

Общепринято, что величина коэффициента съема складывается из двух частей. Первая – основной съем ( $\varepsilon_o$ ) – определяется отношением времени хода пассажирского поезда по участку к периоду графика ( $T_{пер}$ ). Вторая – дополнительный съем ( $\varepsilon_d$ ), вызван тем, что интервал между двумя попутными пассажирскими поездами не кратен времени занятия перегона грузовым поездом:  $\varepsilon = \varepsilon_o + \varepsilon_d$ .

*Основной съем.* При определении коэффициента основного съема в работе [12] А. К. Угрюмовым предложено рассматривать следующие случаи съема грузовых поездов:

1)  $T_{гр} - T_{пс} < I$ , т. е. разница во времени хода грузового и пассажирского поездов по участку меньше межпоездного интервала. Это означает, что пассажирский поезд следует по участку без обгона грузовых.

Заменив  $T_{пс}/T_{гр} = \Delta$  и считая, что период графика  $T_{пер} = I$ , имеем

$$T_{гр} - T_{пс} = T_{гр} (1 - \Delta),$$

что позволяет записать

$$\begin{aligned} \varepsilon_o^{(1)} &= \frac{T_{гр} - T_{пс} + I_{пр} + I_{от} - I}{T_{пер}} = \\ &= \frac{T_{гр} (1 - \Delta) + I_{пр} + I_{от} - I}{I} - 1; \end{aligned}$$

2)  $T_{гр} - T_{пс} > I$ , но в то же время  $t_{гр} - t_{пс} \leq I$ , где  $t_{гр}$ ,  $t_{пс}$  – время хода по перегону соответственно грузового и пассажирского поездов.

В этом случае неизбежен обгон грузовых поездов пассажирскими:

$$\varepsilon_o^{(2)} = \frac{t_3 + I_{пр} + I_{от} + t_p}{I}.$$

Если пассажирский поезд имеет стоянку, то время съема увеличивается на время за-

медления, стоянки и разгона пассажирского поезда.

При равенстве  $T_{гр}$  и  $T_{пс}$  получится параллельный график и  $\varepsilon = 1$ ;

3)  $T_{гр} - T_{пс} > I$  и  $t_{гр} - t_{пс} > I$ .

В этом случае

$$\begin{aligned}\varepsilon_o^{(3)} &= \frac{t_{гр} - t_{пс} + t_3 + I_{пр} + I_{от} + t_p - I}{T_{пер}} = \\ &= \frac{t_{гр}(1 - \Delta) + I_{пр} + I_{от} + t_3 + t_p}{I} - 1;\end{aligned}$$

4)  $T_{пс} > T_{гр}$ . Тогда

$$\varepsilon_o^{(4)} = \frac{T_{пс} - T_{гр} + I_{пр} + I_{от}}{I} - 1.$$

Разработчики действующей «Инструкции по расчету наличной пропускной способности» (ИПС) [13] приблизили вид расчетных формул коэффициента съема к предложенному А. К. Угрюмовым, но по-прежнему настаивают на его определении в зависимости от числа пассажирских поездов на участке:

1) при количестве обращающихся пассажирских поездов до 15 пар:

$$\varepsilon_o = n_p - n_o,$$

где  $n_p$  – расчетное количество обгонов грузовых поездов пассажирскими:

$$n_p = \frac{T_{гр}(1 - \Delta)}{I} + 1,$$

$n_o$  – фактическое количество обгонов грузовых поездов на участке;

2) на двухпутных линиях с размерами пассажирского движения в диапазоне 15–45 пар расчет коэффициента основного съема производится из условия прокладки двух пассажирских поездов в пакете с интервалом между ними, равным  $I$ , и доле пакетной прокладки, составляющей 70% от общего количества пассажирских поездов. При этом расчетное количество обгонов грузовых поездов определяется по выражению

$$n_p^n = \frac{(t_{гр} + I_p)(1 - \Delta)}{I_p} + 2;$$

3) на двухпутных линиях, где размеры пассажирского движения превышают 45 поездов, расчет пропускной способности производится из условия, что 10% поездов пропускаются разрозненно, 60% в пакете из двух поездов и 30% в пакете из трех поездов. При этом расчетное количество обгонов подсчитывается по формуле

$$n_p = \frac{(t_{гр} + 2I_p)(1 - \Delta)}{I_p} + 3.$$

Принципиальным отличием в рассмотренных двух подходах является то, что А. К. Угрюмов при определении  $\varepsilon$  оперирует лишь элементами графика движения поездов, в то время как методика, утвержденную в ИПС, невозможно использовать без построения графика движения. Например, ИПС требует применять в расчетах фактическое число обгонов грузовых поездов на участке. Но вычислять пропускную способность участка, для которого уже разработан нормативный график движения, – бессмысленно.

Корректность метода А. К. Угрюмова подтверждается сравнением результатов расчетов, выполненных по его методике, предложенной в ИПС, и по анализу нормативного графика движения (табл. 1).

Следует отметить, что расчетные формулы действующей ИПС намного ближе к приведенным А. К. Угрюмовым, чем в предыдущей инструкции. В учебной литературе описывается методика А. К. Угрюмова [14] (раздел, посвященный вопросам пропускной способности, написан Ю. В. Дьяковым) [15].

Применение методики ИПС приводит к занижению наличной пропускной способности, а следовательно, и к необоснованному требованию необходимости ее увеличения.

*Дополнительный съем.* А. К. Угрюмов [12] показал, что продолжительность дополнительного съема не превышает величину  $I - 1$  мин (1 мин – точность построения графика). По-



ТАБЛИЦА 1. Коэффициенты съема для участков Октябрьской железной дороги

ε		Участок		
		Кандалакша – Лоухи	Гатчина – Веймарн	Петрозаводск – Свирь
Расчет по методике	А.К. Угрюмова	2	1,7	1,6
	ИПС	2,08	1,56	3
Анализ нормативного графика		2	2	1,5

этому при определении пропускной способности участка, для которого график движения поездов не построен, возможно использование среднего значения коэффициента дополнительного съема

$$\varepsilon_d = \frac{I - 1 \text{ мин}}{2I}.$$

ИПС рекомендует в расчетах  $\varepsilon_d$  принимать равным 0,5, что опять приводит к завышению значения  $\varepsilon$ .

### Расчет участковой скорости

Участковая скорость является одним из важнейших показателей качества организации движения поездов. Она выражает среднюю скорость движения поездов между станциями технического обслуживания составов и смены локомотивных бригад, на которых все грузовые поезда имеют остановки. Участковая скорость зависит как от уровня ходовой и технической скоростей, так и от потерь времени на остановках в пределах участка, которые определяются прежде всего качеством построения графика движения. Поэтому важно понимать, что уровень расчетной участковой скорости – это некий эталон, к которому необходимо стремиться.

Участковая скорость для двухпутного графика может быть рассчитана для максимального графика без его построения по предложенным А.К. Угрюмовым формулам

$$V_{уч} = \frac{N_{гр} L}{N_{гр} T_{гр}} = \frac{N_{гр} L}{\sum N_{гр} t_x^{уч} + \sum N_{гр} t_{ст}}$$

где  $\sum N_{гр} t_{ст}$  – поездо-часы стоянок на промежуточных станциях

$$\sum N_{гр} t_{ст} = B_{обг} t_{обг} N_{пс};$$

число обгонов

$$B_{обг} = \frac{(T_{гр} - T_{пс}) - I}{I};$$

потеря времени на одну стоянку поезда под обгоном

$$t_{обг} = I_{пр} + I_{от} + t_p + t_3.$$

Подстановкой полученных значений в первоначальную формулу находится участковая скорость.

Внимание расчету участковой скорости было уделено в статье в связи с разными подходами к вычислению числа обгонов, рекомендуемыми А.К. Угрюмовым и ИПС.

### Развитие методики

В основе каждого способа расчета наличной пропускной способности, предложенных А.К. Угрюмовым и ИПС, лежат конструктивные идеи. А.К. Угрюмов предложил рассчитывать величину  $\varepsilon$  в зависимости от соотношения скоростей поездов различных категорий и времени их хода по рассматриваемому участку, ИПС – в зависимости от числа пассажирских поездов на участке. Очевидно, что оба подхода необходимо объединить, поскольку при определенных соотношениях числа грузовых и пассажирских поездов съема может

не быть вовсе. Это подтверждается расчетом по тем же исходным данным, что и в примерах А.К. Угрюмова. Сведения, необходимые для вычислений, были собраны студентами кафедры УЭР (табл. 2).

Расчет произведен по следующей формуле:

$$N_{\text{пасс}} = (N_{\text{нал}} - N_{\text{гр}}^{\text{треб}}) / 2\varepsilon,$$

в случае, когда  $N_{\text{нал}} = T_{\text{сут}}/I$ .

График, представленный на рис. 1, показывает, что рассчитывать пропускную способ-

ность по формулам, выведенным для непараллельного графика целесообразно, начиная с определенного соотношения грузовых и пассажирских поездов (в примере с 20 грузовых и 34 пассажирских). При меньшем соотношении числа поездов пропускную способность следует считать, как для параллельного графика, поскольку пассажирские поезда возможно проложить таким образом, чтобы они не мешали грузовому движению.

На рис. 2 показано, как с ростом числа обгонов увеличивается время хода грузовых поездов по участку, а следовательно, снижается участковая скорость:

ТАБЛИЦА 2. Данные для расчета коэффициентов съема

Параметр	Количество
$t_3$ – время замедления грузового поезда, мин	2,00
$t_p$ – время разгона грузового поезда, мин	4,00
$I_{\text{пр}}$ – интервал попутного прибытия, мин	6,00
$I_{\text{от}}$ – интервал попутного отправления, мин	4,00
$I$ – межпоездной интервал, мин	8,00
$\alpha$ – коэффициент, учитывающий надежность инфраструктуры	0,96
$T_{\text{сут}}$ – суточный бюджет времени, используемый для движения поездов, мин	1238,00
$\Delta$ – отношение времени хода пассажирского и грузового поездов	0,80
$T_{\text{гр}}$ – время хода грузового поезда по участку, мин	40

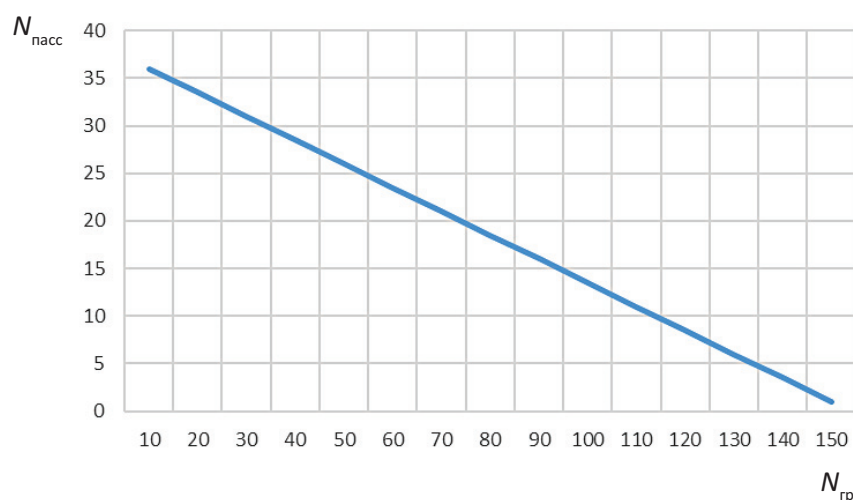


Рис. 1. Число пассажирских поездов ( $N_{\text{пасс}}$ ), которые могут проследовать участок без обгона в зависимости от числа грузовых ( $N_{\text{гр}}$ )

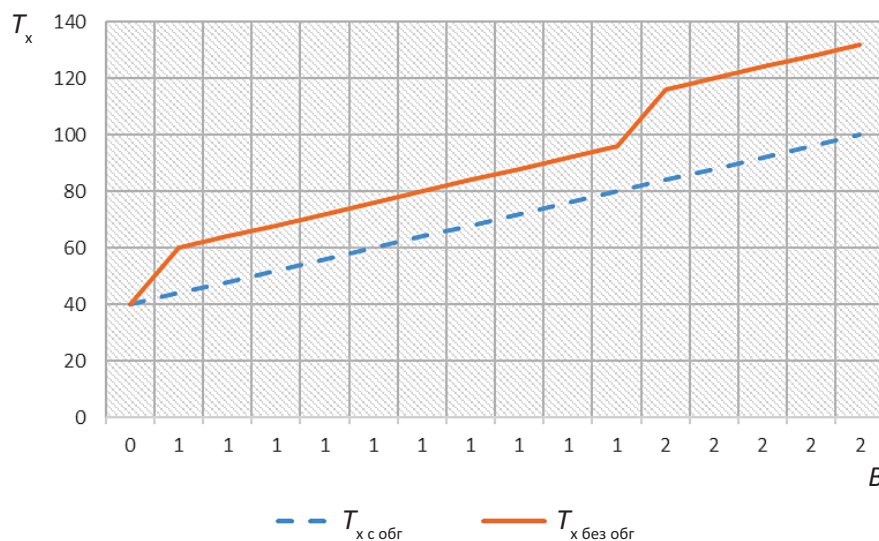


Рис. 2. Время хода поезда по участку при наличии обгонов ( $T_{x \text{ с обг}}$ ) и без них ( $T_{x \text{ без обг}}$ )

$$T_{\text{с обг}} = T_{\text{без обг}} + (t_3 + t_p + I_{\text{пр}} + I_{\text{от}})B_{\text{обг}}.$$

Приведенный пример показывает, что при необходимости можно подобрать такое соотношение грузовых и пассажирских поездов, при котором наличная пропускная способность и участковая скорость будут наибольшими, в том числе и за счет применения пакетного графика. Также существует возможность определить количество поездов той или иной категории, которые могут быть проложены в графике без конфликтных ситуаций при любом числе поездов в пакете.

Следует отметить, что предлагаемые решения по росту пропускной способности и участковой скорости позволяют получить дополнительный экономический эффект. Участковая скорость – важнейший качественный показатель использования подвижного состава, экономический эффект от улучшения которой достаточно хорошо изучен. Увеличение участковой скорости позволяет экономить затраты на оплату труда локомотивных бригад, на топливо (электроэнергию) для тяги поездов и другие расходы.

Рост пропускной способности сокращает единовременные затраты (капитальные вложения) в ее развитие. При этом возрастают объемы перевозок грузов и пассажиров, увеличивается доходная база железных дорог. Со-

кращается оборот вагона, понижается потребность в подвижном составе при неизменных объемах перевозок. В каждом конкретном случае дополнительные эффекты могут быть определены расчетным путем.

## Заключение

Практически никогда график движения поездов не строится «на чистом листе», идет постоянное совершенствование предыдущего с учетом планов перевозок на период действия разрабатываемого графика. Но зачастую недостатки старого графика воспроизводятся в новом. Для вновь созданного графика рассчитываются характеризующие его показатели. Но оценить, насколько удачно построен график нельзя, поскольку он сравнивается лишь с предшествующим. Поэтому методика А.К. Угрюмова, позволяющая задать высокий уровень вновь создаваемого графика, должна быть востребована разработчиками.

В связи с тем, что уровень заполнения пропускной способности изменяется в течение суток, целесообразно разделить 24 ч на периоды с преимущественно грузовым или пассажирским движением и для каждого из них рассчитывать свою пропускную способность, соответственно в грузовых или пассажирских

поездах. Такой подход позволит определить уровень заполнения пропускной способности и более взвешенно принимать решение об использовании мероприятий по ее повышению.

Важно отметить, что увеличение пропускной способности и участковой скорости непосредственно влияет на повышение экономической эффективности работы железных дорог.

### Библиографический список

1. Щегловитов В. Н. Влияние поездов срочного обращения на пропускную способность графика и коммерческую скорость хода товарных поездов / В. Н. Щегловитов. – Варшава : Типография А. Г. Сыркина, 1911. – 115 с.

2. Гранквист В. В. Организация движения поездов по графику / В. В. Гранквист. – Л. : ВТА, 1941. – 223 с.

3. Васильев И. И. Организация движения на железнодорожном транспорте. Ч. II : учеб. пособие / И. И. Васильев, П. Я. Гордеенко. – М. : Гос. транспорт. ж.-д. изд-во, 1953. – 340 с.

4. Воробьев Н. А. Совершенствование графика движения поездов и улучшение использования пропускной способности железнодорожных линий / Н. А. Воробьев, А. Д. Каретников. – М. : ВНИИЖТ, 1960. – 222 с.

5. Кочнев Ф. П. Вопросы организации движения поездов / Ф. П. Кочнев, Б. М. Максимович. – М. : Трансжелдориздат, 1961. – 212 с.

6. Архангельский Е. В. Расчет пропускной способности железных дорог / Е. В. Архангельский, Н. А. Воробьев. – М. : Транспорт, 1977. – 312 с.

7. Воробьев Н. А. График движения поездов / Н. А. Воробьев, А. Д. Каретников. – М. : Транспорт, 1979. – 301 с.

8. Макарошкин А. М. Использование и развитие пропускной способности железных дорог / А. М. Макарошкин, Ю. В. Дьяков. – М. : Транспорт, 1981. – 287 с.

9. Левин Д. Ю. Диспетчерские центры и технология управления перевозочным процессом : учеб. пособие / Д. Ю. Левин. – М. : Учеб.-метод. центр по образованию на ж.-д. транспорте, 2005. – 760 с.

10. Инструкция по расчету наличной пропускной способности железных дорог. – М. : Транспорт, 1991. – 304 с.

11. Максимович Б. М. Выбор способов увеличения пропускной способности железнодорожных линий / Б. М. Максимович, Э. Д. Фельдман, А. М. Баранов, Н. А. Воробьев, В. Е. Козлов // Труды ВНИИЖТа. – М. : Трансжелдориздат, 1958. – Вып. 147. – 246 с.

12. Угрюмов А. К. Вопросы организации движения на двухпутных участках / А. К. Угрюмов // Вопросы эксплуатации железных дорог СССР. – Труды ЛИИЖТа. – Л. : Трансжелдориздат, 1960. – Вып. 170. – С. 34–63.

13. Инструкция по расчету наличной пропускной способности. – М. : ОАО РЖД, 2011. – 305 с.

14. Управление эксплуатационной работой и качеством перевозок на железнодорожном транспорте : учебник для вузов / ред. П. С. Грунтов. – М. : Транспорт, 1994. – 544 с.

15. Управление эксплуатационной работой на железнодорожном транспорте : учебник для студентов вузов ж.-д. транспорта : в 2 т. / ред. В. И. Ковалев, А. Т. Осьминин. – М. : Учеб.-метод. центр по образованию на ж.-д. транспорте. – (Высшее профессиональное образование) (Организация перевозок и управление на транспорте (ж.-д.)). – Т. 2 : Управление движением. – 2011. – 430 с.

### References

1. Sheglovytov V. N. *Vliyaniye poyezdov srochnogo obrasheniya na propusknyuyu sposobnost grafika i kommercheskuyu skorost khoda tovarnykh poyezdov* [*The impact of urgent interchange of vehicles on time schedule train handling capacity and booked speed of freight trains movement*]. Warsaw, Syrkyn A. G. printing house Publ., 1911, 115 p. (In Russian)

2. Grankvist V. V. *Organizatsiya dvizheniya poyezdov po grafiku* [Organization of scheduled train traffic]. Leningrad, VTA Publ., 1941, 223 p. (In Russian)

3. Vasilijev I. I. & Gordeyenko P. Y. *Organizatsiya dvizheniya na zheleznodorozhnom transporte* [Organization of train traffic]. P. II. Moscow, State railroad transport publishing house, 1953, 340 p. (In Russian)

4. Vorobjiev N.A. & Karetnikov A.D. *Sovershenstvovaniye grafika dvizheniya poyezdov i uluchsheniye ispolzovaniya propusknoy sposobnosti zheleznodorozhnykh liniy* [The improvement of train traffic time schedule and train handling capacity of railways]. Moscow, VNIIZhT [Railway Research Institute] Publ., 1960, 222 p. (In Russian)
5. Kochnev F.P. & Maksimovich B.M. *Voprosy organizatsii dvizheniya poyezdov* [The issues of train traffic organization]. Moscow, Transzheldorizdat Publ., 1961, 212 p. (In Russian)
6. Arkhangel'skiy Y.V. & Vorobyev N.A. *Raschet propusknoy sposobnosti zheleznikh dorog* [Calculation of train handling capacity of railways]. Moscow, Transport Publ., 1977, 312 p. (In Russian)
7. Vorobyev N.A. & Karetnikov A.D. *Grafik dvizheniya poyezdov* [Train schedule]. Moscow, Transport Publ., 1979, 301 p. (In Russian)
8. Makarochkyn A.M. & Djakov Y.V. *Ispolzovaniye i razvitiye propusknoy sposobnosti zheleznikh dorog* [Application and development of train handling capacity of railways]. Moscow, Transport Publ., 1981, 287 p. (In Russian)
9. Levyn D.Y. *Dispetcherskiye tsenry i tekhnologiya upravleniya perevochnym protsessom* [Centralized traffic control centres and train management technology]. Moscow, Uchebno-metodicheskiy tsentr po obrazovaniyu na zheleznodorozhnom transporte [Learning and teaching educational center of railway transport] Publ., 2005, 760 p. (In Russian)
10. *Instruktsiya po raschetu nalychnoy propusknoy sposobnosti zheleznikh dorog* [The instruction on calculation of actual train handling capacity of railways]. Moscow, Transport Publ., 1991, 304 p. (In Russian)
11. Maksimovich B.M., Feldman E.D., Baranov A.M., Vorobyev N.A. & Kozlov V.Y. *Vybor sposobov uvelicheniya propusknoy sposobnosti zheleznodorozhnykh liniy* [The selection of ways for increasing train handling capacity of railways]. *Proceedings of VNIIZhT*. Moscow, Transzheldorizdat Publ., 1958, vol. 147, 246 p. (In Russian)
12. Ugryumov A.K. *Voprosy organizatsii dvizheniya na dvukhputnykh uchastkakh. Voprosy ekspluatatsii zheleznikh dorog SSSR* [The issues of traffic management at double-track railway lines. The issues of USSR railway maintenance]. *LIIZhT Proceedings*. Leningrad, Transzheldorizdat Publ., 1960, vol. 170, pp. 34–63. (In Russian)
13. *Instruktsiya po raschetu nalychnoy propusknoy sposobnosti* [The instruction on actual train handling capacity]. Moscow, OAO RZhd [OJSC Russian Railways] Publ., 2011, 305 p. (In Russian)
14. *Upravleniye ekspluatatsionnoy rabotoy i kachestvom perevozok na zheleznodorozhnom transporte* [Field operation management and the quality of transportation service on railway transport]. Ed. by P.S. Gruntov. Moscow, Transport Publ., 1994, 544 p. (In Russian)
15. *Upravleniye ekspluatatsionnoy rabotoy na zheleznodorozhnom transporte* [Field operation management in the rail sector]. In 2 vol. Ed. by V.I. Kovalev & A.T. Osmynyn. T. 2: *Upravleniye dvizheniyem* [Vol. 2: Train movement control]. Moscow, Uchebno-metodicheskiy tsentr po obrazovaniyu na zheleznodorozhnom transporte [Learning and teaching educational center of railway transport] Publ., 2011, 430 p. (In Russian)

БЕЛОЗЕРОВ Владимир Леонидович – доктор экон. наук, профессор, v.belozerov@mail.ru; \*ГРАЧЕВ Андрей Александрович – канд. техн. наук, доцент, aagrachev@outlook.ru (Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I).

УДК 656.073: 658.8

О. Д. Покровская, О. Б. Маликов

## ЭВОЛЮЦИОННО-ФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ ПОДХОД К КЛАССИФИКАЦИИ ТРАНСПОРТНЫХ УЗЛОВ

Дата поступления: 20.01.2017

Решение о публикации: 03.07.2017

### Аннотация

**Цель:** Охарактеризовать эволюционно-функциональный подход к классификации транспортных узлов, который может применяться как методология изучения особенностей зарождения и развития транспортных узлов. Данный подход представляет собой часть теории терминалистики, которую предлагается включить в практику транспортной науки. **Методы:** Использован аналитический метод исследования. **Результаты:** Представлена пирамида терминалистики и иерархии ее объектов с учетом комплексности и интегрированности сервиса как адаптированный вариант теории Ж.-П. Родригэ. Для железнодорожных транспортных узлов (ТУ) предложена четырехэтапная адаптированная модель Родригэ–Ноттебума. Разработаны классификации ТУ: 1) по направленности сервиса, в которой интегрирована градация логистического сервиса и ориентации на объект обслуживания; 2) по проявлению мультипликативного эффекта в связанных и несвязанных отраслях для ТУ, находящихся на любой стадии развития; 3) по стадиям эволюционно-функционального развития ТУ, которая интегрирует кластерный и синергетический подходы. Отмечается, что в современных условиях ТУ давно выполняют роль полноценных многофункциональных логистических объектов, реализующих широкий ассортимент не только транспортных, складских, но и консалтинговых, таможенных, дистрибьюторских, экспедиционных и других услуг. Однако до сих пор транспортная наука не предложила полноценной классификации ТУ, отражающей весь богатый функциональный потенциал данных сложных логистических систем. Показано, что «фокус» научных исследований ТУ смещен в сторону таких отдельных подходов как экономический, коммерческий, планировочный, географический и не является комплексным, логистическим. Показано, что усложнение ассортимента логистического сервиса, множество подходов к организации работы ТУ, повышение качественных требований к ним объективно требуют оформления всех знаний о ТУ в самостоятельную отрасль – терминалистику. Эволюционно-функциональный подход к развитию ТУ как мультимодальных логистических объектов есть основное теоретическое положение терминалистики. Данный подход отражает целый комплекс важных для логистики ТУ параметров: инфраструктурная основа, география, направленность сервиса, особенности регионального развития и развития логистических решений. Авторами была разработана классификация ТУ по стадии их эволюционно-функционального развития путем синтеза кластерного и синергетического подходов к определению стадии развития ТУ как логистического объекта, с одной стороны, и самоорганизующейся сложной системы – с другой, что составляет научную новизну такого предложения. В основу положен признак совершенства логистических решений при взаимодействии сторон логистики. Подробно рассмотрен мультипликативный эффект, связанный с формированием и развитием ТУ в отдельных регионах. **Практическая значимость:** Для ОАО «РЖД» применение эволюционно-функционального подхода может стать инструментом для рационального проектирования и последующего развития ТУ с учетом функционально-логистической стадии развития узла. Это, в свою очередь, повысит клиентоориентированность при формировании пакета логистического сервиса, реализуемого в ТУ, а также создаст условия

для перехода компании в статус логистического провайдера полного цикла и успешного формирования терминальной сети на территории страны.

**Ключевые слова:** Эволюционно-функциональный подход, транспортный узел, терминалистика, логистический объект, логистический сервис, мультипликативный эффект.

\***Oksana D. Pokrovskaya**, Cand. Eng. Sci., associate professor, insight1986@inbox.ru; **Oleg B. Malykov**, D. Eng. Sci., professor (Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University) EVOLUTIONARY FUNCTIONAL APPROACH TO TRANSPORT NODES CLASSIFICATION

## Summary

**Objective:** To characterize evolutionary functional approach to classification of transport nodes, which may be applied as methodology of studying the peculiarities of origin and development of transport nodes. The given approach is a part of terminalistics theory, which may be included in practical training of transportation science. **Methods:** Analytical method of research was used. **Results:** The pyramid of terminalistics and the hierarchy of its elements was presented, taking into account the complexity and integratedness of service as an adapted version of J.-P. Rodrigue's theory. Rodrigue–Notteboom's four-stage adapted model was introduced for transport nodes (TN). The following classifications of TN were developed according to: 1) service orientation, in which logistical service gradation is integrated, as well as service object orientation; 2) display of multiplicative effect in related and unrelated spheres for TN at any stage of development; 3) evolutionary functional stages of TN development which integrate cluster and synergetic approaches. It was noted that in modern conditions transportation nodes often perform the role of a full-fledged multipurpose logistical item, carrying out a wide range of not only transport and stocking services but also consulting, custom, distributing, shipping and other services. However, until now, transportation science has not suggested a complete classification of TN, which would have reflected extensive functional potential of complex logistical systems' data. It was shown that the "focus" of scientific research on TN had shifted concentrating on such approaches as economical, commercial, planning, geographical. Moreover, the focus in question is not complex and logistical. It was shown, that with the expansion of range of logistical service, the variety of approaches to organizing of TN functioning, the rise of quality standards to these approaches, there occurred a necessity to collect the knowledge in a separate branch – terminalistics. Evolutionary functional approach to the development of TN as multimodal logistical items is the main abstract theorem of terminalistics. The approach in question reflects a whole set of parameters significant for TN logistics: infrastructural basis, geography, service orientation, the peculiarities of regional growth and the development of logistics solutions. The author of the given study has developed a classification of TN according to the stage of evolutionary functional development of the latter, by means of cluster and synergetic approaches synthesis, to identify the stage of development of TN as a logistical item on the one hand, and a self-organizing complex system on the other hand. This suggestion makes scientific novelty of the study in question. The criterion of logistical decisions' improvement in the process of interaction of logistics' branches is an underlying criterion of the research in question. The multiplicative effect, connected with TN formation and development in certain regions, was considered in depth. **Practical importance:** Evolutionary functional approach application may become a tool for intelligent design and further development of TN for JSC "Russian Railways", taking into account functional logistical stages of the transport node development. The latter will increase customer-centeredness in the process of logistical service packet assembly, realized in TN, and provide conditions for the company to become a full-fledged logistical provider as well as successful formation of a terminal network on the territory of the country.

**Keywords:** Evolutionary functional approach, transport node, terminalistics, logistical item, logistical service, multiplicative effect.

### Актуальность и цель работы

Вопросы зарождения, формирования и последующей трансформации (эволюции) являются основополагающими при проектировании технической оснащенности, технологии работы, механизма организации и межэлементного взаимодействия таких сложных систем как транспортные узлы (ТУ). Роль ТУ в доставке грузов трудно переоценить. От их бесперебойной работы и слаженного взаимодействия видов транспорта в них зависит эффективность всей транспортно-логистической системы страны [1].

Организация эффективной работы ТУ – комплексная, полиаспектная задача. К сожалению, она решалась односторонне, на основе таких сложившихся подходов как экономика-географическое положение, путевое развитие, интеграция с населенным пунктом. Все остальные вопросы складской инфраструктуры, технического оснащения, взаимодействия видов транспорта и другие решались «точечно», локально. Комплексных научных основ по вопросу проектирования и развития транспортных узлов, интегрирующих знания логистики (транспортной, складской, информационной,...), экономики (регионалистики, экономической географии,...), теории систем и многих других, связанных с деятельностью ТУ, дисциплин не было предложено.

В современных условиях ТУ давно выполняют роль полноценных многофункциональных логистических объектов, реализующих широкий ассортимент услуг не только транспортных, складских, но и консалтинговых, таможенных, дистрибьюторских, экспедиционных и др.

Однако до сих пор транспортная наука не предложила полноценной классификации ТУ, отражающей весь их богатый функциональный потенциал. Эта ситуация связана с преобладанием традиционного понимания ТУ как пункта стыка различных видов транспорта, узла путей сообщения, инфраструктурной единицы, но не как логистического объекта в мере, отвечающей современным представ-

лениям о ТУ. Парадокс ситуации в том, что ТУ различных видов транспорта, выполняя логистические функции, не имеют при этом ни актуального логистического подхода к классификации, отражающей все многообразие современной транспортно-логистической деятельности ТУ [2–4]. Сложившаяся ситуация объективно требует интегрированного научного направления для изучения развития и богатого логистического функционала ТУ. Очевидно, что для полноценного, комплексного исследования столь сложных объектов необходим подход, «заточенный» на ТУ как на объекте изучения. Вышеизложенное определяет выбор темы данной работы.

Целью работы является разработка теоретических основ развития ТУ с позиций терминалистики как нового научного направления.

### Существующее состояние вопроса

Рассмотрим отличие эволюционно-функционального подхода терминалистики от традиционного на примере дефиниций и типологии ТУ, а также место и состав подходов, имеющих в транспортной литературе. Так, рис. 1 иллюстрирует анализ научной транспортной литературы, посвященной ТУ, в частности их классификации.

Традиционно ТУ рассматривались с точки зрения структурной реализации в конкретных географических условиях. В соответствии с рис. 1 наблюдаются следующие подходы к типологии ТУ с учетом их дефиниций: 1) железнодорожный подход, в котором ТУ считается объектом со сложным путевым развитием, узлом дорог, а также географическим объектом; 2) коммерческий (включающий в себя оценочный и технико-проектировочный аспекты, распространенный в сфере складской логистики и продажи терминально-складских объектов, а также при генеральном планировании транспортно-грузовых систем), в котором ТУ – это система элементов, локальный логистический объект; 3) экономика-логистический, в котором ТУ – поставщик логи-



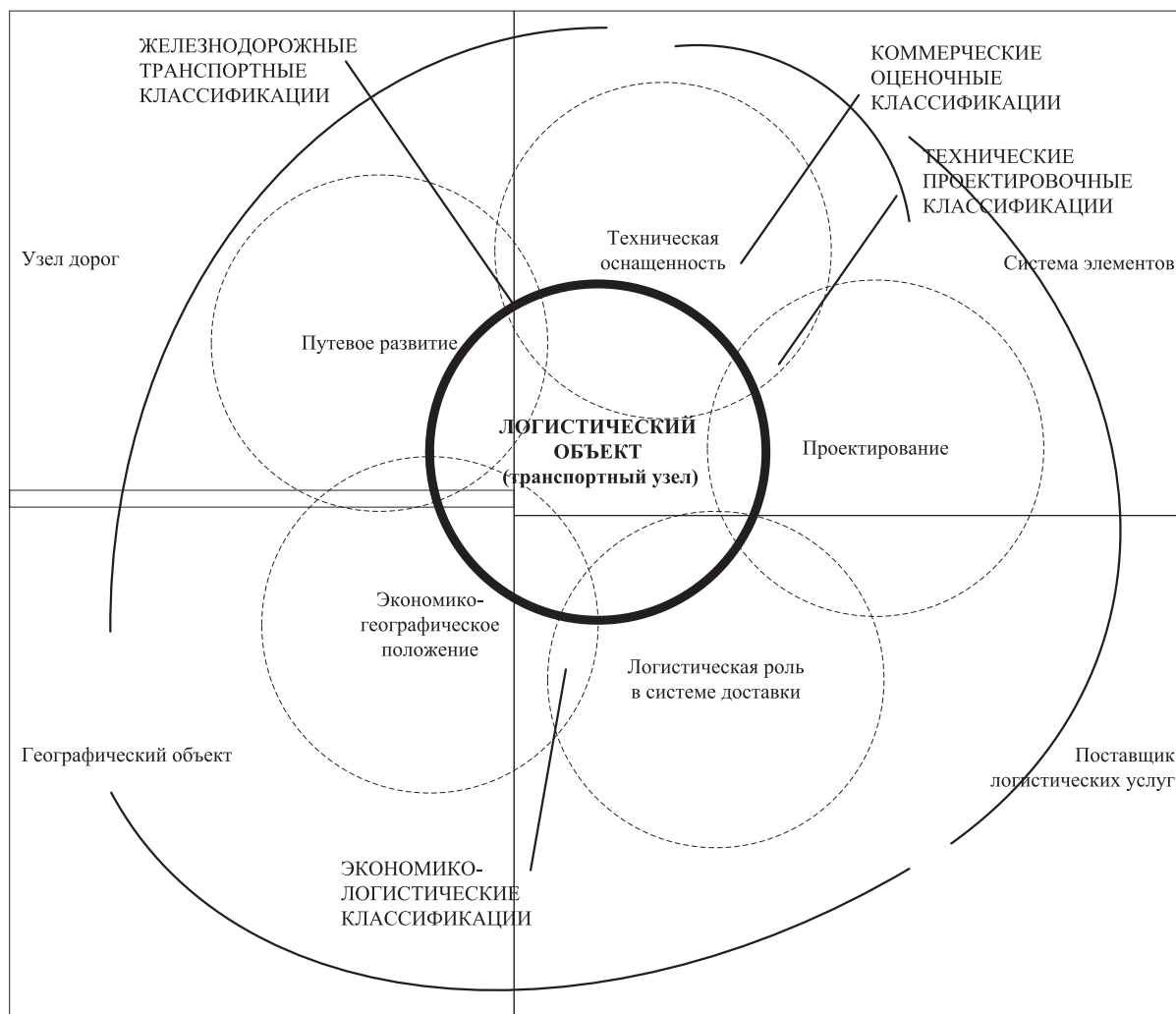


Рис. 1. Области (ареалы) существующих классификаций ТУ, дающих представление о логистических объектах (составлено на основе анализа работ [5–17])

стических услуг с учетом его дислокации и комплексности сервиса.

Ключевыми признаками этих классификаций являются: путевое развитие, техническая оснащенность, проектирование, логистическая роль в системе доставки, экономико-географическое положение. К сожалению, все признаки разрозненны, отсутствует единый подход к развитию ТУ. Например, железнодорожный аспект понимания и типологии ТУ охватывает только такие области как техническая оснащенность, путевое развитие и экономико-географическое положение. На рис. 1 видно, что перечисленные аспекты смещаются относительно ТУ, поскольку освещают только одну «ипостась» его многообраз-

ной деятельности. Вместе с тем все указанные области (ареалы) формируют комплекс исследований для терминалистики.

Таким образом, усложнение ассортимента логистического сервиса, множество подходов к организации работы ТУ, повышение качественных требований к ним объективно требуют оформления всех знаний о транспортных узлах в самостоятельную отрасль – терминалистику.

### Научная новизна работы

В данной работе представлены некоторые теоретические положения терминалистики –

логистики ТУ и терминальных сетей [3, 4], в частности эволюционно-функциональный подход к развитию ТУ как мультимодальных логистических объектов. Терминалистика использует следующие подходы к изучению ТУ и терминальных сетей: процессный, синергетический, системный, логистический, кластерный, эволюционный. Подробно рассматривается эволюционный подход к развитию функционала ТУ. При этом полагается, что в основе ТУ – железнодорожный узел.

**Терминалистика** – логистика терминальных сетей и транспортных узлов – наука об организации, проектировании, управлении, структуре и конфигурации сетей грузовых терминалов, включая вопросы количества и дислокации узлов, функционально-технологического состава, прогнозной и экспертной оценок, а также транспортную, инфраструктурную, интеграционную, экономическую и экологическую составляющие работы региональных терминальных сетей.

**Логистический объект** – узловой элемент системы транспортно-складской инфраструктуры, выполняющий комплекс логистических функций в системе доставки груза от начального поставщика до конечного потребителя.

**Логистический район** – совокупность логистических объектов определенной степени

экономического и технологического взаимодействия, сосредоточенные по ряду признаков в пространственно-географической концентрации.

**Логистическая область** – совокупность взаимоувязанных логистических районов, обеспечивающая интеграцию в транспортные коридоры и построение устойчивой по составу и комплексности транспортно-логистического сервиса терминальной сети [3, 4].

На рис. 2 в соответствии с изложенным представлена пирамида терминалистики и иерархии ее объектов с учетом комплексности и интегрированности сервиса.

В общем случае развитие любого ТУ как логистического объекта проходит следующие стадии эволюции: 1) *узел дорог*, на которой при развитии внутриузловом взаимодействии формируются условия для оказания дополнительного сервиса и перехода на новую стадию; 2) *стыковочный пункт* видов транспорта, на которой взаимодействие становится межузловым, а сервис позволяет обслуживать сложные системы доставки грузов; 3) *мультимодальный транспортно-логистический объект*, на которой осуществляется комплексный сквозной сервис клиентуры, подвижного состава, грузов («бесшовная технология»). Это отражено на рис. 3.



Рис. 2. Пирамида терминалистики и ее объектов (составлено с учетом [18, 19])

В частности, для железнодорожных ТУ предлагается адаптировать модель Родригэ–Ноттебума [18, 19] с учетом теоретических основ терминалистики, что показано на рис. 4.

Развитие узла (сети узлов) происходит (см. рис. 4) с учетом трансформации внутренних процессов: 1) *разобщенного существования* отдельных элементов (объектов); 2) *концентрации* (укрупнения, концентрации и интеграции элементов (объектов) в узел (узловой инфраструктурный элемент); 3) *наращивания инфраструктуры* (подключение вспомогательных элементов, наращивание расширенной инфраструктурной поддержки); 4) *регионализации* с последующим выходом на новый уровень («подключением» к локальным и глобальным транспортно-логистическим системам).

Предлагаемый в настоящей работе **эволюционно-функциональный** подход к развитию ТУ иллюстрирует рис. 5, на котором представлено развитие ТУ по признаку направленности (ориентации) реализуемых транспортно-логистических услуг. В данной схеме интегрирована градация логистического сервиса и ориентации на объект обслуживания. Выделены этапы градации уровня услуг: *стандартная услуга =>> расширенная услуга =>> уникальная услуга*.

Кроме совершенствования уровня сервиса происходит поэтапное смещение ключевой ориентации сервиса: *внутренняя среда =>> внешняя среда =>> клиент*. Прочие характеристики каждого этапа приведены в соответствующих блоках на рис. 5.

В результате была разработана классификация ТУ по стадии их эволюционно-функционального развития (рис. 6). Отличительной особенностью предлагаемой классификации ТУ является синтез кластерного [20, 21] и синергетического [22] подходов к определению стадии развития ТУ как логистического объекта, с одной стороны, и самоорганизующейся сложной системы – с другой. В основу положен признак совершенства логистических решений при взаимодействии сторон логистики (с учетом рис. 2).

Так, согласно рис. 6, **стадии зарождения** отвечает стадия хаоса (хаотичного развития) ТУ. Как отмечено в центральном блоке, инфраструктурной основой выступает существующая база, соответствующее развитие которой может проходить в виде реконструкции или нового строительства. Создаются условия для формирования центра притяжения трудовых, финансовых и иных ресурсов. Однако поэтапное развитие неупорядочено, а связи технологического взаимодействия слабо развиты. Со стороны синергетического подхода наблюдается присутствие внешних возмущений (флуктуаций), которые являются условием для последующего качественного изменения, перехода на более высокий уровень упорядоченности и развития.

**Стадии зрелости** по кластерному подходу предлагается соотносить стадию бифуркации по синергетическому подходу. Два центральных блока отражают этапы роста и устойчивого роста до уровня 2- и 3-PL соответственно. Происходит последовательное расширение состава участников и ассортимента услуг, наблюдаются первые проявления мультипликативного эффекта. Отличием этапа роста от этапа устойчивого роста является направленность комплексного развития – территории в первом случае и сервиса во втором случае соответственно. Для синергетического подхода это соответствует стадии бифуркации. Бифуркацией в теории синергетики принято считать смену установившегося режима работы системы.

Основным свойством точки бифуркации является непредсказуемость последующего развития. Может произойти необратимое изменение как в прямом, так и в обратном направлении, что иллюстрирует пунктирная стрелка, возвращающая к этапу хаоса. В случае, если этап устойчивого роста успешно пройден ТУ в своем развитии, то заключительным этапом зрелости становится качественное развитие (в отличие от начального количественного). Ему соответствует третья стадия по синергетическому подходу – стадия порядка.



Рис. 3. Укрупненная эволюция сущности ТУ

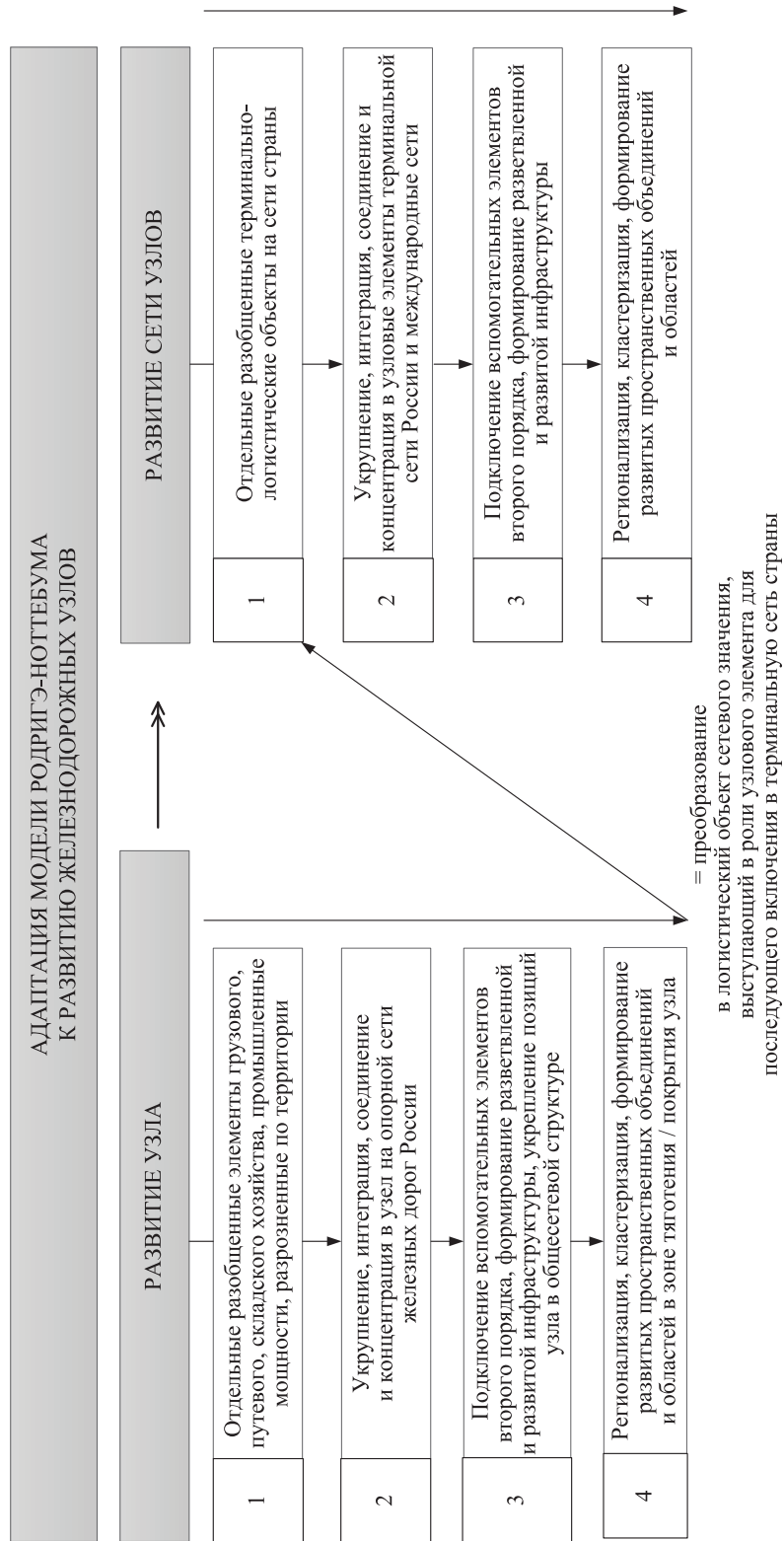


Рис. 4. Адаптация модели Родригэ–Ногтебума к железнодорожным ТУ

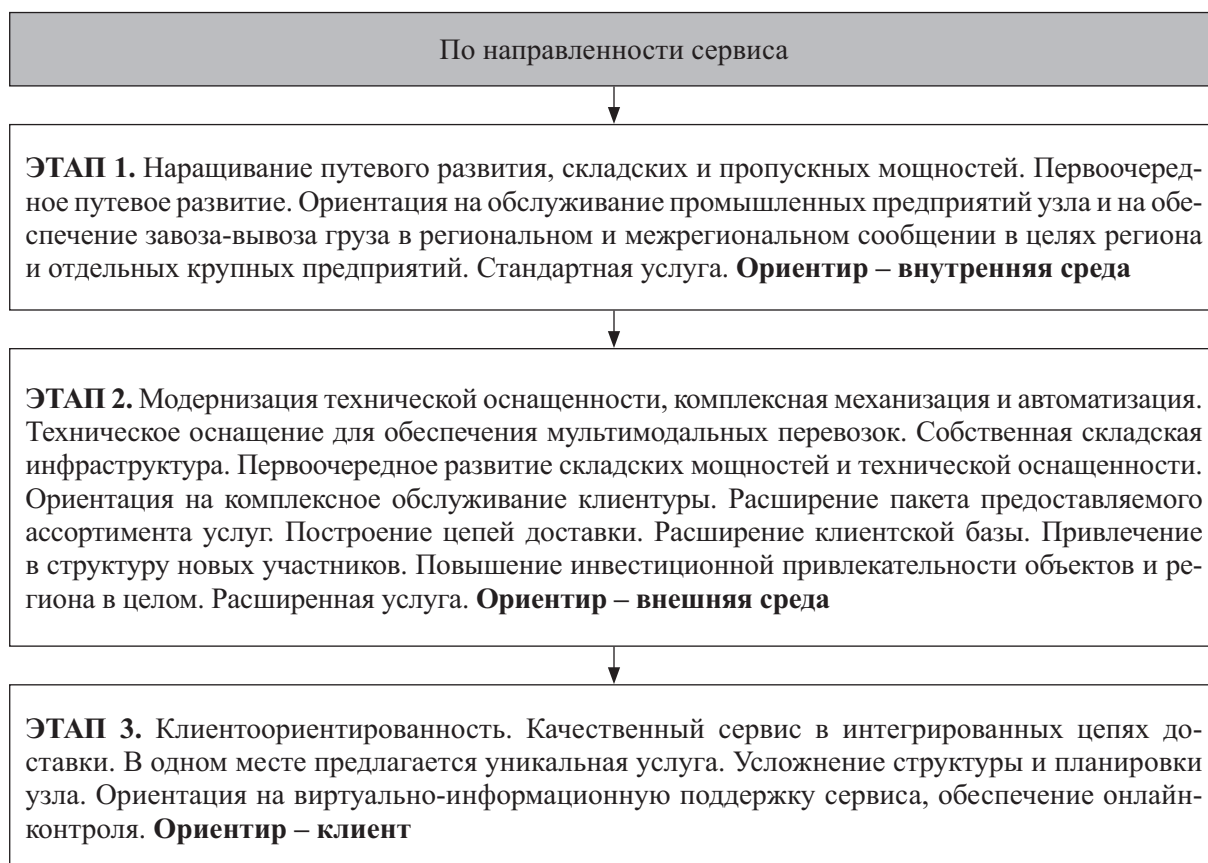


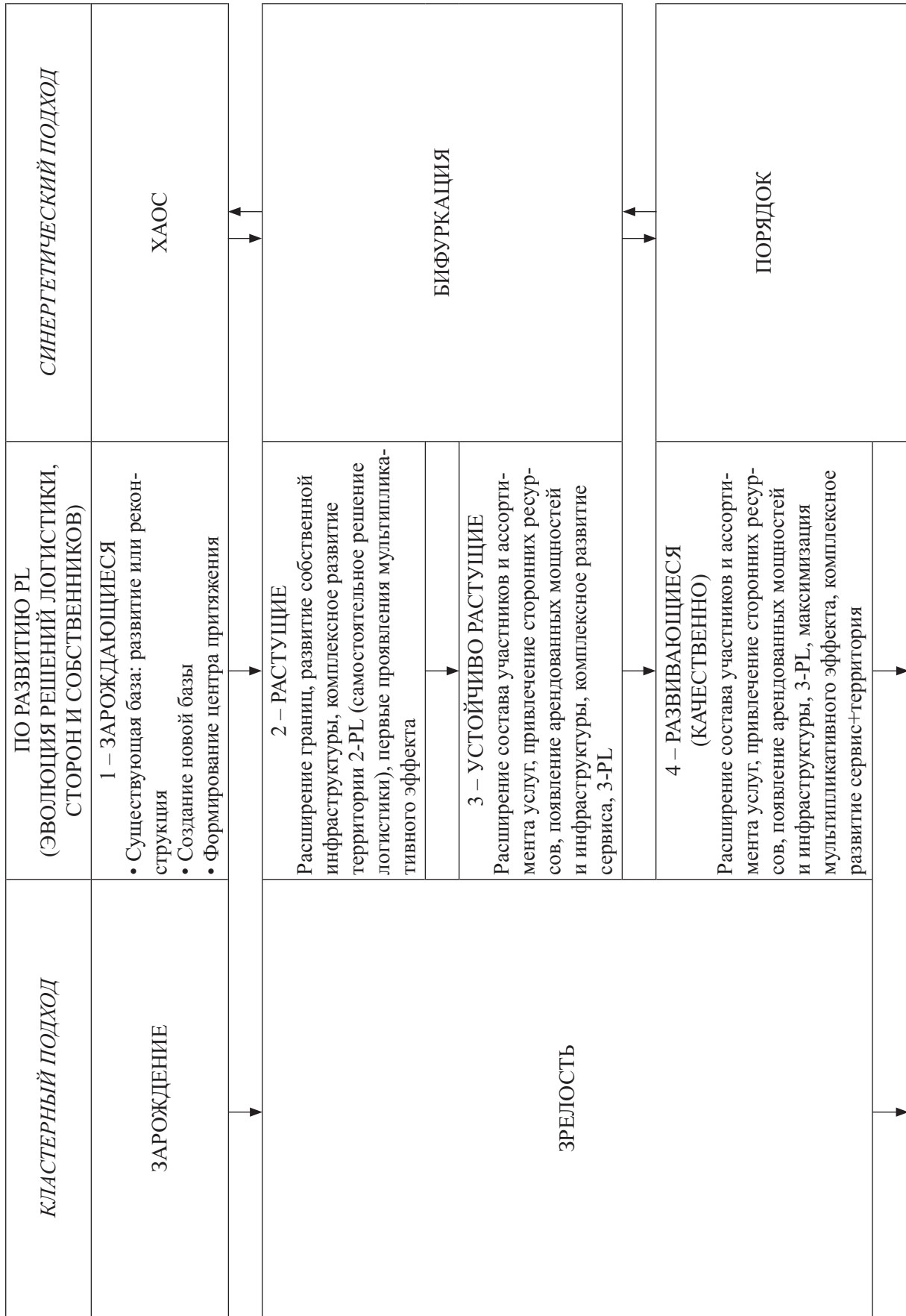
Рис. 5. Этапное развитие ТУ по ориентации реализуемых услуг

**Стадии стагнации** по кластерному подходу также отвечает стадия порядка по синергетическому. Наблюдается цикличность развития, связанная с новым обращением к количественному росту, отличным от предыдущего этапа своим масштабам. На этой стадии может происходить интеграция (взаимно равное проникновение, слияние или поглощение более крупным объектом) или метаморфозы в более крупный объект. Итогом развития на данной стадии является формирование крупного объекта и инфраструктурных условий для выхода по цепи *город =>> регион =>> транспортный коридор*.

**Стадии деградации** по кластерному подходу соответствует хаос по синергетическому подходу. Основная нагрузка ТУ здесь переносится в новый район местного или стороннего происхождения либо в новый перспективный пункт взаимодействия видов транспорта.

В рамках эволюционно-функционального подхода на рис. 7 предлагается классификация ТУ по форме выражения мультипликативного эффекта [23].

Мультипликативный эффект по области покрытия может быть тотальный, локальный или комплексный. При этом эффективное развитие ТУ может давать эффект как в связанных с транспортно-складской логистикой отраслях, так и в несвязанных. В последних это социальный и финансовый эффекты. В связанных отраслях виды эффектов разделены по типу объекта-получателя результатов – это эффекты для железнодорожного перевозчика, региона присутствия, транспортно-логистической и производственной компаний. Кроме того, внутри каждой из выделенных областей эффективности один и тот же ТУ может инициировать не один, а целый ряд сопутствующих изменений. Мультипликативный эффект, та-





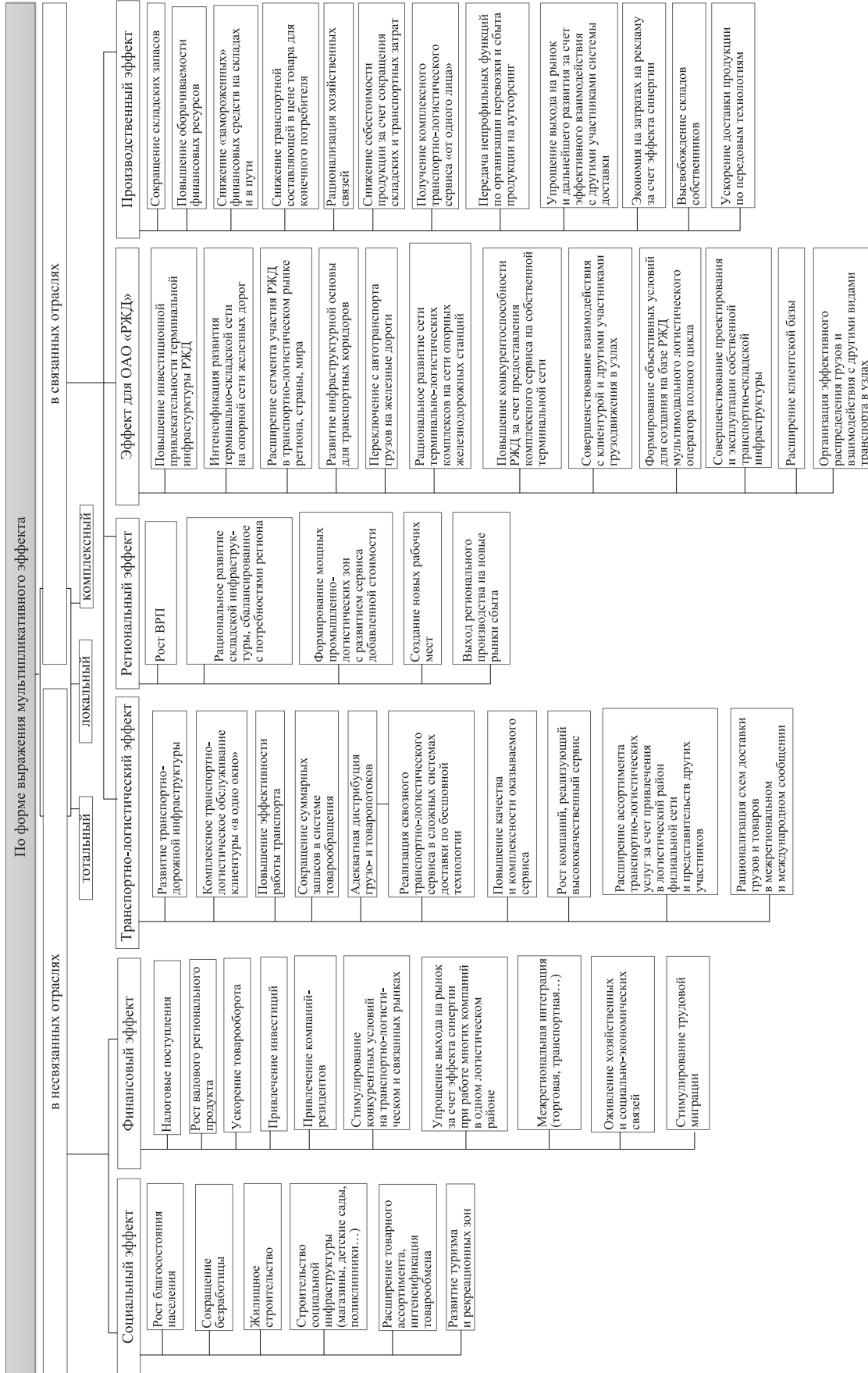


Рис. 7. Классификация ТУ по форме выражения мультипликативного эффекта



ким образом, будет полиаспектным. Данная классификация (рис. 7) справедлива для ТУ, находящихся на любой стадии эволюционно-функционального развития.

## Заключение

В данной работе охарактеризован эволюционно-функциональный подход, который может применяться как методология изучения особенностей зарождения и развития ТУ.

Представлена пирамида терминалистики и иерархии ее объектов с учетом комплексности и интегрированности сервиса как адаптированный вариант теории Ж.-П. Родригэ. Показана логика функциональной эволюции логистических объектов и их роли в общей теории терминалистики.

Для железнодорожных ТУ предложена четырехэтапная адаптированная модель Родригэ–Ноттебума с учетом теоретических основ терминалистики.

На основе анализа существующих классификационных и эволюционных подходов к развитию ТУ разработана классификация ТУ по направленности сервиса, в которой интегрирована градация логистического сервиса и ориентации на объект обслуживания.

Построена также в рамках эволюционно-функционального подхода классификация ТУ по проявлению мультипликативного эффекта в связанных и несвязанных отраслях, применимая для ТУ, находящихся на любой стадии развития.

Результатом проведенного исследования стала разработка классификации ТУ по шести стадиям их эволюционно-функционального развития, при интеграции кластерного и синергетического подходов. Эволюционно-функциональный подход может стать инструментом для определения стадии развития логистики любых ТУ. Он отражает целый комплекс важных для логистики ТУ параметров: инфраструктурная основа, география, направленность сервиса, особенности регионального развития и развития логистических решений (PL).

## Библиографический список

1. Стратегия развития железнодорожного транспорта РФ на период до 2030 года. – М. : Красный пролетарий, 2008. – 183 с.
2. Покровская О. Д. «Сбитый прицел» клиентоориентированности / О. Д. Покровская // РЖД-Партнер. – 2016. – URL: <http://www.rzd-partner.ru/interviews/mneniia/sbityi-pritsel-klientoorientirovannosti/?print> (дата обращения: 11.01.2017).
3. Покровская О. Д. Терминалистика как новое научное направление / О. Д. Покровская // Путь науки. – 2014. – № 3 (3). – С. 21–24.
4. Pokrovskaya O. D. Chi terminelistica reale come una nuova direzione scientific / O. D. Pokrovskaya // Italian Science Review. – 2016. – N 1 (34). – P. 112–116.
5. Ефименко Ю. И. Железнодорожные станции и узлы / Ю. И. Ефименко, В. И. Апатцев, Н. В. Правдин и др. ; под ред. В. И. Апатцева, Ю. И. Ефименко. – М. : Учеб.-метод. центр по образованию на ж.-д. транспорте, 2014. – 450 с.
6. Правдин Н. В. Проектирование инфраструктуры железнодорожного транспорта (станции, железнодорожные и транспортные узлы) / Н. В. Правдин, С. П. Вакуленко, А. К. Головнич и др. ; под ред. Н. В. Правдина, С. П. Вакуленко. – М. : Маршрут, 2014. – 1086 с.
7. Бройтман Э. З. Железнодорожные станции и узлы / Э. З. Бройтман. – М. : Маршрут, 2004. – 324 с.
8. Маликов О. Б. Перевозки и складирование товаров в цепях поставок : монография / О. Б. Маликов. – М. : Учеб.-метод. центр по образованию на ж.-д. транспорте, 2014. – 536 с.
9. Классификация складских помещений Knightfrank. – URL : <http://www.knightfrank.ru/resources/pdf/research/ind.pdf> (дата обращения: 11.01.2017).
10. Савченко И. Е. Железнодорожные станции и узлы / И. Е. Савченко, С. В. Земблинов, И. И. Страковский. – Изд. 2-е, перераб. и доп. – М. : Транспорт, 1967. – 467 с.
11. Земблинов С. В. Основы построения транспортных узлов / С. В. Земблинов, В. А. Бураков, А. М. Обермейстер и др. ; под общ. ред. С. В. Земблинова. – М. : Транспорт, 1959. – 47 с.

12. Стыковые пункты транспортных узлов / под ред. К. Ю. Скалова, Г. С. Молярчук. – М. : Транспорт, 1977. – 184 с.

13. Прокофьева Т. А. Логистические центры в транспортной системе России : учеб. пособие / Т. А. Прокофьева, В. И. Сергеев. – М. : Издат. дом «Экономическая газета», 2012. – 522 с.

14. Балалаев А. С. Транспортно-грузовые системы железных дорог : учеб. пособие / А. С. Балалаев, И. А. Чернышова, А. Ю. Костенко. – Хабаровск : Изд-во ДВГУПС, 2006. – 108 с.

15. Елисеев С. Ю. Система логистического управления взаимодействием с морскими и речными портами и другими видами транспорта : монография / С. Ю. Елисеев. – М. : ВИНТИ РАН, 2005. – 96 с.

16. Дыбская В. В. Управление складированием в цепях поставок / В. В. Дыбская. – М. : Альфа-Пресс, 2009. – 720 с.

17. Миротин Л. Б. Логистика, технология, проектирование складов, транспортных узлов и терминалов / Л. Б. Миротин, А. В. Бульба, В. А. Демин. – Ростов н/Д. : Феникс, 2009. – 408 с.

18. Rodrigue J.-P. The Geography of Transport Systems / J.-P. Rodrigue, C. Comtois, B. Slack. – London ; New York : Taylor & Francis e-Library. 2006. – 259 p.

19. Notteboom T. Inland terminals within North American and European supply chains / T. Notteboom, J.-P. Rodrigue // Transport and Communications. Bulletin for Asia and the Pacific. – 2009. – N 78. – P. 21–26.

20. Портер М. Конкуренция / пер. с англ. О. Л. Пелевского и др. ; под ред. Я. В. Заболоцкого и др. – М. : ИД «Вильямс», 2005. – 344 с.

21. Кибалов Е. Б. Транспортно-логистический кластер Новосибирской области: модель формирования и оценки эффективности / Е. Б. Кибалов, К. Л. Комаров, К. А. Пахомов // Регион: экономика и социология. – 2007. – № 3. – С. 42–54.

22. Пригожин И. Р. Философия нестабильности / И. Р. Пригожин // Вопросы философии. – 1991. – № 6. – С. 18–27.

23. Покровская О. Д. Формирование терминальной сети региона для организации перевозок грузов : монография / О. Д. Покровская. – М. : Транслит, 2012. – 192 с.

## References

1. *Strategiya razvitiya zheleznodorozhnogo transporta RF na period do 2030 goda [The development strategy of railway transport of the Russian Federation for the period up to 2030]*. Moscow, Krasniy proletariy Publ., 2008, 183 p. (In Russian)

2. Pokrovskaya O. D. “Sbytiy prytsel” kliientoorientirovannosti [“Upset gunsight” of customer-oriented approach]. *RZhD-Partner*, 2016. – URL: <http://www.rzd-partner.ru/interviews/mneniia/sbytiy-pritsel-klientoorientirovannosti/?print> (accessed: 11.01.2017). (In Russian)

3. Pokrovskaya O. D. Termynalistika kak novoye nauchnoye napravleniye [Terminalistics as a new school]. *Put nauky [Science path]*, 2014, no. 3 (3), pp. 21–24. (In Russian)

4. Pokrovskaya O. D. Chi terminelistica reale come una nuova direzione scientific. *Italian Science Review*, 2016, no. 1 (34), pp. 112–116.

5. Yefimenko Y. I., Apattsev V. I., Pravdyn N. V. et al. *Zheleznodorozhniye stantsii i uzly [Railway stations and transport nodes]*. Moscow, Uchebno-metodycheskiy tsentr po obrazovaniju na zheleznodorozhnom transporte [Learning and teaching educational centre of railway transport] Publ., 2014, 450 p. (In Russian)

6. Pravdyn N. V., Vakulenko S. P., Golovnich A. K. & et al. *Proyektyrovaniye infrastruktury zheleznodorozhnogo transporta (stantsii, zheleznodorozhniye i transportniye uzly) [Railroad transport infrastructure designing (stations, railway junctions and transport nodal points)]*. Moscow, Marshrut Publ., 2014, 1086 p. (In Russian)

7. Broymtan E. Z. *Zheleznodorozhniye stantsii i uzly [Railway stations and transport nodes]*. Moscow, Marshrut Publ., 2004, 324 p. (In Russian)

8. Malykov O. B. *Perevozky i skladyrovaniye tovarov v tsepyakh postavok [Traffic and storing in supply chains]*. Moscow, Uchebno-metodycheskiy tsentr po obrazovaniju na zheleznodorozhnom transporte [Learning and teaching educational centre of railway transport] Publ., 2014, 536 p. (In Russian)

9. *Klassifikatsiya skladnykh pomesheniy Knightfrank [Knightfrank storages' classification]*. – URL: <http://www.knightfrank.ru/resources/pdf/research/ind.pdf> (accessed: 11.01.2017). (In Russian)

10. Savchenko I. Y., Zemblynov S. V. & Strakovskiy I. I. *Zheleznodorozhniye stantsii i uzly* [Railway stations and transport nodes]. 2<sup>nd</sup> edition, updated and revised. Moscow, Transport Publ., 1967, 467 p. (In Russian)
11. Zemblinov S. V., Burakov V. A., Obermeister A. M. et al. *Osnovy postroyeniya transportnykh uzlov* [Transport nodal points' construction foundations]. Moscow, Transport Publ., 1959, 47 p. (In Russian)
12. *Stykoviye punkty transportnykh uzlov* [Transport division points]. Ed. by K. Y. Skalov & G. S. Molyarchuk. Moscow, Transport Publ., 1977, 184 p. (In Russian)
13. Prokopfyeva T. A. & Sergeev V. I. *Logisticheskiye tsentry v transportnoy sisteme Rossii* [Logistic centers in the transport system of Russia]. Moscow, Ekonomicheskaya gazeta Publ., 2012, 522 p. (In Russian)
14. Balalayev A. S., Chernyshova I. A. & Kostenko A. Y. *Transportno-gruzoviye sistemy zheleznikh dorog* [Railway transport and cargo systems]. Khabarovsk, DVGUPS Publ., 2006, 108 p. (In Russian)
15. Yeliseyev S. Y. *Systema logisticheskogo upravleniya vzaimodeystviyem s morskimi i rechnymi portami i drugimi vydamy transporta* [The system of logistical control of sea ports and river ports and other types of transport interaction]. Moscow, VINITI RAN Publ., 2005, 96 p. (In Russian)
16. Dybskaya V. V. *Upravleniye skladyrovaniyem v tsepyakh postavok* [Storing management in supply chains]. Moscow, Alpha-Press Publ., 2009, 720 p. (In Russian)
17. Myrotyn L. B., Bulba A. V. & Demyn V. A. *Logistika, tekhnologiya, proyektirovaniye skladov, transportnykh uzlov i termynalov* [Logistics, technology, designing of stores, transport nodal points and rail-heads]. Rostov-on-Don, Phoenix Publ., 2009, 408 p. (In Russian)
18. Rodrigue J.-P., Comtois C. & Slack B. *The Geography of Transport Systems*. London, New York, Taylor & Francis e-Library Publ, 2006, 259 p.
19. Notteboom T. & Rodrigue J.-P. Inland terminals within North American and European supply chains. *Transport and Communications. Bulletin for Asia and the Pacific*, 2009, no. 78, pp. 21–26.
20. Porter M. *Konkurentsia* [On competition]. Tr. from Eng. by Pelevskiy O. L. et al. Moscow, PH "Williams" Publ., 2005, 344 p. (In Russian)
21. Kybalov Y. B., Komarov K. L. & Pakhomov K. A. *Transportno-logisticheskiiy klaster Novosibirskoy oblasti: model formirovaniya i otsenki effektivnosti* [Logistics cluster of Novosibirsk region: formation and assessment of efficiency model]. *Region: economics and sociology*, 2007, no. 3, pp. 42–54. (In Russian)
22. Prygozhyn I. R. *Philosophiya nestablynosti* [The philosophy of instability]. *Voprosy filosofii* [Philosophy issues], 1991, no. 6, pp. 18–27. (In Russian)
23. Pokrovskaya O. D. *Formirovaniye termynalnoy sety regiona dlya organizatsii perevozok gruzov* [Region's terminal network formation for organization of goods traffic]. Moscow, TransLit Publ., 2012, 192 p. (In Russian)

\*ПОКРОВСКАЯ Оксана Дмитриевна – канд. техн. наук, доцент, insight1986@inbox.ru; МАЛИКОВ Олег Борисович – доктор техн. наук, профессор (Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I).



УДК 004.056.53

Г. А. Бекбаев, А. А. Привалов, Н. Б. Ачкасов, А. О. Кравцов

## МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА «DDoS»-АТАКИ НА ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННУЮ СЕТЬ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА

Дата поступления: 09.06.2017

Решение о публикации: 09.06.2017

### Аннотация

**Цель:** Определить среднее время и функцию распределения времени успешной реализации нарушителем компьютерной «DDoS»-атаки на элементы телекоммуникационной сети железнодорожного транспорта (ТКСЖТ). **Методы:** Для решения задачи применялись методы общей теории систем, теории информационной безопасности, теории вероятностей, теории массового обслуживания, а также метод топологического преобразования стохастических сетей (ТПСС). Расчеты производились с применением пакета прикладных программ MathCAD. **Результаты:** Разработана математическая модель процесса реализации нарушителем «DDoS»-атаки на ТКСЖТ и найдены вероятностно-временные характеристики системы кибервоздействия нарушителя, целью которого является срыв процесса управления перевозками. **Практическая значимость:** Предложенная модель обеспечивает нахождение исходных данных для комплексной оценки устойчивости функционирования ТКСЖТ, работающей в условиях кибервоздействия нарушителя на сетевые элементы ТКСЖТ. Установлено, что эта модель адекватно отображает моделируемый процесс, чувствительна к изменению входных данных, позволяет получать непротиворечащие логике результаты, а также выявлять целесообразные направления обеспечения кибербезопасности ТКСЖТ.

**Ключевые слова:** Компьютерная атака, DDoS-атаки, топологическое преобразование стохастических сетей, эквивалентная функция, метод двухмоментной аппроксимации.

**Gamzatdyn A. Bekbayev**, postgraduate student, gamzat-86@mail.ru; **Andrey A. Pryvalov**, D. Military Sci., professor, aprivalov@inbox.ru (Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University); **Nikolay B. Achkasov**, D. Military Sci., professor, gamzat-86@mail.ru (Marshal of the Soviet Union S. M. Budyenniy Military Academy of Intercommunications); **Anton O. Kravtsov**, postgraduate student, kravcovanton@mail.ru (Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University)  
«DDoS»-ATTACK PROCESS MODEL ON TELECOMMUNICATION NETWORK OF RAILWAY TRANSPORT

### Summary

**Objective:** To determine the average time and timing function of a violator's successful realization of «DDoS»-computer attack on elements of telecommunication network of railway transport (TCNRT). **Methods:** In order to solve the task in question the methods of general systems theory, information security theory, probability theory, theory of waiting lines systems, as well as the method of stochastic networks' topological transformation (SNTT). The calculations were carried out by means of MathCAD application software package. **Results:** A symbolic model of a violator's «DDoS»-attack on TCNRT realization process was introduced, as well as the identification of probabilistic time response characteristics of

a violator's cyber impact system, whose aim is to upset transportation management process. **Practical importance:** The suggested model ensures initial data identification for integrated TCNRT functioning assessment, operating under the conditions of a violator's cyber impact on TCNRT network elements. It was found that the model in question may adequately represent the prototype process, is sensitive to input data alteration, makes it possible to obtain the results which do not contradict logic, as well as to identify the appropriate directions of TCNRT cyber safety organization.

**Keywords:** Computer attack, DDoS-attacks, topological transformation of stochastic networks, equivalent function, method of double-stage approximation.

## Введение

Обеспечение безопасности информации является весьма важным аспектом развития современного общества. В связи с тем, что в автоматизированных системах обработки информации и управления (АСОИУ) обрабатывается и хранится конфиденциальная и секретная информация, данная проблема актуальна при проектировании и эксплуатации АСОИУ [1].

Сложность обеспечения устойчивой работы современных автоматизированных систем обработки информации и управления железнодорожного транспорта (АСОИУ ЖТ) в последнее время возросла из-за участившихся случаев террористических актов, реализуемых нарушителями и сопровождающихся, как правило, информационными воздействиями на элементы АСОИУ. Информационные воздействия осуществляются нарушителем путем компьютерных атак (КА), цель которых – главный производственный процесс, реализуемый на поражаемом объекте.

Результатом воздействия КА являются блокирование управляющей информации, нарушение установленных режимов работы систем сбора, обработки и передачи информации в АСОИУ, отказы, сбои в работе телекоммуникационных сетей железнодорожного транспорта (ТКСЖТ).

В работах [1–5] приведены наиболее известные в настоящее время виды КА, из которых особое место занимают «DDoS»-атаки (Distributed Denial of Service – распределенный отказ в обслуживании). Распространен-

ность данного вида КА обусловлена простотой их реализации и тяжелыми последствиями после ее свершения. По данным «Лаборатории Касперского» [6, 7] в 2015 г. «DDoS»-атаке подверглась каждая шестая российская компания. При этом нарушители чаще всего выбирали своей мишенью крупный бизнес с государственным участием (20%), средний и малый бизнес (17%). «DDoS»-атаки были нацелены на создание проблем в работе главной страницы сайта компаний (55% атак), выведение из строя коммуникационных сервисов и почты (34%), функции, позволяющие пользователю войти в систему (23%). При этом эксперты отмечают, что Россия занимает пятое место в мире по количеству «DDoS»-атак на АСОИУ различного назначения.

Таким образом, актуализируется задача оценки возможностей нарушителя по осуществлению «DDoS»-атаки на АСОИУ ЖТ, одним из основных элементов которой является ТКСЖТ.

В настоящей статье рассматривается модель процесса свершения КА «Распределенный отказ в обслуживании» на элементы ТКСЖТ и приведен расчетный пример. Модель позволяет оценить не только потенциальные возможности нарушителя, но и время, затрачиваемое им на реализацию «DDoS»-атаки на сетевые элементы ТКСЖТ.

## Постановка задачи

Пусть имеется ТКСЖТ, которая включает в свой состав маршрутизаторы, коммутато-

ры, серверы, модемы и мультифункциональные абонентские терминалы. Положим, что сетевые элементы ТКСЖТ функционируют в условиях «DDoS»-атак организованного нарушителя.

Для реализации «DDoS»-атаки нарушитель осуществляет настройку и запуск программы, обеспечивающей формирование и направление запросов за среднее время  $\bar{t}_{\text{зап}}$  с функцией распределения времени  $W(t)$ . Далее он приступает к определению активных элементов атакуемой ТКСЖТ, типов или версии операционных систем, а также сетевых сервисов за среднее время  $\bar{t}_{\text{оп.элемент}}$ ,  $\bar{t}_{\text{оп.ос}}$ ,  $\bar{t}_{\text{оп.серв}}$  с функциями распределения  $M(t)$ ,  $D(t)$ ,  $L(t)$ . Указанные действия нарушитель реализует успешно с вероятностью  $P_{\text{оп.элемент}}$ ,  $P_{\text{оп.ос}}$  и  $P_{\text{оп.серв}}$  соответственно. Расчет  $P_{\text{оп.элемент}}$ ,  $P_{\text{оп.ос}}$ ,  $P_{\text{оп.серв}}$  осуществляется с использованием [8–12]. Если хотя бы один из перечисленных частных процессов организованному нарушителю реализовать не удалось, то они возобновляются с вероятностями  $(1 - P_{\text{оп.элемент}})$ ,  $(1 - P_{\text{оп.ос}})$  и  $(1 - P_{\text{оп.серв}})$  соответственно через среднее время  $\bar{t}_{\text{повт.с.скач}}$  с функцией распределения  $Z(t)$ . Далее нарушитель анализирует полученные данные и определяет уязвимости элементов атакуемой сети за среднее время  $\bar{t}_{\text{оп.уязв}}$  с функцией распределения времени  $K(t)$ . После успешной реализации перечисленных выше частных процессов нарушитель отправляет запросы на подключение к серверам атакуемой ТКСЖДС за среднее время  $\bar{t}_{\text{запр}}$  с функцией распределения времени  $Y(t)$ . Возможность подключения к атакуемому серверу характеризуется вероятностью  $P_{\text{под.с}}$ , а получение ответа о его состоянии происходит через среднее время  $\bar{t}_{\text{дос.к.серв}}$  с функцией распределения времени  $U(t)$ . В случае не получения доступа нарушитель направляет повторный запрос за среднее время  $\bar{t}_{\text{пов.запр}}$  с функцией распределения времени  $V(t)$ . В случае успешной реализации всех частных процессов организованный нарушитель отправляет большое число анонимных ложных запросов на подключение и из-за переполнения оперативной памяти серверное оборудование ТКСЖТ

будет не в состоянии обрабатывать запросы легитимных пользователей. Такая блокировка серверов осуществляется за среднее время  $\bar{t}_{\text{завис}}$  с функцией распределения  $N(t)$ .

Требуется определить среднее время и функцию распределения  $F(t)$  времени реализации нарушителем «DDoS»-атаки.

## Ограничения и допущения

Нарушитель имеет доступ к элементам ТКСЖТ, характеризуемый соответствующими вероятностными показателями, указанными в постановке задачи.

Случайное время реализации частных процессов характеризуется экспоненциальным распределением.

Вероятности  $P_{\text{оп.элемент}} = P_{\text{оп.ос}} = P_{\text{оп.серв}} = P_{\text{под.с}} = P_n$  принимают одинаковые значения.

## Решение

Представим описанный в постановке задачи процесс в виде стохастической сети на рис. 1.

Примем, что в стохастической сети:  $w(s)$ ,  $m(s)$ ,  $z(s)$ ,  $d(s)$ ,  $l(s)$ ,  $k(s)$ ,  $y(s)$ ,  $v(s)$ ,  $u(s)$  и  $n(s)$  – преобразование Лапласа–Стилтьеса соответствующих функций распределения, указанных в постановке задачи, определяемые как

$$r_i(s) = \int_0^{\infty} \exp(-st) d[R_i(t)] = \frac{r_i}{r_i + s}.$$

С целью определения эквивалентной функции (рис. 1) замкнем вход и выход стохастической сети фиктивной ветвью  $Q_a(s) = \frac{1}{Q(s)}$  и перечислим петли первого и второго порядков [13].

### Петли первого порядка:

- $m(s) \cdot (1 - P_n) \cdot z(s)$ ;
- $m(s) \cdot d(s) \cdot P_n \cdot (1 - P_n) \cdot z(s)$ ;
- $m(s) \cdot d(s) \cdot l(s) \cdot P_n^2 \cdot (1 - P_n) \cdot z(s)$ ;
- $y(s) \cdot (1 - P_n) \cdot v(s)$ .

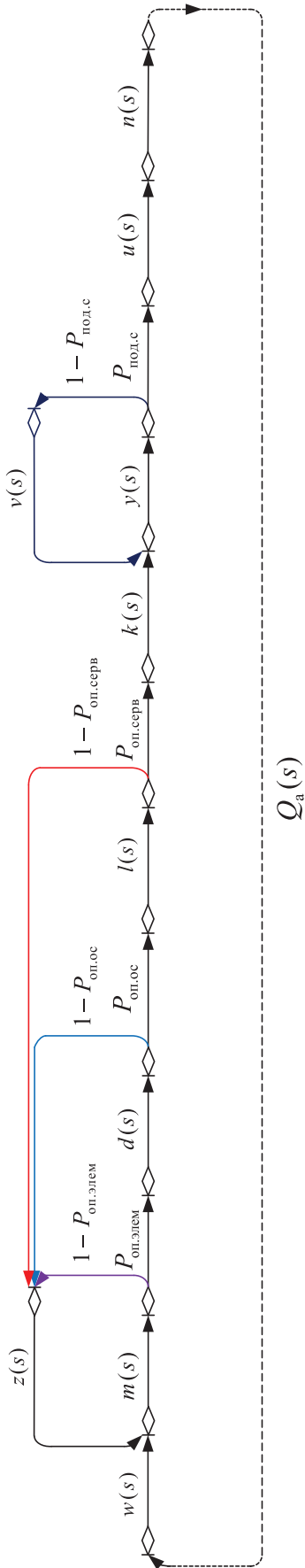


Рис. 1. Стохастическая сеть процесса КА «DDoS»

**Петли второго порядка:**

- $m(s) \cdot (1 - P_n)^2 \cdot z(s) \cdot y(s) \cdot v(s)$ ;
- $m(s) \cdot d(s) \cdot P_n \cdot (1 - P_n)^2 \cdot z(s) \cdot y(s) \cdot v(s)$ ;
- $m(s) \cdot d(s) \cdot l(s) \cdot P_n^2 \cdot (1 - P_n)^2 \cdot z(s) \cdot y(s) \times v(s)$ .

Использував уравнение Мейсона  $H = 1 + \sum_{i=1}^k (-1)^k \cdot Q_k(s) = 0$ , где  $Q_k(s)$  -эквивалентные функции петель  $k$ -го порядка, получим эквивалентную функцию стохастической сети:

$$Q(s, P_n) = \frac{w(s) \cdot m(s) \cdot d(s) \cdot l(s) \cdot k(s) \cdot y(s) \cdot u(s) \cdot n(s) \cdot P_n^4}{1 - m(s) \cdot (1 - P_n) \cdot z(s) \cdot [1 + d(s) \cdot P_n + d(s) \times l(s) \cdot P_n^2] - y(s) \cdot (1 - P_n) \cdot v(s) + m(s) \cdot (1 - P_n)^2 \cdot z(s) \cdot y(s) \cdot v(s) \times [1 + d(s) \cdot P_n + d(s) \cdot l(s) \cdot P_n^2]} \quad (1)$$

Так как (1), по определению, является характеристической функцией, то ее дифференцирование позволяет найти первый и второй начальные моменты случайного времени реализации моделируемого процесса, т. е.

$$M_1(s, P_n) = - \frac{d}{ds} \left[ \frac{Q(s, P_n)}{Q(s = 0, P_n)} \right]_{s=0},$$

$$M_2(s, P_n) = \frac{d^2}{ds^2} \left[ \frac{Q(s, P_n)}{Q(s = 0, P_n)} \right]_{s=0}.$$

Отсюда среднее время реализации «DDoS»-атаки равно

$$\bar{t}_p(P_n) = - \frac{d}{ds} \left[ \frac{Q(s, P_n)}{Q(s = 0, P_n)} \right]_{s=0}.$$

Дисперсия времени реализации «DDoS»-атаки  $D(\bar{t}_p)$ , определяемая как второй центральный момент, представлена выражением

$$D(\bar{t}_p) = \frac{d^2}{ds^2} \left[ \frac{Q(s, P_n)}{Q(s=0, P_n)} \right]_{s=0} - \left\{ -\frac{d}{ds} \left[ \frac{Q(s, P_n)}{Q(s=0, P_n)} \right]_{s=0} \right\}^2.$$

Вычисление математического ожидания и дисперсии позволяет с достаточной для инженерных расчетов точностью определить функцию распределения времени успешной реализации «DDoS»-атаки как неполную гамма-функцию [13]:

$$F(t) = \begin{cases} 0, & \text{если } t < 0; \\ \int_0^t \frac{\mu^\alpha}{\Gamma(\alpha)} \cdot t^{\alpha-1} \cdot e^{-\mu t} dt, & \text{если } t > 0, \end{cases} \quad (2)$$

где  $\alpha = \frac{[\bar{t}_p(P_n)]^2}{D(\bar{t}_p)}$  – параметр формы;  $\mu = \frac{\bar{t}_p(P_n)}{D(\bar{t}_p)}$  – параметр масштаба.

По формуле (2) произведены расчеты, результаты которых представлены на рис. 2.

В качестве исходных данных использовались следующие значения среднего времени реализации частных процессов:  $\bar{t}_{\text{зап}} = 2$  м,  $\bar{t}_{\text{оп.элемент}} = 7$  м,  $\bar{t}_{\text{оп.ос}} = 5$  м,  $\bar{t}_{\text{оп.серв}} = 6$  м,

$$\begin{aligned} &= \bar{t}_{\text{оп.уязв}} = 7 \text{ м}, \bar{t}_{\text{повт.ск}} = 4 \text{ м}, \bar{t}_{\text{запр}} = 4 \text{ м}, \\ &\bar{t}_{\text{дос.к.серв}} = 1 \text{ м}, \bar{t}_{\text{пов.запр}} = 4 \text{ м}, \bar{t}_{\text{завис}} = 3 \text{ м}, \\ &P_{\text{оп.элемент}} = P_{\text{оп.элемент}} = P_{\text{оп.ос}} = P_{\text{оп.серв}} = P_{\text{под.с}} = \\ &= P_n = 0,7-0,9. \end{aligned}$$

## Заключение

Анализ полученных результатов показывает, что разработанная модель процесса реализации нарушителем «DDoS»-атаки на элементы ТКСЖТ чувствительна к изменению исходных данных, позволяет получать не противоречащие логике результаты, адекватно отображает процесс компьютерной атаки и дает возможность определить вероятностно-временные характеристики системы кибервоздействия нарушителя. Вероятностно-временные характеристики можно применить как исходные данные для комплексной оценки устойчивости функционирования ТКСЖТ с использованием моделей [12, 14]. Результаты моделирования показывают, что основное влияние на успешность реализации нарушителем DDoS-атаки на элементы ТКСЖТ оказывают параметры, отображающие его доступность к сетевым элементам, применяемые в ТКСЖТ методы идентификации и аутенти-

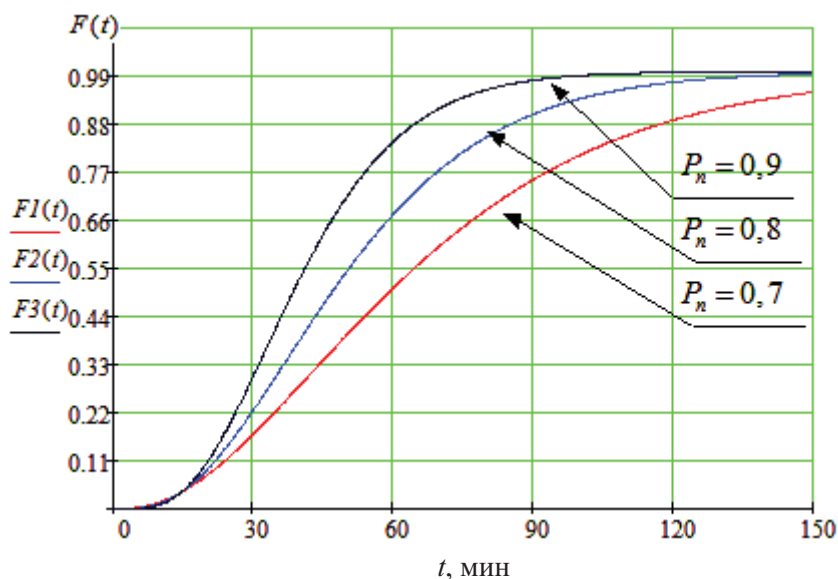


Рис. 2. Функция распределения времени реализации КА «DDoS» при изменении вероятности  $P_n$



фикации легитимных пользователей, а также уровень подготовки (квалификации) нарушителя. Для повышения защищенности ТКСЖТ от кибервоздействия нарушителя целесообразна реализация организационно-технических мероприятий, изложенных в [15].

## Библиографический список

1. Коцыняк М. А. Устойчивость информационно-телекоммуникационных сетей / М. А. Коцыняк, И. А. Кулешов, О. С. Лаута. – СПб. : Изд-во Политехн. ун-та, 2013. – 92 с.

2. Коцыняк М. А. Обеспечение устойчивости информационно-телекоммуникационных сетей в условиях информационного противоборства / М. А. Коцыняк, А. И. Осадчий, М. М. Коцыняк, О. С. Лаута, В. Е. Дементьев, Д. Ю. Васюков. – СПб. : ЛО ЦНИИС, 2014. – 126 с.

3. Зегжда Д. П. Основы безопасности информационных систем / Д. П. Зегжда, А. М. Ивашко. – М. : Горячая линия – Телеком, 2000. – 452 с.

4. Конахович Г. Ф. Защита информации в телекоммуникационных системах / Г. Ф. Конахович, В. П. Климчук, С. М. Паук, В. Г. Потапов. – Киев : МК-Пресс, 2005. – 288 с.

5. Зайцев А. П. Технические средства и методы защиты информации : учебник для вузов / А. П. Зайцев, А. А. Шелупанов, Р. В. Мещеряков и др. ; под ред. А. П. Зайцева, А. А. Шелупанова. – М. : Машиностроение, 2009. – 508 с.

6. Статистический анализ «Лаборатории Касперского» по DDoS-атакам за 2015 год. – URL : <https://blog.kaspersky.ru/2015-kazhdaya-shestaya-kompaniya-v-rossii-podverglas-ddos-atakam/15027> (дата обращения : 01.02.2016).

7. Мнение экспертов «Лаборатории Касперского» по DDoS-атакам. – URL : <https://vistanews.ru/computers/security/42168> (дата обращения : 01.02.2016).

8. Радько Н. М. Риск модели информационно-телекоммуникационных систем при реализации угроз удаленного и непосредственного доступа / Н. М. Радько, И. О. Скобелев. – М. : РадиоСофт, 2010. – 232 с.

9. Ярочкин В. И. Информационная безопасность : учебник для вузов / В. И. Ярочкин. – М. : ООО «Академический проект», 2004. – 544 с.

10. Базовая модель угроз безопасности персональных данных при их обработке в информационных системах персональных данных. – Утв. заместителем директора ФСТЭК России 15.02.2008. – 70 с.

11. Методический документ «Меры защиты информации в государственных информационных системах». – Утв. ФСТЭК 11.02.2014. – 176 с.

12. Модель угроз и нарушителя безопасности персональных данных, обрабатываемых в типовых информационных системах персональных данных отрасли. – Утв. Министерством связи и массовых коммуникаций Российской Федерации 21.04.2010 г. – М., 2010. – 48 с.

13. Привалов А. А. Метод топологического преобразования стохастических сетей и его использование для анализа систем связи ВМФ / А. А. Привалов. – СПб. : ВМА, 2000. – 166 с.

14. Бекбаев Г. А. Модель для расчета устойчивости функционирования телекоммуникационной сети железнодорожной станции в условиях неблагоприятных воздействий на основе схемы функциональной целостности / Г. А. Бекбаев, А. А. Привалов // Изв. Петерб. гос. ун-та путей сообщения. – СПб. : ПГУПС, 2016. – Т. 13, вып. 4 (49). – С. 60–470.

15. Евглевская Н. В. Методика комплексной оценки информационной безопасности телекоммуникационной сети единого дорожного диспетчерского центра управления перевозками ОАО «РЖД» : дис. ... канд. техн. наук : 05.12.13 / Н. В. Евглевская. – СПб. : ПГУПС, 2016. – 164 с.

## References

1. Kotsynyak M. A., Kuleshov I. A. & Lauta O. S. *Ustoychivost informatsionno-telekommunikatsionnykh setey [Information and telecommunication networks resiliency]*. Saint Petersburg, Polytechnic University Publ., 2013, 92 p. (In Russian)

2. Kotsynyak M. A., Osadchiy A. I., Kotsynyak M. M., Lauta O. S., Demytyev V. Y. & Vasyukov D. Y. *Obespecheniye ustoychivosty informatsionno-telekommunikatsionnykh setey v usloviyakh informatsionnogo protyvoborstva [Information telecommunication networks resilience in conditions of information confrontation]*. Saint Petersburg, LO TZNIIS Publ., 2014, 126 p. (In Russian)

3. Zegzhda D. P. & Ivashko A. M. *Osnovy bezopasnosti informatsionnykh system [Information systems' safety fundamentals]*. Moscow, Hot line – Telecom Publ., 2000, 452 p. (In Russian)
4. Konakhovich G. F., Klimchuk V. P., Pauk S. M. & Potapov V. G. *Zashita informatsii v telekommunikatsionnykh systemakh [Information security in telecommunication systems]*. Kiev, MK-PRESS Publ., 2005, 288 p. (In Russian)
5. Zaitsev A. P., Shelupanov A. A., Mesheryakov R. V. et al. *Tekhnicheskiye sredstva i metody zashyty informatsii [Technical means and methods of information security]*. Moscow, LLC “Mechanical Engineering Publishing House” Publ., 2009, 508 p. (In Russian)
6. *Statisticheskiy analiz “Laboratorii Kasperskogo” po DDoS atakam za 2015 god – “[Kaspersky Laboratory] statistical analysis on DDoS attacks over 2015]*. – URL: <https://blog.kaspersky.ru/2015-kazhdaya-shestaya-kompaniya-v-rossii-podverglas-ddos-atakam/15027/>(accessed: 01.02.2016). (In Russian)
7. *Mneniye ekspertov “Laboratorii Kasperskogo” po DDoS atakam [“Kaspersky Laboratory” expert view]*. – URL: <https://vistanews.ru/computers/security/42168> (accessed: 01.02.2016). (In Russian)
8. Radko N. M. & Skobelev I. O. *Risk modely informatsionno-telekommunikatsionnykh system pry realizatsii ugroz udalennogo i neposredstvennogo dostupa [The risk of information and telecommunication systems' model in the process of remote and immediate access attacks]*. Moscow, RadioSoft Publ., 2010, 232 p. (In Russian)
9. Yarochkyn V. I. *Informatsionnaya bezopasnost [Information safety]*. Moscow, LLC “Academic project” Publ., 2004, 544 p. (In Russian)
10. *Bazovaya model ugroz bezopasnosti personalnykh dannykh pry obrabotke v informatsionnykh systemakh personalnykh dannykh [Security threat basic model of personal data safety during data handling in personal data information systems]*. Approved by FSTEC of Russia deputy director on 15.02.2008, 70 p. (In Russian)
11. *Metodycheskiy document “Mery zashyty informatsii v gosudarstvennykh informatsionnykh systemakh” [Guideline “Information security measures in federal information systems”]*. Approved by FSTEC on 11.02.2014, 176 p. (In Russian)
12. *Model ugroz i narushitelya bezopasnosti personalnykh dannykh, obrabatyvayemykh v tipovykh informatsionnykh systemakh personalnykh dannykh oblasti [Models of threats and safety violator of personal data, handled in typical IT systems of branch personal data]*. Approved by the Ministry of telecom and mass communications of the Russian Federation, dated 21.04.2010. Moscow, 2010, 48 p. (In Russian)
13. Pryvalov A. A. *Metod topologycheskogo preobrazovaniya stokhasticheskikh setey i yego ispolzovaniye dlya analiza system svyazy VMF [The method of topological transformation of stochastic networks and its application in communications control systems of the Navy]*. Saint Petersburg, Naval Academy Publ., 2000, 166 p. (In Russian)
14. Bekbayev G. A. & Pryvalov A. A. *Model dlya rascheta ustoychivosti funktsionirovaniya telekommunikatsionnoy sety zheleznodorozhnoy stantsii v usloviyakh neblagopriyatnykh vozdeystviy na osnove skhemy funktsionalnoy tselostnosti [Model for calculation of telecommunication network functioning continuity of a railway station in conditions of environmental hazard on the basis of a diagram of functional integrity]*. *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2016, vol. 13, issue 4 (49), pp. 460–470. (In Russian)
15. Yevglevskaya N. V. *Metodyka kompleksnoy otsenki informatsionnoy bezopasnosti telekommunikatsionnoy sety yedynogo dorozhnogo dyspetcherskogo tsentra upravleniya perevozkamy OAO “RZhD” [Integrated assessment method of telecommunication network information security of JSC “Russian Railways” unified centralized traffic control center]*. Cand. Diss: 05.12.13. Saint Petersburg, 2016, 164 p. (In Russian)

\*БЕКБАЕВ Гамзатдин Алеуатдинович – аспирант, [gamzat-86@mail.ru](mailto:gamzat-86@mail.ru); ПРИВАЛОВ Андрей Андреевич – доктор военных наук, профессор, [arivalov@inbox.ru](mailto:arivalov@inbox.ru) (Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I); АЧКАСОВ Николай Борисович – доктор военных наук, профессор, [gamzat-86@mail.ru](mailto:gamzat-86@mail.ru) (Военная академия связи имени Маршала Советского Союза С. М. Буденного); КРАВЦОВ Антон Олегович – аспирант, [kravcovanton@mail.ru](mailto:kravcovanton@mail.ru) (Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I).

УДК 528.063.6

**Н. А. Богданов****ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА АНАЛИЗА ИЕРАРХИЙ  
ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕКУЩЕГО СОСТОЯНИЯ ИСКУССТВЕННЫХ  
СООРУЖЕНИЙ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА НА ОСНОВЕ  
ДАННЫХ ГЕОДЕЗИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА**

Дата поступления: 20.04.2017

Решение о публикации: 10.05.2017

**Аннотация**

**Цель:** Определить ограничения пропускания подвижного состава по конструкциям искусственных сооружений железнодорожного транспорта на основании данных, полученных в режиме реального времени, от средств геодезического мониторинга и с учетом технического состояния эксплуатируемой конструкции. **Методы:** Для обработки данных геодезического мониторинга использован метод анализа иерархий (МАИ). **Результаты:** Установлена возможность применения МАИ для обработки диагностических данных от систем геодезического контроля искусственных сооружений железнодорожного транспорта и предоставления эксплуатирующей организации достоверной экспертной оценки о дальнейшей эксплуатации объекта, установки ограничений на грузоподъемность и скорость проследования по конструкциям искусственного сооружения и пропускания подвижных единиц. Проведен анализ полученных данных и на их основе разработана математическая модель, которая предоставляет экспертное заключение о выборе оптимального решения для технического состояния конструкции по средствам определения приоритетов. Рассмотрены примеры различных экспертных заключений в зависимости от технического состояния искусственного сооружения. **Практическая значимость:** Результаты исследования и разработанную математическую модель предполагается в дальнейшем использовать как элемент системы поддержки принятия решения в геоинформационной системе, предназначенной для регулирования движения поездов на участках железных дорог с учетом технического состояния объектов железнодорожной инфраструктуры.

**Ключевые слова:** Метод анализа иерархий, экспертные оценки, искусственные сооружения, геодезический мониторинг, системы поддержки принятия решений.

**Nikolay A. Bogdanov**, postgraduate student, nabogdanov85@gmail.com (Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University) HIERARCHY ANALYSIS METHOD APPLICATION FOR DETERMINATION OF THE CURRENT STATE OF RAILWAY TRANSPORT ARTIFICIAL CONSTRUCTIONS BASED ON GEODESIC MONITORING DATA

**Summary**

**Objective:** To determine passing limitations of a rolling stock along the constructive works of railroad transport based on the data, received on a real-time basis, depending on the means of geodesic monitoring and technical state of a construction in operation. **Methods:** Hierarchy analysis method (HAM) was used in order to process geodesic monitoring data. **Results:** It was established that HAM may be used in processing diagnostic data from geodesic control systems of railroad transport constructional works, as well as presenting an authoritative expert appraisal on further facility operation, setting the limits to carrying load and passing speed along the constructional works as well as moveable units admission to an operating organization. The analysis of the obtained data was conducted, on the basis of which a mathematical model was developed presenting expert judgement on the selection of optimal solution for the technical state of a construction by means of prioritizing. The examples of various expert judgements

were considered depending on the technical state of an engineering structure. **Practical importance:** It is assumed to use the results of the research in question and the developed mathematical model may be further applied as an element of a decision making support system in a geographic information system, intended to be used for traffic arrangements at railroad sections, taking into account technical state of railroad infrastructure facilities.

**Keywords:** Hierarchy analysis method, expert appraisal, constructional works, geodesic monitoring, decision making support system

Автоматизированные системы геодезического мониторинга как средства диагностики технического состояния искусственных сооружений (ИССО) широко применяются в различных сферах строительства [1–6], в том числе и на железнодорожном транспорте, как в Российской Федерации, так и за рубежом [7–11]. Использование этих систем для выявления критических моментов в работе конструкций ИССО доказало свою эффективность на всех этапах жизненного цикла объектов мониторинга. Однако внедрение таких систем влечет за собой увеличение объема данных, требующих анализа, в целях своевременного выявления отклонений, способных отрицательно сказаться на работе конструкции. Для повышения эффективности при выявлении опасных ситуаций целесообразно применение специализированных математических аппаратов, способных при минимальном участии человека в автоматизированном режиме и сжатые сроки выполнять комплексный анализ данных геодезического мониторинга и обладать функциями системы поддержки принятия решений (СППР) по определению категории технического состояния объекта мониторинга [12].

В условиях, когда численные значения измеренных величин практически не поддаются прямому сравнению, эффективно использование специализированных математических аппаратов, например метода анализа иерархий (МАИ).

МАИ был предложен американским математиком Томасом Саати и апробирован в его работах «Принятие решений методом анализа иерархий» и «Принятие решений при зависимостях и обратных связях. Аналитические сети», где была доказана эффективность применения метода экспертных оценок для

различных сфер человеческой деятельности [13, 14]. Цель, которую решает МАИ, – оценка оптимального уровня, исходя из критериев оптимального выбора, путем построения матриц парных сравнений альтернатив относительно друг друга и экспертных оценок [13–19]. МАИ позволяет структурировать альтернативные варианты в виде иерархий и производить сравнения по количественным признакам для любых сложных систем.

Цель настоящего исследования – определение текущего состояния ИССО по показаниям, полученных от средств геодезического мониторинга деформаций при помощи математического аппарата МАИ.

На протяжении всего жизненного цикла ИССО может находиться в следующих технических состояниях [12, 20]:

1) *исправное* – категория технического состояния строительной конструкции или здания и сооружения в целом, характеризующаяся отсутствием дефектов и повреждений, влияющих на снижение несущей способности и эксплуатационной пригодности;

2) *работоспособное* – категория технического состояния, при которой некоторые из численно оцениваемых контролируемых параметров не отвечают требованиям проекта, норм и стандартов, но имеющиеся нарушения требований, например по деформативности, а в железобетоне и по трещиностойкости, в данных конкретных условиях эксплуатации не приводят к нарушению работоспособности, и несущая способность конструкций с учетом влияния имеющихся дефектов и повреждений обеспечивается;

3) *ограниченно работоспособное* – категория технического состояния конструкций, при которой имеются дефекты и повреждения,

приведшие к некоторому снижению несущей способности, но отсутствует опасность внезапного разрушения и функционирование конструкции возможно при контроле ее состояния, продолжительности и условий эксплуатации;

4) *недопустимое* – категория технического состояния строительной конструкции или здания и сооружения в целом, характеризующаяся снижением несущей способности и эксплуатационных характеристик, при котором существует опасность для пребывания людей и сохранности оборудования (необходимо проведение страховочных мероприятий и усиление конструкций);

5) *аварийное* – категория технического состояния конструкции или здания и сооружения в целом, характеризующаяся повреждениями и деформациями, свидетельствующими об исчерпании несущей способности и опасности обрушения (необходимо проведение срочных противоаварийных мероприятий).

В процессе эксплуатации объект может переходить из одного состояния в другое.

Для управления работой объекта в процессе эксплуатации достаточно знать два технических состояния (работоспособное и неработоспособное), но для оптимизации процесса эксплуатации и сокращения затрат, связанных с закрытием движения поездов, введем промежуточное состояние, при котором объект контроля уже не является условно исправным, но еще не стал неисправным. В дальней-

шем такое промежуточное состояние будем называть частично исправным. Объединение по группам состояний, определенных СП 13-102–2003 [12], представлено на рис. 1.

Для реализации математической модели, основанной на методе МАИ, будем считать, что исследуемый объект будет находиться в трех альтернативных состояниях (исправное (A1), частично исправное (A2), неисправное (A3)). Для каждого альтернативного состояния по результатам расчетов определяется глобальный приоритет  $G_n$  для каждой из рассматриваемых альтернатив, напрямую зависящих от критериев выбора. Критериями выбора будут выступать данные, поступающие с датчиков, которым присваиваются значения согласно со шкалой относительной важности Саати.

Будем считать, что если измеренные параметры находятся в пределах допустимой нормы, то в соответствии с фундаментальной шкалой МАИ с датчика в блок обработки будет поступать «1». Если параметры выходят за пределы установленной нормы, но момент отказа еще не наступил, – то с датчика будет поступать «3», если критический порог уже пройден, – то «9».

Иерархическая структура МАИ представлена на рис. 2.

В качестве примера применения метода МАИ рассмотрим расчеты, произведенные для ИССО, средствами геодезического мониторинга, который осуществляется посредством использования девяти датчиков.

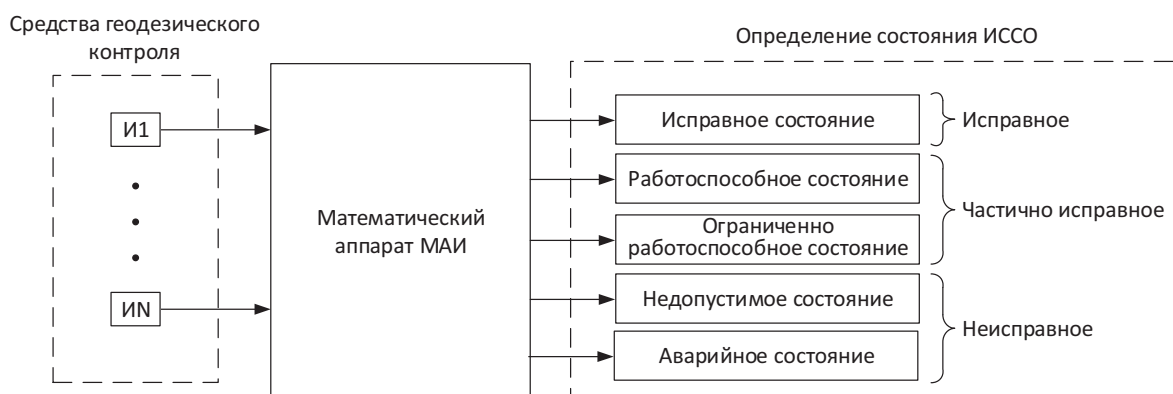


Рис. 1. Структурная схема математической модели

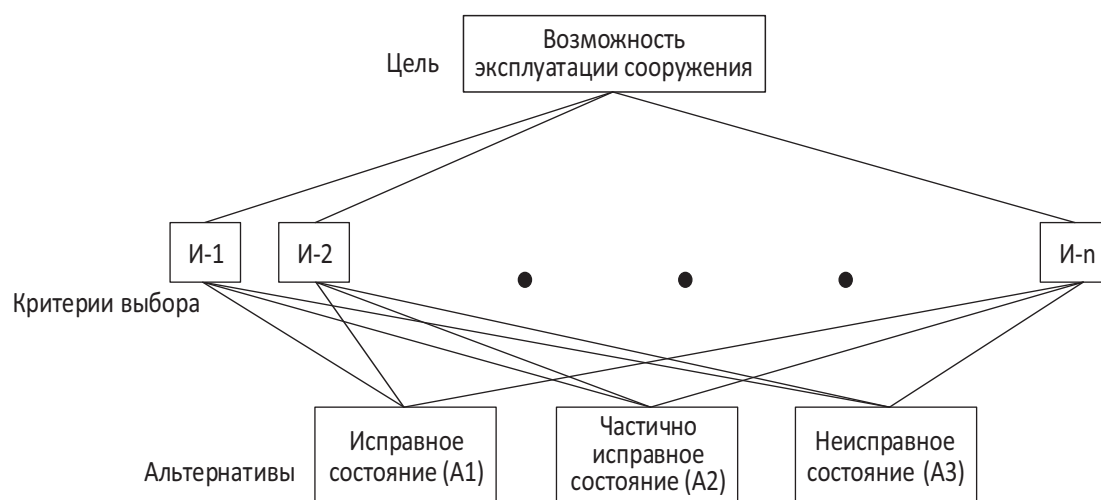


Рис. 2. Иерархическая структура модели МАИ

Последующим этапом анализа после определения альтернатив и построения иерархической структуры является составление матрицы критериев для «исправного», «частично исправного» и «неисправного» состоя-

ний ИССО, где будут установлены векторы приоритетов сравниваемых состояний (V) и проверена их прямая (ИС) и обратная (ОС) согласованность. Матрицы критериев приведены в табл. 1–3.

ТАБЛИЦА 1. Матрица критериев для «исправного» состояния (А1)

Состояние	A1	A2	A3	Произведе- ние	Среднее геометри- ческое	$\Omega$	$\Sigma$ по столбцам, * вес.
A1	1	3	9	27	3	0,69	1
A2	0,33	1	3	1	1	0,23	1
A3	0,11	0,33	1	0,03	0,33	0,07	1
$\Sigma$	1,44	4,33	13	$\Sigma$	4,33	1	3
						ИС	0
						ОС	0

ТАБЛИЦА 2. Матрица критериев для «частично исправного» состояния (А2)

Состояние	A1	A2	A3	Произведе- ние	Среднее геометри- ческое	$\Omega$	$\Sigma$ по столбцам, * вес.
A1	1	0,11	0,33	0,03	0,33	0,07	1
A2	9	1	3	27	3	0,69	1
A3	3	0,33	1	1	1	0,23	1
$\Sigma$	13	1,44	4,33	$\Sigma$	4,33	1	3
						ИС	0
						ОС	0

ТАБЛИЦА 3. Матрица критериев для «неисправного» состояния (А3)

Состояние	A1	A2	A3	Произведе- ние	Среднее геометри- ческое	Ω	Σ по столбцам, * вес.
A1	1	0,33	0,11	0,03	0,33	0,07	1
A2	9	1	0,33	1	1	0,23	1
A3	3	3	1	27	3	0,69	1
Σ	13	4,33	1,44	Σ	4,33	1	3
						ИС	0
						ОС	0

Рассмотрим работу математической модели МАИ в случае, когда со всех датчиков приходит «1». Расчеты и полученные результаты приведены в табл. 4 и 5.

Из рассчитанных величин приоритетов для «исправного состояния» получим значения альтернатив  $A1 = 0,692$ ,  $A2 = 0,230$ ,  $A3 = 0,076$ , из чего можно сделать вывод, что кон-

струкция исследуемого ИССО «логически исправна» и дальнейшая эксплуатация может осуществляться без ограничений.

В следующем примере рассмотрим вариант, при котором на датчики И2, И4 и И5 приходит «3», а на все остальные – «1». Расчеты и полученные результаты приведены в табл. 6 и 7 соответственно.

ТАБЛИЦА 4. Матрица парных сравнений для «логически исправного состояния»

Дат- чик	И1	И2	И3	И4	И5	И6	И7	И8	И9	Про- изве- дение	Среднее геометри- ческое	V
И1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0,11
И2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0,11
И3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0,11
И4	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0,11
И5	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0,11
И6	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0,11
И7	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0,11
И8	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0,11
И9	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0,11

ТАБЛИЦА 5. Матрица исходов для «логически исправного состояния»

Состоя- ние	Датчик									Резуль- тат	
	И1	И2	И3	И4	И5	И6	И7	И8	И9		
A1	0,692	0,692	0,692	0,692	0,692	0,692	0,692	0,692	0,692	0,692	0,692
A2	0,231	0,231	0,231	0,231	0,231	0,231	0,231	0,231	0,231	0,231	0,230
A3	0,077	0,077	0,077	0,077	0,077	0,077	0,077	0,077	0,077	0,077	0,076

ТАБЛИЦА 6. Матрица парных сравнений «логического частично исправного состояния»

Датчик	И1	И2	И3	И4	И5	И6	И7	И8	И9	Произведение	Среднее геометрическое	V
И1	1	0,333	1	0,333	0,333	1	1	1	1	0,037	0,693	0,067
И2	3	1	3	1	1	3	3	3	3	729	2,080	0,2
И3	1	0,333	1	0,333	0,333	1	1	1	1	0,037	0,693	0,067
И4	3	1	3	1	1	3	3	3	3	729	2,080	0,2
И5	3	1	3	1	1	3	3	3	3	729	2,080	0,2
И6	1	0,333	1	0,333	0,333	1	1	1	1	0,037	0,693	0,067
И7	1	0,333	1	0,333	0,333	1	1	1	1	0,037	0,693	0,067
И8	1	0,333	1	0,333	0,333	1	1	1	1	0,037	0,693	0,067
И9	1	0,333	1	0,333	0,333	1	1	1	1	0,037	0,693	0,067

ТАБЛИЦА 7. Матрица исходов «логического частично исправного состояния»

Состояние	Датчик									Результат
	И1	И2	И3	И4	И5	И6	И7	И8	И9	
A1	0,692	0,077	0,692	0,077	0,077	0,692	0,692	0,692	0,692	0,323
A2	0,231	0,692	0,231	0,692	0,692	0,231	0,231	0,231	0,231	0,507
A3	0,077	0,231	0,077	0,231	0,231	0,077	0,077	0,077	0,077	0,169

Из рассчитанных величин приоритетов для «исправного состояния» получим значения альтернатив  $A1 = 0,323$ ,  $A2 = 0,570$ ,  $A3 = 0,169$ , из чего можно сделать вывод, что конструкция исследуемого ИССО находится в состоянии «логическое частично исправное состояние» и дальнейшая эксплуатация может осуществляться с установкой ограничений.

Теперь рассмотрим пример работы модели, когда на датчики И2, И4 и И5 приходит логическое «3», с И7 и И8 – логическая «9», а с И1, И3, И6, И9 – логическая «1». Расчеты и полученные результаты приведены в табл. 8 и 9 соответственно.

Из рассчитанных величин приоритетов для «неисправного состояния» получим значения альтернатив  $A1 = 0,156$ ,  $A2 = 0,364$ ,  $A3 = 0,478$ , из чего можно сделать вывод, что конструкция исследуемого ИССО находится в состоянии «логической неисправности» и дальнейшая

эксплуатация не может осуществляться без проведения специализированного комплекса работ, направленных на восстановление свойств инфраструктуры.

В результате проведенной работы можно прийти к следующим выводам. Применение метода МАИ как средства анализа технического состояния ИССО железнодорожного транспорта на основании данных геодезического мониторинга позволяет на основании реальных данных произвести анализ возможности дальнейшей эксплуатации объекта. По средствам определения приоритетов данный метод дает возможность принимать оптимальное решение при данных условиях. В рассматриваемом случае сбор данных осуществляется посредством применения устройств геодезического мониторинга, подлежащих обязательной сертификации. Применение МАИ позволяет количественно выразить степень



ТАБЛИЦА 8. Матрица парных сравнений для «логически неисправного состояния»

Датчик	И1	И2	И3	И4	И5	И6	И7	И8	И9	Произведение	Среднее геометрическое	V
И1	1	0,333	1	0,333	0,333	1	0,111	0,111	1	0	0,426	0,032
И2	3	1	3	1	1	3	0,333	0,333	3	9	1,277	0,097
И3	1	0,333	1	0,333	0,333	1	0,111	0,111	1	0	0,426	0,032
И4	3	1	3	1	1	3	0,333	0,333	3	9	1,277	0,097
И5	3	1	3	1	1	3	0,333	0,333	3	9	1,277	0,097
И6	1	0,333	1	0,333	0,333	1	0,111	0,111	1	0	0,426	0,032
И7	9	3	9	3	3	9	1	1	9	177 147	3,83	0,290
И8	9	3	9	3	3	9	1	1	9	177 147	3,83	0,290
И9	1	0,333	1	0,333	0,333	1	0,111	0,111	1	0	0,426	0,032

ТАБЛИЦА 9. Матрица исходов «логически неисправного состояния»

Состояние	Датчик									Результат
	И1	И2	И3	И4	И5	И6	И7	И8	И9	
A1	0,032	0,097	0,032	0,097	0,097	0,032	0,290	0,290	0,032	0,156
A2	0,692	0,077	0,692	0,077	0,077	0,692	0,077	0,077	0,692	0,364
A3	0,231	0,692	0,231	0,692	0,692	0,231	0,231	0,231	0,231	0,478

предпочтительности одного из предложенных вариантов.

В дальнейшем разработанный алгоритм предполагается применять, как элемент системы поддержки принятия решений геоинформационной системы, предназначенной для регулирования движения поездов на участках железных дорог, с учетом технического состояния объектов железнодорожной инфраструктуры.

### Библиографический список

1. МДС 13-22.2009. Методика геодезического мониторинга технического состояния высотных и уникальных зданий и сооружений. – М. : ООО «Тектоплан», 2010.

2. Цветков В. Я. Современные методы получения геодезической информации / В. Я. Цветков, В. В. Шалапак // Инженерные изыскания. – 2013. – № 4. – С. 28–33.

3. Антонович К. М. Мониторинг объектов с применением GPS-технологий / К. М. Антонович, А. П. Карпик // Изв. вузов. Сер. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2004. – № 1. – С. 53–67.

4. Брынь М. Я. Геодезический мониторинг монтажа несущих металлоконструкций покрытия стадиона «Спартак» в Москве / М. Я. Брынь, Е. С. Богомолова, О. П. Сергеев, А. А. Никитчин, Н. В. Канахин, В. Н. Иванов, Н. Н. Богомолова // Сб. материалов Междунар. науч.-практич. конференции «Геодезия, картография, геоинформатика и кадастры. От идей до внедрения». – СПб. : Политехника, 2015. – С. 65–68.

5. Голук В. П. Геодезический мониторинг строительства мостового перехода через бухту Золотой Рог в городе Владивостоке / В. П. Голук, Д. Г. На-

заров // Автоматика на транспорте (СПб.). – 2016. – № 2. – С. 259–271.

6. Жуков Б. Н. Руководство по геодезическому контролю сооружений и оборудования промышленных предприятий при их эксплуатации / Б. Н. Жуков. – Новосибирск : СГГА, 2004. – 376 с.

7. Бокарев С. А. Содержание искусственных сооружений с использованием информационных технологий : учеб. пособие для вузов транспорта / С. А. Бокарев, С. С. Прибытков, А. Н. Яшнов. – М. : Учеб.-метод. центр по образованию на ж.-д. транспорте, 2008. – 195 с.

8. Inaudi D. Overview of 40 Bridge Structural Health Monitoring Projects. – URL : [www.roctest.com/en/content/download/944/7677/file/C213.pdf](http://www.roctest.com/en/content/download/944/7677/file/C213.pdf) (дата обращения: 03.03.2017).

9. Billie F. Sp. Campaign Monitoring of Railroad Bridges in High-Speed Rail Shared Corridors using Wireless Smart Sensors / F. Sp. Billie. – Illinois : Report No NSEL-040, Department of Civil and Environmental Engineering University of Illinois at Urbana-Champaign, June 2015.

10. Watanabe E. On longevity monitoring technologies of bridges: a survey study by the Japanese Society of steel construction / E. Watanabe, H. Furuta, T. Yamaguchi, M. Kano // Structure and Infrastructure Engineering. – 2014. – Vol. 10, N 4. – P. 471–491.

11. URL: [http://www.cpasegypt.com/PDF\\_ST/MosbehRKalooop/Researches/002.pdf](http://www.cpasegypt.com/PDF_ST/MosbehRKalooop/Researches/002.pdf) (дата обращения: 03.03.2017).

12. СП 13-102-2003. Правила обследования несущих строительных конструкций зданий и сооружений. – М., 2003.

13. Саати Т. Принятие решений методом анализа иерархий / Т. Саати. – М. : Радио и связь, 1993. – 273 с.

14. Саати Т. Принятие решений при зависимостях и обратных связях. Аналитические сети / Т. Саати. – М. : ЛКИ, 2008. – 360 с.

15. Абакаров А. М. Двухэтапная процедура отбора перспективных альтернатив на базе табличного метода и метода анализа иерархий / А. М. Абакаров, Ю. А. Сушков // Электрон. науч.-технич. изд. «Наука и образование». – 2008. – № 7. – URL : <http://technomag.edu.ru/doc/97924.html> (дата обращения: 12.03.2017).

16. Горб А. Использование метода анализа иерархий для оптимального выбора канала информационного обмена в локальных сетях GPS-станций / А. Горб, А. Прокопов, Р. Нежальский // Современные достижения геодезической науки и производства. – Львов : НУЛП, 2007. – Вып. II. – С. 118–122.

17. Многокритериальное принятие решений. – URL : <http://levvu.narod.ru/Papers/Multicrit.pdf> (дата обращения: 03.03.2017).

18. Vahidnia M. H. Fuzzy analytical hierarchy process in gis application / M. H. Vahidnia, A. Alesheikh, A. Alimohammadi // The Intern. Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. – Beijing, 2008. – Vol. XXXVII, pt B2. – P. 593–596.

19. Тутьгин А. Г. Преимущества и недостатки метода анализа иерархий / А. Г. Тутьгин, В. Б. Коробов. – URL : <http://cyberleninka.ru/article/n/preimuschestva-i-nedostatki-metoda-analiza-ierarhiy> (дата обращения: 03.03.2017).

20. Соколов В. А. Категории технического состояния строительных конструкций зданий при их диагностике вероятностными методами / В. А. Соколов. – URL : <https://fundamental-research.ru/pdf/2014/6-6/34305.pdf> (дата обращения: 03.03.2017).

## References

1. MDS 13-22.2009. *Metodyka geodezycheskogo monitoringa tekhnicheskogo sostoyaniya vysotnykh i unikalnykh zdaniy i sooruzheniy* [Guidance Documents in Construction 13-22.2009 Geodesic monitoring technique of high-rise and unique buildings and constructions technical state]. Moscow, LLC “Tektoplan” Publ., 2010. (In Russian)

2. Tsvetkov V. Y. & Shalapak V. V. *Sovremenniy metody polucheniya geodezycheskoy informatsii* [Modern methods of receiving geodesic data]. *Inzhenerniye izyskaniya* [Engineering surveying], 2013, no. 4, pp. 28–33. (In Russian)

3. Antonovich K. M. & Karpik A. P. *Monitoring objektov s pryimeneniyem GPS-tekhnologiy* [Construction sites monitoring with GPS-technologies application]. *Izvestiya vuzov. Geodeziya i aerofotosjemka*

[*News of higher educational institutions. Series Geodesy and aerophotography*], 2004, no. 1, pp. 53–67. (In Russian)

4. Bryn M. Y., Bogomolova Y. S., Sergeev O. P., Nikitchyn A. A., Kanashyn N. V., Ivanov V. N. & Bogomolova N. N. Geodezycheskiy monitoring montazha nesushykh metallokonstruktsiy pokrytiya stadiona “Spartak” v Moskve [Geodesic monitoring of carrying iron installation of the stadium “Spartak” covering]. *Sbornyk materialov mezhdunarodnoy nauchno-praktycheskoy konferentsii “Geodeziya, kartografiya, geoinformatyka i kadastry. Ot idey do vnedreniya”* [Collected papers of international scientific and practical conference “Geodesy, mapping, geoinformatics and land inventory. From ideas to introduction”]. Saint Petersburg, Polytehnika Publ., 2015, pp. 65–68. (In Russian)

5. Goluk V. P. & Nazarov D. G. Geodezycheskiy monitoring stroitelstva mostovogo perekhoda cherez bukhtu Zolotoy Rog v gorode Vladivostoke [Geodesic monitoring of a bridgework construction over the bay Golden Horn in Vladivostok city]. *Automation on transport*. Saint Petersburg, 2016, no. 2, pp. 259–271. (In Russian)

6. Zhukov B. N. *Rukovodstvo po geodezicheskoy kontrolyu sooruzheniy i oborudovaniya promyshlennykh predpriyatiy pry ikh ekspluatatsii* [Guidance on geodesic monitoring of industrial installations’ construction and equipment in the process of operation]. Novosibirsk, Siberian State University of geosystems and technologies Publ., 2004, 376 p. (In Russian)

7. Bokarev S. A., Prybytkov S. S. & Yashnov A. N. *Soderzhaniye iskusstvennykh sooruzheniy s ispolzovaniyem informatsionnykh tekhnologiy* [Constructive works maintenance with application of information technologies]. Moscow, Uchebno-metodicheskiy tsentr po obrazovaniyu na zheleznodorozhnom transporte [Learning and teaching educational center of railway transport] Publ., 2008, 195 p. (In Russian)

8. Inaudi D. *Overview of 40 Bridge Structural Health Monitoring Projects*. – URL: [www.roctest.com/en/content/download/944/7677/file/C213.pdf](http://www.roctest.com/en/content/download/944/7677/file/C213.pdf) (accessed: 03.03.2017).

9. Billie F. Sp. *Campaign Monitoring of Railroad Bridges in High-Speed Rail Shared Corridors using Wireless Smart Sensors*. Illinois, Report No NSEL-040,

Department of Civil and Environmental Engineering University of Illinois at Urbana-Champaign Publ., June 2015.

10. Watanabe E., Furuta H., Yamaguchi T. & Kano M. On longevity monitoring technologies of bridges: a survey study by the Japanese Society of steel construction. *Structure and Infrastructure Engineering*, 2014, vol. 10, no. 4, pp. 471–491.

11. URL: [http://www.cpagesypt.com/PDF\\_ST/MosbehRKalooop/Researches/002.pdf](http://www.cpagesypt.com/PDF_ST/MosbehRKalooop/Researches/002.pdf) (accessed: 03.03.2017).

12. SP13-102–2003. *Pravyla obsledovaniya nesushykh stroitelnykh konstruktsiy zdaniy i sooruzheniy* [Design and constructions specifications 13–102–2003. Regulations on buildings and constructions’ load-carrying structures examination]. Moscow, 2003 (In Russian)

13. Saati T. *Prynyatiye resheniy metodom analiza iyerarkhiy* [Decision-making by means of hierarchy analysis method]. Moscow, Radio and signal communication Publ., 1993, 273 p. (In Russian)

14. Saati T. *Prynyatiye resheniy pry zavysimostyakh i obratnykh svyazyakh. Analyticheskiye sety* [Decision-making in case of dependencies and feedback. Analytical systems]. Moscow, LKI Publ., 2008, 360 p. (In Russian)

15. Abkarov A. M. & Sushkov Y. A. *Dvukhetapnaya protsedura otbora perspektivnykh alternativ na baze tablychnogo metoda i metoda analiza iyerarkhiy* [Two-step selection procedure of long-range alternatives based on tabular procedure and hierarchy analysis method]. *Science and education*, 2008, no. 7. – URL: <http://technomag.edu.ru/doc/97924.html>. (accessed: 12.03.2017). (In Russian)

16. Gorb A., Prokopov A. & Nezhalskiy R. *Ispolzovaniye metoda analiza iyerarkhiy dlya optimalnogo vybora kanala informatsionnogo obmena v lokalnykh setyakh GPS-stantsiy* [Hierarchy analysis method application for optimal selection of traffic channel in local networks of GPS-stations]. *Sovremenniye dostyazheniya geodezicheskoy nauky i proizvodstva* [Modern advances of geodesy and production]. Lviv, Lviv Polytechnic National University Publ., 2007, vol. II, pp. 118–122. (In Russian)

17. *Mnogokryterialnoye prynyatiye resheniy* [Multicriterion decision-making]. – URL: <http://levvu.narod.ru/Papers/Multicrit.pdf>. (accessed: 03.03.2017). (In Russian)

18. Vahidnia M. H., Alesheikh A. & Alimohammadi A. Fuzzy analytical hierarchy process in gis application. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. Beijing, 2008, vol. XXXVII, pt B2, pp. 593–596.
19. Tutigin A. G. & Korobkov V. B. Preimuschestva i nedostatki metoda analiza ierarhii [*Advantages and disadvantages of analytic hierarchy process*]. – URL: <http://cyberleninka.ru/article/n/preimuschestva-i-nedostatki-metoda-analiza-ierarhiy> (accessed: 03.03.2017). (In Russian)
20. Sokolov V. A. *Kategorii tekhnicheskogo sostoyania stroitelnykh konstrukciy zdaniy pri ikh diagnostike veroyatnostnymi metodami* [*Categories of technical condition of constructions at their diagnosis probabilistic methods*]. – URL: <https://fundamental-research.ru/pdf/2014/6-6/34305.pdf> (accessed 03.03.2017). (In Russian)

БОГДАНОВ Николай Александрович – аспирант, [nabogdanov85@gmail.com](mailto:nabogdanov85@gmail.com) (Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I).

УДК 629.44 (629.46)

**Ю. П. Бороненко, А. С. Даукша**

## **ПЕРСПЕКТИВЫ ВНЕДРЕНИЯ ВАГОНОВ СО СЪЕМНЫМИ КУЗОВАМИ УВЕЛИЧЕННОЙ ГРУЗОПОДЪЕМНОСТИ**

Дата поступления: 24.04.2017

Решение о публикации: 10.05.2017

### **Аннотация**

**Цель:** Определить перспективы применения и выбрать параметры и технические решения специализированного грузового вагона со съемными кузовами, предназначенного для перевозок различных видов грузов, пригодного для эксплуатации в существующих условиях железнодорожного транспорта Российской Федерации. **Методы:** Используется метод анализа данных математического моделирования. **Результаты:** Разработан модельный ряд съемных кузовов, обеспечивающих транспортировку широкого спектра грузов. Изучено влияние линейных размеров съемного кузова на технико-экономические параметры вагона, выбраны линейные размеры. Уточнена методика оценки потребного парка вагонов и съемных кузовов. Предложены новые конструкции крепления съемных кузовов к раме вагон-платформы. **Практическая значимость:** Предложен новый для колеи 1520 мм грузовой вагон со съемными кузовами увеличенной грузоподъемности, позволяющий сократить количество специализированных вагонов, уменьшить их простой, повысить статическую нагрузку, обеспечить максимальную эксплуатацию вагона на протяжении всего жизненного цикла без простоев при сезонных колебаниях отправки грузов.

**Ключевые слова:** Грузовой вагон, съемный кузов, техническая характеристика, разработка, эффективность.

**Yuriy P. Boronenko**, D. Eng. Sci., professor, boron49@ya.ru; \***Anfysa S. Dauksha**, postgraduate student, ads1989@rambler.ru (Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University) THE PROSPECTS OF RAILROAD CARS WITH INCREASED CARRYING SWAP BODIES IMPLEMENTATION

### **Summary**

**Objective:** To determine the prospects and select the parameters as well as engineering solutions of a special-purpose freight car with swap bodies for forwarding different types of loads, serviceable in the present conditions of railroad transport of the Russian Federation. **Methods:** Data analysis methods, as well as the method of mathematic simulation were applied. **Results:** Swap bodies' line was developed, providing forwarding of a wide range of loads. The influence of linear dimensions of a swap car on technical and economic parameters of a car was studied, linear dimensions were selected. The evaluation method of the available fleet of cars and swap cars was specified. New constructions of tightening to the frame of a flat-wagon were introduced. **Practical importance:** A new freight car with increased capacity swap bodies for 1520 mm gauge was introduced, which makes it possible to reduce the number of special-purpose cars, boost the availability of the latter, increase stationary load, provide maximum car maintenance throughout its operational cycle, avoiding inactivity of a car during seasonal fluctuations of consignments.

**Keywords:** Freight wagon, swap body, technical characteristic, development, efficiency.

## Оценка состояния парка грузовых вагонов

Мировой тенденцией развития грузового подвижного состава является специализация вагонов. Существует более тысячи разновидностей специализированных вагонов, их общее количество в парках железных дорог ряда стран достигает 80–90% от всего парка подвижного состава. Специализация вагонов позволяет сократить время и трудоемкость погрузочно-разгрузочных операций, обеспечить сохранность продукции. Но одновременно увеличиваются и тара вагонов, порожний пробег, простои при сезонных колебаниях отправки различных товаров. У вагоностроителей возрастают расходы на испытания и сертификацию вагонов, и из-за малых объемов серий себестоимость специализированных вагонов выше универсальных. В связи с сезонными колебаниями отправок грузов многие узкоспециализированные вагоны (например, для леса, зерна, минеральных удобрений) длительно простаивают, занимая дефицитные железнодорожные пути, а от вложенного в вагоны капитала нет отдачи.

Вместе с тем по причине стимулирования обновления вагонного парка в течение последних лет темпы списания старых вагонов России в несколько раз превысили производство новых. Происходит значительная переориентация грузов в пользу автомобильного транспорта и контейнерных перевозок, однако технико-экономические показатели контейнеров существенно хуже показателей вагонов по грузоподъемности, использованию погонной нагрузки. В то же время контейнеры имеют преимущество при сезонных колебаниях в объемах отправки грузов, когда невостребованные узкоспециализированные вагоны простаивают.

В сложившейся ситуации на рынке подвижного состава для увеличения эффективности использования вагонов предлагается разработать вагоны со съемными кузовами увеличенной вместимости, в которых основная и наиболее дорогая часть (рама с ходовыми

частями, тормозами и автосцепным устройством) будет постоянно эксплуатироваться, а съемные кузова будут меняться в зависимости от типа перевозимого груза. Внедрение такой гибкой грузовой системы позволит значительно повысить эффективность эксплуатации вагонов, сократить простои при сезонных колебаниях отправки грузов.

## Область применения вагонов со съемными кузовами

Съемные кузова стали интермодальной транспортной единицей, которая зародилась на автомобильном транспорте [1]. Их конструкция представляла собой кузов грузового автомобиля, который может отделяться от шасси, устанавливаться на откидных опорах и сниматься с автомобиля без дополнительного грузоподъемного оборудования, которое заменяет пневматическая подвеска автомобиля, позволяющая установить съемный кузов на опоры путем уменьшения дорожного просвета [2].

Начиная с 1980-х годов, когда грузовые автомобили с такой подвеской получили в Европе повсеместное распространение, были созданы конструкции съемных кузовов, предназначенные для интермодальных автомобильно-железнодорожных перевозок, которые наряду с опорами были оснащены стандартными контейнерными фитингами для крепления на подвижном составе [3]. В результате съемные кузова конструктивно и по характеру применения стали похожи на контейнеры стандарта ISO, которые также относятся к съемным транспортным единицам [4]. Малые размеры контейнеров ISO привели к созданию контейнеров, особенностью которых является увеличенная длина до 45–53 футов (13 716–16 154 мм), позволяющая полностью использовать разрешенную длину автопоезда. Наряду с удлинением контейнеров появилась тенденция увеличения их ширины. Все большее число контейнерных операторов в Европе стали предлагать клиентам контейнеры шири-

ной 8,5 фута (2590 мм). Две указанные тенденции естественным образом интегрировались, положив начало поколению контейнеров, получивших название «континентальные».

Финско-шведской лесопромышленной компанией «Stora Enso» были разработаны крупнотоннажные контейнеры SECU (Stora Enso Container Unit) для интермодальных морских перевозок [5]. Особенностями таких контейнеров (рис. 1) являются увеличенная почти в 3 раза грузоподъемность 80 т при tare 26,5 т и большая вместимость 179 м<sup>3</sup>. Контейнер внешне похож на стандартный, но его размеры существенно больше – 13,8×3,6×3,6 м (45×12×12 футов). Контейнеры SECU выходят за пределы установленного габарита подвижного состава, а также обладают высокой массой тары, в связи с чем перевозятся на специальных платформах, только на подъездных железнодорожных путях в морских портах.

Их успешное применение для перевозки бумаги и других аналогичных грузов показывает перспективность и возможность увеличения размеров и грузоподъемности съемных транспортных единиц.

Вагоны со съемными кузовами уже рекомендовали себя в практическом применении за рубежом. Компания «WASCOSA» разработала систему использования вагонов в мономодальных перевозках [6]. Система является модульной и предусматривает замену съемного кузова вагона в соответствии с типом перевозимого груза [7] (рис. 2). Вагон со съемным кузовом образует уменьшенный по ширине грузовой вагон, а габариты съемного кузова соответствуют размерам кузова автомобильного прицепа [8]. Технические характеристики данных съемных кузовов недостаточно эффективны для применения на общей сети железных дорог России, съемные кузова

а



б



в



Рис. 1. Специальные морские контейнеры компании «Stora Enso» грузоподъемностью до 80 т: а – контейнер SECU; б – контейнер SECU (по центру) в сравнении с контейнерами стандарта ISO; в – контейнер SECU, установленный на железнодорожную платформу

*а**б*

Рис. 2. Съемные кузова компании «WASCOSA»:

*а* – вагон-платформа со съемным кузовом для перевозки леса; *б* – вагон-платформа со съемным кузовом открытого типа

WASCOSA не приспособлены для многоярусного складирования, не обеспечивают погрузку и выгрузку грузов на существующих погрузочно-выгрузочных комплексах, имеют относительно низкую грузоподъемность (59,6 т) и высокую массу тары (13 т).

Ширина съемных кузовов не превышает 2,5 м, поэтому при перевозке железнодорожным транспортом они не используют допускаемую погонную нагрузку и ширину габарита [6].

Компания «Innofreight» разработала ряд новых съемных кузовов увеличенной до 2,9 м ширины (рис. 3), длина которых составляет 10, 20, 30 футов (3,048, 6,096 и 9,144 м) [9]. Эти съемные кузова оборудованы фитингами, установленными на стандартных для контейнеров ISO расстояниях. Съемные кузова Innofreight открытого типа (рис. 3, *в*) разгружаются при помощи вилочного погрузчика, который при этом осуществляет подъем сьем-

ного кузова посредством карманов, расположенных в нижней части съемного кузова, поворачивает его и выгружает содержимое через верх [10].

Съемный кузов типа «хopper» компании «Innofreight» для транспортировки тяжелых сыпучих грузов (рис. 3, *в*) оборудован системой гравитационной разгрузки через бункера и нижние люки (высыпание сыпучего груза под действием собственного веса). Кузов типа «цистерна» (рис. 3, *г*) предназначен для перевозки жидких грузов, имеет конструкцию котла, состоящую из двух конусов. Длина съемных кузовов составляет 30 футов.

Достоинствами съемных кузовов компании «Innofreight» являются возможность использования в интермодальных перевозках, высокая скорость разгрузки. Однако, на наш взгляд, они имеют и существенные недостатки при перевозках в поездах, из-за малых размеров съемных кузовов и недостаточной грузоподъ-





Рис. 3. Съемные кузова компании «Innofreight»:

*а* – вагон-платформа со съемным кузовом открытого типа; *б* – вагон-платформа со съемным кузовом закрытого типа; *в* – вагон-платформа со съемным кузовом типа «хopper»; *г* – вагон-платформа со съемным кузовом типа «цистерна»

емности недоиспользуются габарит подвижного состава, погонная нагрузка, допустимая масса поезда. В результате данный подвижной состав для колеи 1520 мм, по нашему мнению, малоэффективен, кроме того, изменение технологии разгрузки требует создания новых разгрузочных пунктов с приобретением дорогостоящей разгрузочной техники.

В связи с выявленными недостатками съемных кузовов зарубежного производства предлагается разработать перспективный модельный ряд съемных кузовов вагонов, обладающих значительно лучшими техническими характеристиками, что даст возможность повысить удобство погрузочно-разгрузочных операций, складировать съемные кузова ярусами на от-

дельных площадках и обеспечить максимальную эксплуатацию вагона на протяжении всего жизненного цикла без спада спроса при сезонных колебаниях отправки грузов [11, 12].

### Перспективный модельный ряд съемных кузовов

Исходя из номенклатуры перевозимых грузов, был разработан перспективный модельный ряд съемных кузовов [13–16], обладающих значительно лучшими техническими характеристиками по сравнению со съемными кузовами зарубежного производства, приближающимися к характеристикам вагонов, что позволит сократить простои, увеличить эффективность эксплуатации вагонов. Предлагаемый модельный ряд съемных кузовов может быть расширен в соответствии с рыночной конъюнктурой (рис. 4).

Существенные колебания объемов погрузки в течение года наблюдаются как на отдельных железных дорогах, так и в целом по общей сети железных дорог. В связи с сезонными колебаниями спроса на перевозку различных грузов многие узкоспециализированные вагоны (для леса, зерна, химических грузов и др.) длительно простаивают.

Эксплуатация вагон-платформы с разными типами съемных кузовов обеспечит транспортировку широкого спектра грузов, таких как металлопрокат, уголь, стройматериалы (если использовать открытый съемный кузов), лес и трубы (при оборудовании торцевыми стенками и специальными стойками), сыпучие грузы (если установить кузов типа «хоппер»), охлажденные грузы (при применении кузова типа «термос»).

Одной из моделей съемного кузова является кузов-цистерна. Вагон-платформа, оборудованная съемным кузовом-цистерной, образует стандартный вагон-цистерну для перевозки химических грузов. Предлагается расширить типоразмерный ряд съемных кузовов-цистерн четырьмя типами кузовов длиной 13,716 м, отличающимися по диаметру, объему котла и

грузоподъемности (табл. 1). Предложенный ряд перекрывает все плотности перевозимых химических грузов.

Эксплуатация вагон-платформы с различными съемными кузовами-цистернами, соответствующими типу перевозимого груза, обеспечит транспортировку широкого спектра грузов, таких как кислоты, жидкие химические продукты, серная, соляная, азотная кислоты, этиловая жидкость, метанол и др. В основу типоразмерного ряда положено соответствие объема котла грузоподъемности с учетом допускаемого недолива при 80%-ной загрузке.

### Определение потребного парка подвижного состава и оценка эффекта от использования съемных кузовов

Сезонные колебания отправки грузов наблюдаются как у высокодоходных, так и у среднедоходных грузов. Например, исходя из рис. 5, видно, что во время спада спроса на соду и химикаты наблюдается повышенный спрос на перевозку черных металлов, а во время спада спроса на транспортировку зерна возникает повышенный спрос на лес и минеральные удобрения. Традиционная методика расчета потребного парка ориентирована на годовые объемы перевозок.

Предлагаемый подход к определению потребного парка заключается в следующем: количество вагон-платформ  $N_{\text{плат.сум}}$  должно обеспечивать погрузку грузов в месяц с максимальным объемом погрузки грузов:

$$N_{\text{плат.сум}} = \max \{ \sum_{i=1}^m N_{\text{пл.}i1}, \sum_{i=1}^m N_{\text{пл.}i2}, \dots, \sum_{i=1}^m N_{\text{пл.}i12} \},$$

где  $N_{\text{пл.}ij}$  – количество вагон-платформ для перевозки съемных кузовов с грузом  $i$  в месяц  $j$ ;  $m$  – количество видов перевозимых грузов, требующих специального подвижного состава;  $j = 1, \dots, 12$  – количество месяцев в году, в которых осуществляются перевозки.



Рис. 4. Перспективный модельный ряд съемных кузовов вагонов для железной дороги колеи 1520 мм:  
 1 – открытого типа; 2 – крытый съемный; 3 – для перевозки металла в рулонах; 4 – для перевозки труб; 5 – для перевозки жидких грузов;  
 6 – для перевозки колесных пар; 7 – крытый типа «хошер»; 8 – для перевозки леса; 9 – типа «платформа»

ТАБЛИЦА 1. Типоразмерный ряд съемных кузовов-цистерн

Наименование параметров	Съемные кузова-цистерны			
	Тип 1	Тип 2	Тип 3	Тип 4
Масса тары не более, т	9,25	8,4	7,5	6,8
Грузоподъемность, т	71,5	72,35	73,25	73,95
Масса брутто, т	80,75	80,75	80,75	80,75
Объем, м <sup>3</sup>	90,5	72,4	58	46
Диаметр котла внутренний, мм	2950	2650	2400	2150
Длина, мм	13 716	13 716	13 716	13 716
Ширина, мм	3190	3190	3190	3190

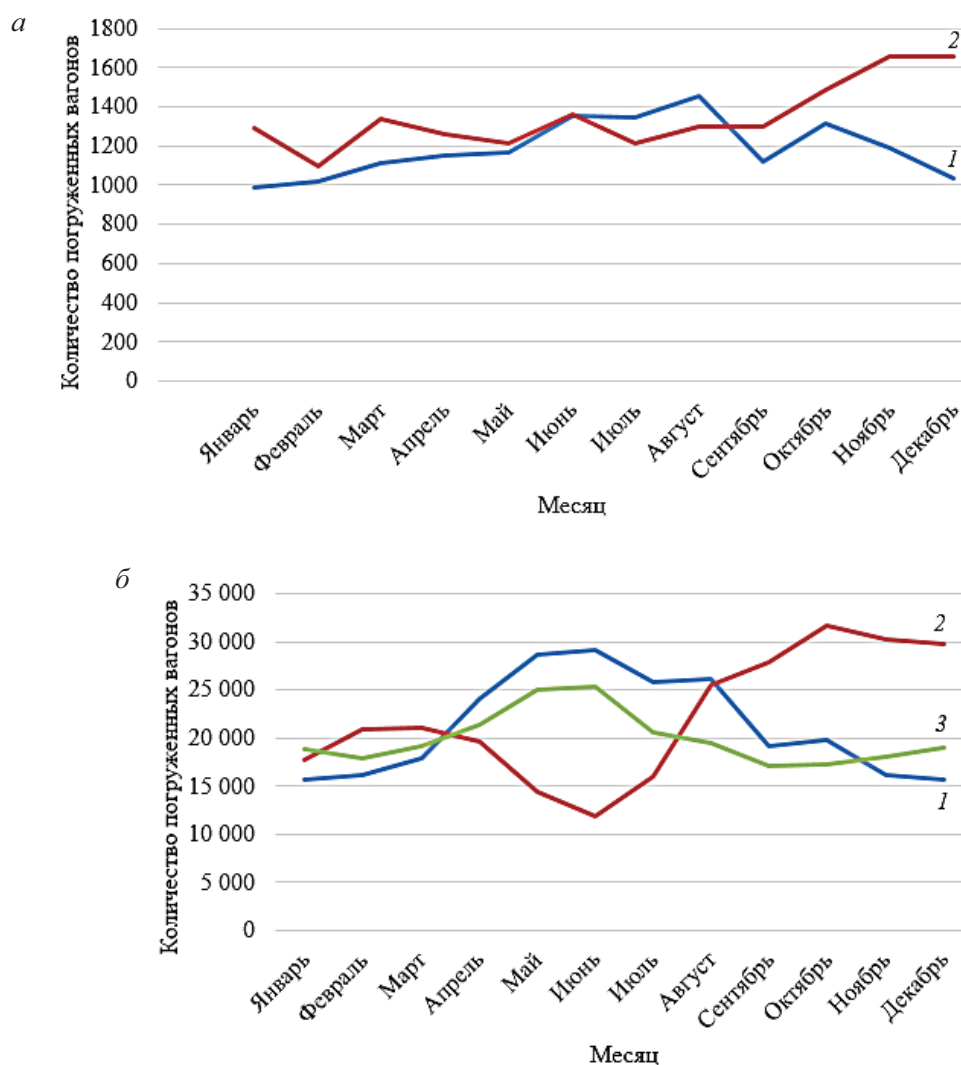


Рис. 5. Средние объемы перевозок грузов за 2013–2016 гг. на сети ОАО «РЖД»:  
 а – высокодоходные грузы: 1 – сода, химикаты, 2 – черные металлы; б – среднедоходные грузы:  
 1 – лес, 2 – зерно, 3 – минеральные удобрения

В месяцы с меньшим объемом перевозок неостребованные вагон-платформы для съемных кузовов могут быть оставлены в запас, использоваться для перевозки контейнеров или низкодоходных грузов.

В отличие от потребного парка вагон-платформ потребный парк съемных кузовов  $N_{\text{ск.сум}}$  должен быть равен сумме максимальных месячных потребностей в кузовах для каждого из видов груза:

$$N_{\text{ск.сум}} = \sum_{i=1}^m \max \{N_{\text{ск.}i1}, N_{\text{ск.}i2}, \dots, N_{\text{ск.}i12}\}.$$

Потребность в специализированных вагонах на заданный объем погрузки рассчитывается по аналогии с определением потребности в съемных кузовах:

$$N_{\text{ваг. сум}} = \sum_{i=1}^m \times \max \{N_{\text{ваг.}i1}, N_{\text{ваг.}i2}, \dots, N_{\text{ваг.}i12}\}.$$

Величину потребного парка по каждому виду груза можно рассчитать по следующим формулам:

– для вагон-платформ под перевозку съемных кузовов:

$$N_{\text{пл.}ij} = k \frac{Q_{ij} \cdot T_{ij}}{P_{\text{ст.пл.}i} \cdot 30};$$

– для вагонов под перевозку грузов:

$$N_{\text{ваг.}ij} = k \frac{Q_{ij} \cdot T_{ij}}{P_{\text{ст.ваг.}i} \cdot 30};$$

– для съемных кузовов под перевозку грузов:

$$N_{\text{ск.}ij} = k \frac{Q_{ij} \cdot T_{ij}}{P_{\text{ст.ск.}i} \cdot 30},$$

где  $Q_{ij}$  – масса перевозимого груза типа  $i$  в месяц  $j$ ;  $P_{\text{ст.ваг.}i}$ ,  $P_{\text{ст.пл.}i}$ ,  $P_{\text{ст.ск.}i}$  – статическая нагрузка вагона, вагон-платформы и съемного кузова соответственно;  $T_{ij}$  – оборот вагона при перевозке грузов типа  $i$ ;  $k = 1,1$  – коэффициент, учитывающий нахождение вагонов в ремонте.

В качестве примера был сделан расчет потребного парка для условной перевозочной компании, осуществляющей перевозки соды и химикатов, черных металлов, леса, зерна и минеральных удобрений в объеме 1% от среднего объема перевозок этих грузов на сети ОАО «РЖД» за 2013–2016 гг. Погрузка по месяцам также принималась средней за последние 4 года (рис. 5).

Принятые виды грузов, объемы перевозок и характеристики использования подвижного состава приведены в табл. 2.

ТАБЛИЦА 2. Объемы перевозок и характеристики использования подвижного состава

Наименование параметра	Объем перевозок (в год), тыс. т	Максимальный объем перевозок (в месяц), тыс. т	Средняя статическая нагрузка вагона, т	Средняя статическая нагрузка съемного кузова, т	Средний оборот, сут.
Сода и химикаты	91,9	9,3	67	64	15
Черные металлы	72,9	7,3	46	44	14
Лесные грузы	1218,9	143,8	54	51	13
Зерно	1826,0	208,6	66	63	15
Минеральные и химические удобрения	1538,5	165,3	71	68	15
Итого	4748,2	534,4	–	–	–

По результатам расчета для осуществления заданного объема перевозок потребуется 3476 вагон-платформ и 4243 съемных кузовов пяти типов, соответствующих номенклатуре перевозимых грузов. В то же время, если осуществлять эти перевозки пятью типами специализированных вагонов, то их потребный парк составит 4042 вагона.

Полученный результат свидетельствует о том, что за счет более интенсивной работы вагон-платформ для перевозки съемных кузовов потребный парк вагонов сокращается на 14%. Потребный парк съемных кузовов увеличивается на 4% в сравнении со специализированными вагонами из-за их несколько меньшей грузоподъемности. Однако, учитывая разницу в стоимости вагонов и съемных кузовов, экономия капиталовложений на закупку подвижного состава может составлять 38%.

### **Технические решения крепления съемных кузовов на железнодорожном подвижном составе**

Главной проблемой при увеличении размеров и грузоподъемности съемных кузовов является их крепление на подвижном составе. Широко распространенные в контейнерах фитинги допускают продольные нагрузки, возникающие при эксплуатации и проведении железнодорожных операций только 300 кН [17].

За рубежом на контейнерах 1 ЕЕ, длина которых составляет 45 футов [18], применяются в основном крепления с удвоенным количеством фитингов, но испытания показали, что при ударах из-за имеющихся зазоров между фитингами и упорами нагрузку воспринимают только два фитинга. Поэтому увеличение числа фитингов без усовершенствования конструкции крепления не даст эффекта.

Другим возможным вариантом является использование крепления без применения упоров фитингов [19]. Такие крепежные устройства внедрены на железнодорожных платформах, эксплуатируемых в США. Существует

ряд зарубежных патентов, где для крепления съемных кузовов предлагаются клиновидные упоры, и другие сложно реализуемые технические решения, например автоматически запирающиеся упорки [19]. Данные устройства оборудованы пружинными фиксаторами и представляют собой поворотный замок, который в процессе установки контейнера вращается под его тяжестью, а затем, когда контейнер полностью расположен на угловых опорах, защелкивается в запертое положение.

На наш взгляд, такие решения металлоемки и не надежны из-за возникающих местных деформаций. Кроме того, применение данных креплений в России нерационально вследствие погодных условий, в зимний период из-за низких температур возникает высокий риск заклинивания подвижных частей крепежного механизма.

Поэтому в первую очередь увеличение грузоподъемности съемных кузовов требует разработки устройства, обеспечивающего большую допускаемую нагрузку на крепления. По нашему мнению, для обеспечения прочности при повышающихся нагрузках целесообразным техническим решением является оборудование съемного кузова дополнительными фитингами в поперечном направлении, а на концевых балках вагон-платформы – установка устройства крепления в виде опорной плиты с упорами фитингов, имеющей возможность поворота вокруг центра (рис. 6), что обеспечит равномерное распределение нагрузки между упорами фитингов [13]. Применение опорных плит с упорами фитингов обеспечит надежное крепление съемных кузовов при увеличенных нагрузках.

Опорная плита с упорами фитингов работает следующим образом: в ходе эксплуатации вагон-платформы со съемным кузовом при продольных ударах значительной силы, превышающих силы трения между опорной плитой и концевыми балками вагон-платформы, съемный кузов начинает перемещаться, выбирается зазор  $\sigma_1$  между упором фитинга и нижним фитингом (рис. 7, а). После выбора зазора и соприкосновения упора фитинга с

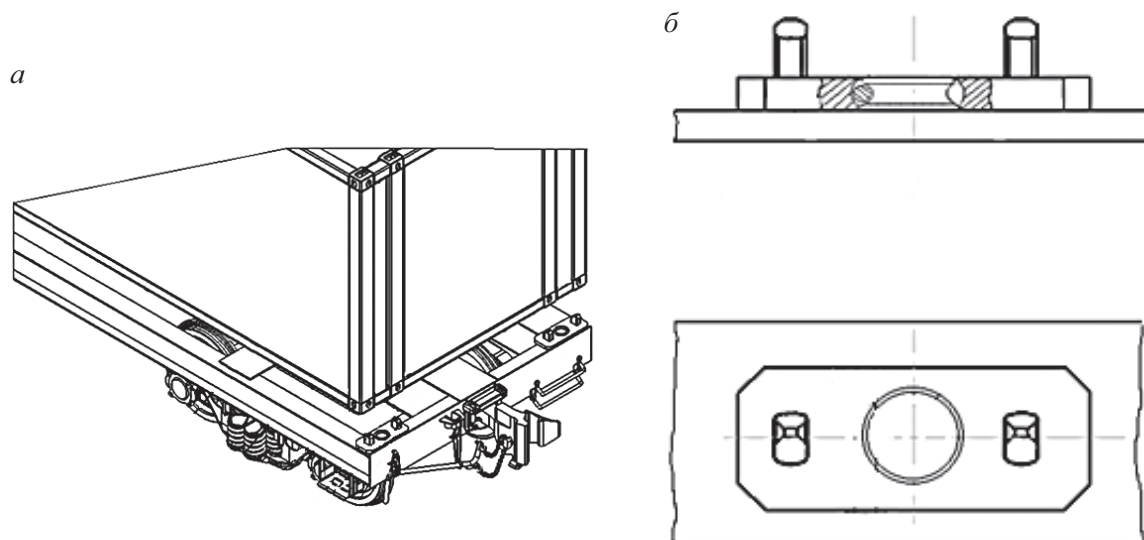


Рис. 6. Опорная плита с упорами фитингов:  
*a* – вагон-платформа, оснащенная опорными плитами; *б* – общий вид опорной плиты

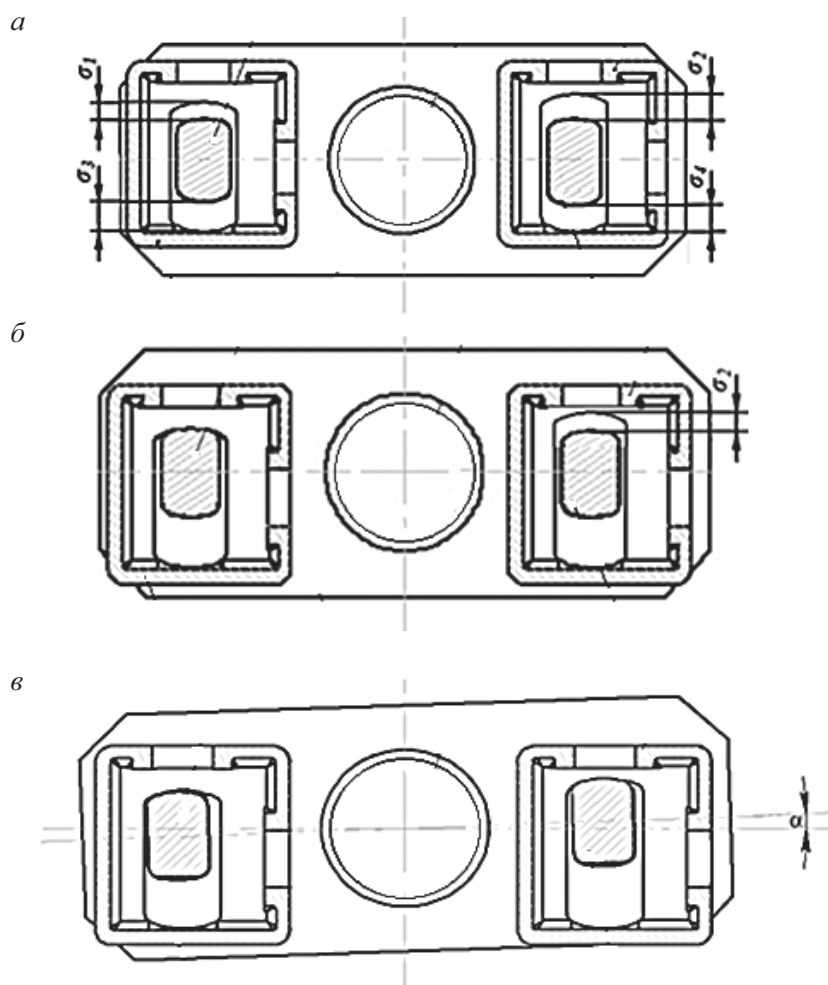


Рис. 7. Опорная плита с упорами фитингов:  
*a* – неравные зазоры; *б* – выбор зазоров; *в* – отсутствие зазоров

фитингом опорная плита поворачивается вокруг оси до выбора  $\sigma_2$  между вторым упором фитинга и фитингом (рис. 7, б), опорная плита переместится на угол  $\alpha$ . После перемещения опорной плиты на угол  $\alpha$  при соударениях вагонов нагрузки между упорами фитингов выровняются (рис. 7, в). Если первоначально зазор  $\sigma_2$  будет больше  $\sigma_1$ , то упор фитинга повернется в другую сторону и нагрузки также будут равномерными.

Верхние фитинги съемного кузова расположены на ширине, стандартной для контейнеров ISO, что дает возможность осуществлять подъем съемного кузова грузоподъемным оборудованием, таким как кран козлового типа, ричстакер, погрузчик, а также складировать порожние съемные кузова ярусами.

### Преимущества предлагаемых съемных кузовов

Предлагаемые съемные кузова по сравнению с контейнерами и съемными кузовами зарубежного производства обладают значительно лучшей технической характеристикой и имеют ряд преимуществ (табл. 3). Так, в сравнении с контейнерами аналогичной длины (серии 1 EE), объем которых составляет 78,8 м<sup>3</sup>, а вес перевозимого груза 26 т, съемный кузов

позволяет увеличить вес перевозимого груза до 73 т и объем кузова до 115 м<sup>3</sup>.

Конструкция зарубежных съемных кузовов не предусматривает складирование ярусами, рассматриваемая рассчитана на многоярусное складирование, что позволит использовать меньшие складские площадки.

Применение вагонов со съемными кузовами дает возможность сократить простои, а также обеспечить максимальную эксплуатацию вагон-платформы на протяжении всего жизненного цикла без спада спроса при сезонных колебаниях отправки грузов.

### Выводы

Предложены технико-экономические параметры нового для железной дороги колеи 1520 мм подвижного состава — вагонов со съемными кузовами увеличенного объема и грузоподъемности, в которых основная и наиболее дорогая часть (рама с ходовыми частями, тормозами и автосцепным устройством) будет постоянно эксплуатироваться, а съемные кузова будут меняться в зависимости от запросов на рынке перевозок.

Разработан перспективный модельный ряд съемных кузовов, позволяющий перевозить широкую номенклатуру грузов.

ТАБЛИЦА 3. Сравнение технических характеристик съемных кузовов с контейнером аналогичной длины и съемным кузовом зарубежного производства

Наименование параметров	Предлагаемый съемный кузов	Контейнер серии 1 EE DCPW1 EE	Съемный кузов WASCOSA
Перевозимые грузы	Насыпные и навалочные грузы		
Масса тары не более, т	9,25	4,05	13
Грузоподъемность, т	73	26,43	59,61
Объем, м <sup>3</sup>	115	78,8	85,72
Размеры кузова наружные максимальные:			
Длина, мм	13 716	13716	18320
Ширина, мм	3250	2438	2430
Высота, мм	3080	2591	—



Предложенные вагоны со съёмными кузовами имеют основные преимущества:

- в сравнении с контейнерами серии 1 EE:
  - повышение веса перевозимого груза до 73 т вместо 26 т,
  - увеличение объема до 115 м<sup>3</sup> вместо 78,8 м<sup>3</sup>;
- в сравнении с зарубежными съёмными кузовами:
  - увеличение ширины съёмного кузова до 3250 мм вместо 2900 мм,
  - многоярусное складирование,
  - бóльший объем,
  - повышенная грузоподъемность;
- в сравнении со специализированными вагонами:
  - снижение затрат на оплату простоя на железнодорожных путях,
  - сокращение потребного парка подвижного состава на 10–30%,
  - уменьшение капиталовложений при покупке подвижного состава (с учетом съёмных кузовов) на 40%,
  - обеспечение максимальной эксплуатации вагонов на протяжении всего жизненного цикла,
  - снижение стоимости ремонта,
  - сокращение простоев на погрузочно-разгрузочных операциях, а также при сезонных колебаниях объемов перевозок грузов.

Разработано устройство крепления, обеспечивающее надежную фиксацию съёмного кузова на раме вагон-платформы при повышенных нагрузках на крепежные элементы и увеличенной грузоподъемности съёмного кузова.

В совокупности указанные преимущества позволяют оптимизировать технологию переработки поездов, повысить экономическую эффективность вагонов, и в конечном итоге переход к предложенной грузовой системе – это путь к увеличению эффективности железных дорог.

## Библиографический список

1. Шуркина В. С. Краткий автомобильный справочник / В. С. Шуркина, И. Д. Тузовский. – М. : Транспорт, 1979. – 464 с.
2. Леншин И. А. Логистика. Ч. 1–2 / И. А. Леншин, Ю. И. Смоляков. – М. : Машиностроение, 2002. – 424 с.
3. Шпур Г. Автоматизированное проектирование в машиностроении / Г. Шпур, Ф. Краузе ; пер. с нем. Г. Д. Волковой и др. – М. : Мир, 1991. – 648 с.
4. Лукинский В. С. Логистика автомобильного транспорта: учеб. пособие / В. С. Лукинский, В. И. Бережной, Е. В. Бережная. – М. : Финансы и статистика, 2004. – 368 с.
5. SECU-Box for Better utilization of Load Capacity. Advantage Environment – 2009. – URL : <http://advantage-environment.com> (дата обращения: 10.04.2015).
6. WASCOSA's flex freight system. Edition. Switzerland, 2012. – URL : <http://www.wascosa.ch> (дата обращения: 10.04.2017).
7. Патент № CH 700850 (A1) по кл. B61D3/00 от 29.10.2010. – URL : <http://www1.fips.ru> (дата обращения: 10.04.2017).
8. UIC CODE 592-4. Swap bodies for grab handling and spreader gripping. Technical conditions. – Intr. 2007-05-03. – Paris, France, 2003. – 44 p.
9. Innofreight. – URL : <http://www.wascosa.ch> (дата обращения: 05.04.2017).
10. Патент № EP1690809 (A2) по кл. B61D9/00; B65D88/00; B65D88/12; B65D88/56; B66F9/18 от 16.08.2006. – URL : <http://www1.fips.ru> (дата обращения: 05.04.2017).
11. Даукша А. С. Съёмные кузова – инновационный вариант совершенствования конструкции вагонов / А. С. Даукша // Системы автоматизированного проектирования на транспорте : сб. тр. V Междунар. науч.-практич. конференции. – СПб. : ПГУПС, 2014. – С. 50–52.
12. Даукша А. С. Совершенствование вагонов на основе использования съёмных кузовов / А. С. Даукша, Ю. П. Бороненко // Подвижной состав XXI века: идеи, требования, проекты : сб. тр. X Междунар. науч.-технич. конференции. – СПб. : ПГУПС, 2015. – С. 45–53.
13. Заявка на патент на вагон-платформу со съёмными кузовами № 2016144496 от 14.11.2016. – URL : <http://www1.fips.ru> (дата обращения: 14.11.2016).
14. Заявка на патент на съёмный кузов закрытого типа № 2016152492 от 29.12.2016. – URL : <http://www1.fips.ru> (дата обращения: 29.12.2016).

15. Заявка на патент на съемный кузов-цистерну № 2017108170 от 13.03.2017. – URL : <http://www1.fips.ru> (дата обращения: 13.04.2017).

16. Заявка на патент на съемный кузов для грузов, не требующих защиты от атмосферных осадков № 2017108176 от 13.03.2017. – URL : <http://www1.fips.ru> (дата обращения: 15.04.2015).

17. ГОСТ Р 20527–2008. Фитинги угловые крупнотоннажных контейнеров. Конструкция и размеры. – Введ. 1983-01-01. – М. : ИПК Изд-во стандартов, 2004. – 10 с.

18. ГОСТ Р 51891–2008. Контейнеры грузовые серии 1. Фитинги. Технические условия. – Введ. 2008-06-23. – М. : Стандартинформ, 2008. – 31 с.

19. Kentner Pat. The Car & Locomotive Cyclopedic / Pat. Kentner, B. Brundige, J. C. Thorpe, J. Winfield, W. W. Kratville, L. J. O'Connor. – Hardcover : Simmons Boardman Publ. Co, 1997. – 1136 p.

## References

1. Shurkyns V.S. & Tuzovskiy I.D. *Kratkiy avtomobilnyy spravochnik* [Automotive pocket book]. Moscow, Transport Publ., 1979, 464 p. (In Russian)

2. Leshyn I.A. & Smolyakov Y.I. *Logistika* [Logistics]. Moscow, Mashinostroyeniye Publ., 2002, pt. 1–2, 424 p. (In Russian)

3. Shpur G. & Krauze F. *Avtomatizirovannoye proyektirovaniye v mashinostroyenii* [Automated design engineering in mechanical engineering]. Moscow, Mir Publ., 1991, 648 p. (In Russian)

4. Lukinskiy V.S., Berezhnoy V.I. & Berezhnaya Y.V. *Logistika avtomobyl'nogo transporta* [Highway transport logistics]. Moscow, Fynansy i statystyka [Account and statistics] Publ., 2004, 368 p. (In Russian)

5. *SECU-Box for Better utilization of Load Capacity. Advantage Environment, 2009.* – URL: <http://advantage-environment.com> (accessed: 10.04.2017)

6. *WASCOSA's flex freight system.* Edition. Switzerland, 2012. – URL: <http://www.wascosa.ch>. (accessed: 10.04.2017)

7. *Patent no. CH 700850 (A1) po kl. B61D3/00 ot 29.10.2010* [Patent N CH 700850 (A1) cl. B61D3/00 dated 29.10.2010]. – URL: <http://www1.fips.ru> (accessed: 10.04.2017).

8. *UIC CODE 592–4. Swap bodies for grab handling and spreader gripping. Technical conditions. Intr. 2007-05-03.* Paris, France, 2003, 44 p.

9. *Innofreight.* – URL: <http://www.wascosa.ch> (accessed: 05.04.2017) (In Russian)

10. *Patent no. EP1690809 (A2) po kl. B61D9/00; B65D88/00; B65D88/12; B65D88/56; B66F9/18 ot 16.08.2006* [Patent N EP1690809 (A2) cl. B61D9/00; B65D88/00; B65D88/12; B65D88/56; B66F9/18 dated 16.08.2006]. – URL: <http://www1.fips.ru> (accessed: 05.04.2017) (In Russian)

11. Dauksha A. S. Syemniye kuzova – innovatsionny variant sovershenstvovaniya konstruktsii vagonov. *Systemy avtomatizirovannogo proyektirovaniya na transporte* [Swap bodies – innovative version of railroad cars design development. Engineering automated systems on transport]. *Sbornyk trudov V Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Proceedings of the 5th International training conference]. Saint Petersburg, PGUPS Publ., 2014, pp. 50–52. (In Russian)

12. Dauksha A. S. & Boronenko Y. P. Sovershenstvovaniye vagonov na osnove ispolzovaniya syemnykh kuzovov [Railroad cars improvement on the basis of swap bodies application]. *Podvyzhnoy sostav XXI veka: idei, trebovaniya, projekty. Sbornyk trudov X Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Rolling stock of the XXIst century: ideas, requirements, projects. Proceedings of the 10th International training conference]. Saint Petersburg, PGUPS Publ., 2015, pp. 45–53. (In Russian)

13. *Zayavka na patent na vagon-platformu so syemnymi kuzovami N 2016144496 ot 14.11.2016* [Application for a patent on flat wagons with swap bodies N 2016144496 dated 14.11.2016]. – URL: <http://www1.fips.ru> (accessed: 14.11.2016) (In Russian)

14. *Zayavka na patent na syemniy kuzov zakrytogo tipa* [Application for a patent on close type swap body N 2016152492 dated 29.12.2016]. – URL: <http://www1.fips.ru>. (accessed: 29.12.2016) (In Russian)

15. *Zayavka na patent na syemniy kuzov-tsisternu N 2017108170 ot 13.03.2017* [Application for a patent on a swap tank-car body N 2017108170 dated 13.03.2017]. – URL: <http://www1.fips.ru> (accessed: 13.04.2017) (In Russian)

16. *Zayavka na patent na syemniy kuzov dlya грузов, ne trebuyushykh zashyty ot atmosferykh osadkov N 2017108176 ot 13.03.2017.* [Application for a

*patent on a swap body for weather sustainable loads N 2017108176 dated 13.03.2017*]. – URL: <http://www1.fips.ru>. (In Russian)

17. GOST R 20527–2008. *Fitingy ugloviye krupnotonnazhnykh konteinerov. Konstruktsiya i razmery* [State Standard R 20527–2008. *Angle fittings for gross weight freight containers. Design and dimensions*]. *Intr. 1983–01–01*. Moscow, IPK Publishing and Printing Complex, 2004, 10 p. (In Russian)

18. GOST R 51891–2008. *Konteynery gruzoviye serii 1. Fitingy. Tekhnicheskiye usloviya* [State Standard R 51891–2008. *Lot 1 freight containers. Fittings. Technical regulations*]. *Intr. 2008–06–23*. Moscow, Standartinform Publ., 2008, 31 p. (In Russian)

19. Kentner Pat, Brundige B., Thorpe J. C., Winfield J., Kratville W. W. & O'Connor L. J. *The Car & Locomotive Cyclopedia*. Hardcover, Simmons Boardman Pub Co Publ., 1997, 1136 p.

БОРОНЕНКО Юрий Павлович – доктор техн. наук, профессор, boron49@ya.ru; \*ДАУКША Анфиса Сергеевна – аспирант, ads1989@rambler.ru (Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I).

УДК 654.024

**А. А. Привалов, Е. В. Скуднева****ПОДХОД К ОЦЕНКЕ МАСКИРОВАНИЯ ИНФОРМАЦИОННОГО ОБМЕНА  
В СЕТЯХ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ ОПЕРАТИВНО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО  
НАЗНАЧЕНИЯ ПРИ ЦЕЛЕВЫХ АТАКАХ**

Дата поступления: 20.06.2017

Решение о публикации: 27.06.2017

**Аннотация**

**Цель:** Определить мероприятия по обеспечению защиты сети от технической компьютерной разведки организованного нарушителя. Разработать предложения для затруднения вскрытия телекоммуникационной сети в ходе информационного обмена в IP-сетях передачи данных оперативно-технологического назначения. Сформировать «информационные портреты», соответствующие обмену служебной информацией в IP-сети между должностными лицами при выполнении технологических процессов. Оценить вероятность вскрытия пространственно-временной и информационной структур IP-сети при включении предложенной методики в специальном математическом программном обеспечении (СМПО) системы управления информационной безопасностью при реализации целевой атаки организованным нарушителем. **Методы:** Для решения задачи использовались методы системного анализа, теории вероятности, топологического преобразования стохастических сетей, методы поиска пути минимальной стоимости с использованием алгоритма муравьиных колоний и генетического алгоритма. **Результаты:** Разработана методика маскирования информационного обмена в IP-сетях передачи данных в ходе реализации целевой атаки организованным нарушителем, которая включает в себя блок-схемы процедур реализаций генетического и биологического алгоритмов, формирование «информационных портретов», соответствующих передаваемой по IP-сети служебной информации при реализации технологических процессов. **Практическая значимость:** Данная методика ориентирована на включение в состав СМПО для обеспечения системы управления информационной безопасностью. Методика позволяет оценить возможности организованного нарушителя на этапе сбора информации, наблюдения за IP-сетью и выбором успешного момента времени для осуществления целевой атаки. Разработанные блок-схемы позволяют определить место и время реализации нарушителем типовых угроз, с помощью которых он выявляет вид технологического процесса и наиболее подходящий момент для деструктивного воздействия. Блок-схемы соответствуют логике действий нарушителя при вскрытии IP-сети и системы в целом и могут быть использованы для прогнозирования действий нарушителя по распознаванию сети. Предложенные мероприятия по организации информационного обмена обеспечивают существенное снижение вероятности вскрытия IP-сети. Полученные результаты показывают необходимость включения алгоритмов в перечень информационно-расчетных задач системы поддержки принятия решения, что дает возможность более глубоко проанализировать возможности организованного нарушителя при осуществлении целевых атак.

**Ключевые слова:** Телекоммуникационная сеть, сканирование сети, информационный обмен, целевая атака, сеть передачи данных.

**Andrey A. Pryvalov**, D. Military Sci., professor, aprivalov@inbox.ru; **\*Yekaterina V. Skudneva**, postgraduate student, skykatty@gmail.com (Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University) INFORMATION TRAFFIC MASKING APPROACH IN DATA COMMUNICATION NETWORKS OF OPERATIONALLY TECHNOLOGICAL PURPOSE DURING TARGETED ATTACKS

## Summary

**Objective:** To determine activities on providing network security from technical computer intelligence of an organized attacker. To develop suggestions on impeding telecommunication network breaking in the process of information exchange in IP-based operational data networks. To form “information portraits”, corresponding to service information exchange between the officials during processing procedure in IP-based network. To assess breaking probability of spatiotemporal and information structures of IP-based network, when initiating the suggested technique in special mathematical software application (SMSA) of information security management system during a targeted attack, realized by an organized attacker. **Methods:** The method of systems analysis, probability theory, stochastic networks topological transformation, methods of searching the lowest value path with ant colony optimization and genetic algorithm application. **Results:** Information traffic masking technique in IP-based data communication networks was developed in the course of targeted attack realized by an organized attacker, the former includes block-diagrams of genetic and biologic algorithms procedures realization, formation of “information portraits”, corresponding to service information conveyed through IP-based network during technological processes realization. **Practical importance:** The technique in question is aimed at SMSA integration in order to provide the management system with information security. The presented technique makes it possible to assess the resources of an organized attacker at the stage of data acquisition, IP-based network supervision and the selection of an opportune moment for targeted attack implementation. The developed block-diagrams allow for identification of the place and time of typical threats realized by an organized attacker, by means of which the latter detects the type of technological process and the most opportune moment for a ravage. Block-diagrams correspond to attacker’s logic of actions when breaking IP-based network and the system as a whole and may be used for predicting attacker’s actions on network identification. The suggested measures on information exchange organization ensure considerable decrease the degree of IP-based network breaking probability. The obtained results demonstrate the necessity of including the algorithms in question in the list of information-computing tasks of decision support system, which makes it possible to carry out an in-depth analysis of the resources, allowing an organized attacker to implement targeted attacks.

**Keywords:** Telecommunication network, scanning of a network, information traffic, targeted attack, data communication network.

## Введение

Информационные технологии и информационные ресурсы упрощают ведение технической компьютерной разведки (ТКР) благодаря внедрению средств вычислительной техники, программного обеспечения, включая программные средства защиты информации, которые используют открытые протоколы взаимодействия, импортируемые или произведенные по стандартам и лицензиям иностранных фирм.

Организованный нарушитель средствами ТКР способен реализовать целевую атаку [1–3], которая делится на ряд этапов: вскрытие структуры сети, тестирование элементов сети передачи данных и уничтожение следов присутствия.

Вскрытие структуры сети передачи данных оперативно-технологического назначения (СПД ОТН) возможно посредством отображения процесса управления движением поездов, который характеризуется рядом демаскирующих признаков (ДМП). Обмен информацией совершается с использованием каналов связи, сетевого и телекоммуникационного оборудования. Таким образом, наблюдая за СПД ОТН, можно выявить корреспондентов и время взаимодействия, объем передаваемой информации между ними, место определения, выявления источников команд. Эти ДМП находят отражение в пространстве применяемых IP-адресов.

Значения ДМП в пределах выполнения того или иного этапа технологического процесса различные. Следовательно, на протяже-

нии функционирования автоматизированных систем управления происходит изменение информационной и пространственно-временной структур сети. Организованный нарушитель с помощью ТКР осуществляет сбор информации о деятельности компании и основных этапах производственного процесса с целью выбора критически важных элементов, воздействие на которые поставит под угрозу успешность реализации технологического процесса. Таким образом, актуализируется проблема обеспечения защиты СПД ОТН и автоматизированных систем управления технологическими процессами от ТКР организованного нарушителя.

All Sources Analysis System (ASAS) – американская автоматизированная система обработки и анализа разведывательных данных военного назначения [4] – применялась для управления разведкой. ASAS собирает, оценивает и сопоставляет распределенную информацию по войскам и выдает целеуказания. Результаты работы использовались для радиоразведки. Следовательно, для защиты IP-сетей от ТКР организованного нарушителя не применимы.

Таким образом, в статье предлагается подход к методике маскирования информационного обмена в СПД ОТН и оценки защищенности IP-сетей от ТКР. Методика препятствует вскрытию этапа производственного процесса при целевой атаке.

### Постановка задачи

Пусть имеется СПД ОТН, состоящая из сетевых элементов и линий связи. По сети производится информационный обмен между оперативными работниками для выполнения технологического процесса. Организованный нарушитель по средствам ТКР реализует угрозу типа «Сканирование сети» с целью сбора и обработки информации для проведения целевой атаки.

Требуется определить вероятность распознавания структуры СПД ОТН ( $P_{i/b}$ ), соот-

ветствующей заданному виду деятельности должностных лиц, за время производственного этапа при реализации мероприятий по маскированию.

### Решение

Решение поставленной задачи необходимо произвести в несколько этапов.

*Этап 1* – вычисление вероятности и времени реализации угрозы «Анализ перехвата сетевого трафика» организованным нарушителем. ТКР обрабатывают пакеты сообщений на канальном и сетевом уровнях. Определяются корреспонденты, команды управления и информационные сообщения. Исходные данные для расчета:  $t_{\text{зап}}$  – среднее время запуска программно-аппаратного комплекса;  $t_{\text{инф}}$  – среднее время перехвата информации;  $P_n$  – вероятность перехвата информации;  $t_{\text{пер}}$  – среднее время осуществления перехвата информации;  $t_{\text{стат. анализ}}$  – среднее время подготовки отчета о статистическом анализе сетевого сканера;  $t_{\text{повт}}$  – среднее время повторного запуска сетевого сканера.

Эквивалентная функция петли  $k$ -го порядка рассчитывается по формуле

$$Q_k(s) = \prod_{i=1}^k Q_i(s), \quad (1)$$

в которой  $Q_i(s)$  – эквивалентная функция  $i$ -й петли первого порядка, определяемая, как произведение эквивалентных функций ветвей, входящих в эту петлю.

Тогда уравнение для эквивалентной функции (1) примет вид

$$1 - w(s) \cdot m(s) \cdot l(s) \cdot P_n \cdot d(s) / h(s) - (1 - P_n) \cdot z(s) \cdot l(s) = 0,$$

здесь при использовании преобразования Лапласа–Стилтьеса получаем

$$W(s) = \frac{w}{w+s}, \quad M(s) = \frac{m}{m+s},$$

$$D(s) = \frac{d}{d+s},$$

$$L(s) = \frac{l}{l+s}, \quad Z(s) = \frac{z}{z+s},$$

где  $w = 1/t_{\text{зап}}$ ;  $m = 1/t_{\text{инф}}$ ;  $l = 1/t_{\text{пер}}$ ;  $d = 1/t_{\text{стат. анализ}}$ ;  $z = 1/t_{\text{повт}}$ .

Рассчитаем начальные моменты случайного времени реализации стохастической сети

$$M_1 = -\frac{d}{ds} \left[ \frac{Q(s)}{Q(0)} \right]_{s=0},$$

$$M_2 = \frac{d^2}{ds^2} \left[ \frac{Q(s)}{Q(0)} \right]_{s=0}.$$

Таким образом, среднее время  $t_n = M_1$ , дисперсия времени  $D[t_n] = M_2 - (M_1)^2$ .

Функция распределения зависимости времени от вероятности анализа сетевого трафика рассчитывается по формуле

$$F(t, P) = \begin{cases} 0, & t < 0, \\ \int_0^t \frac{\mu(P_n) \alpha(P_n)}{\Gamma(\alpha(P_n))} \cdot x^{\alpha(P_n)-1} \cdot e^{-\mu(P_n) \cdot x} dx, & t > 0, \end{cases} \quad (2)$$

где  $\alpha = M_1^2/M_2$ ;  $\mu = M_1/M_2$  – параметры формы и масштаба.

График функции распределения времени анализа сетевого трафика (2) при различных значениях вероятности доступа показан на рис. 1.

Далее определяются вероятности обнаружения сообщений на IP-сети [5].

Затем находится функция времени обнаружения IP-пакетов при сканировании сети, полученная с использованием метода топологического преобразования стохастических сетей (ТПСС), показанная на рис. 2. Вероятность обнаружения  $P_{\text{обнаружения}}(t_{\text{сеанса}})$  можно определить с помощью функции на рис. 2.

Функция распределения времени обнаружения сообщений при сканировании IP-сети принимает вид

$$F(t) = \sum_{i=1}^2 \frac{P_{\text{ск}} a \rho (b + s_i)}{(2s_i + a + bP_{\text{ск}}) \cdot (-s_i)} \cdot (1 - e^{s_i t}),$$

где  $a = 1/t_{\text{сканир}}$ ;  $b = 1/t_{\text{паузы}}$ ;  $\rho = t_{\text{сообщения}} / (t_{\text{паузы}} + t_{\text{сканир}})$ ;

$$s_{1,2} = \frac{-(a + P_{\text{ск}} \cdot b) \pm \sqrt{(a + P_{\text{ск}} \cdot b)^2 - 4P_{\text{ск}} \rho a b}}{2}.$$

Далее производится расчет интенсивности передачи сообщений на узлах и сетевых

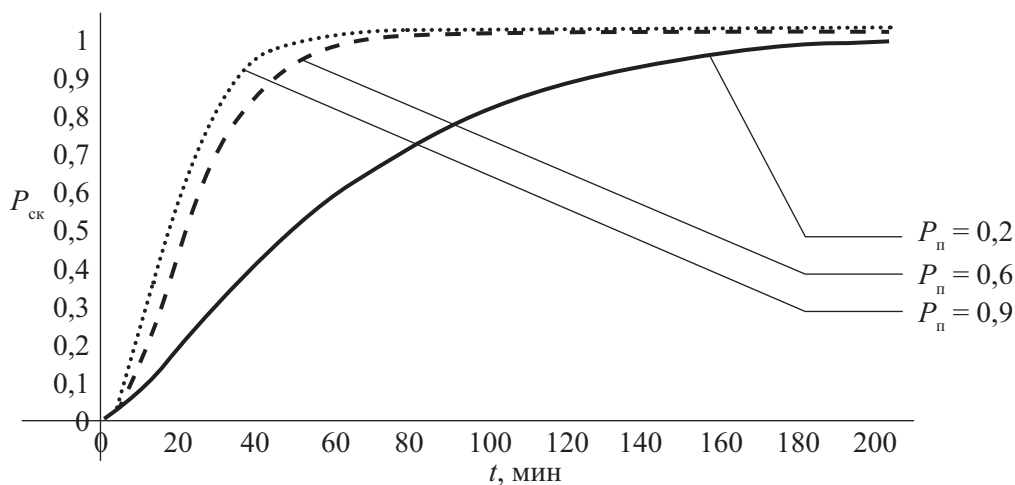


Рис. 1. Функции распределения времени анализа сетевого трафика при различных значениях вероятности перехвата трафика

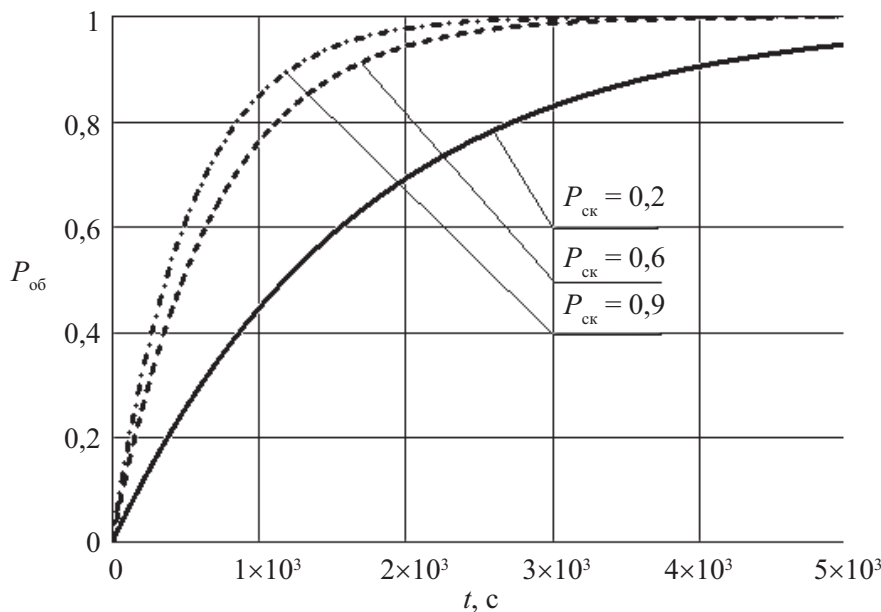


Рис. 2. Функции распределения времени обнаружения сообщений при разных значениях вероятности успешного сканирования IP-сети

устройствах, а также накопленной вероятности обнаружения терминалов IP-сети [6].

Результат представляет собой зависимость вероятности обнаружения узлов от времени реализации первого этапа целевой атаки.

Таким образом, организованный нарушитель без использования типовых мероприятий по маскированию информационного обмена в течение типовой длительности этапа технологического процесса вскрывает установленный вид деятельности должностных лиц по наблюдаемому информационному обмену с вероятностью не хуже 0,9.

На *этапе 2* формируется набор «информационных портретов» [7, 8], которые соответствуют этапам технологического процесса. Способы обработки разведанной информации организованным нарушителем не известны.

Следовательно, возникает задача разработки типовых «информационных портретов».

Для «поиска кратчайшего пути» на графе применяются алгоритмы муравьиных колоний (АМК) [9] либо генетический алгоритм [6].

Генетический алгоритм рекомендуется использовать на этапе эксплуатации сети. Для расчета данных целевая функция принимает вид

$$P_{a,b} = \sum_n \sum_{i,j \in V} q_n(i,j) X_{a,b}^n \lambda_{ij},$$

где  $P_{a,b}$  – степень пропускной способности узлов;  $q_n(i,j)$  – определенная вероятность маршрута;  $X_{a,b}^n$  – наличие связи между узлами;  $\lambda_{ij}$  – пропускная способность маршрута.

АМК рекомендуется использовать на этапе проектирования и развертывания сети, где вероятность перехода на ребро  $k$ -го муравья от узла  $i$  в узел  $j$  на итерации  $t$  равна

$$P_{ij,k}(t) = \frac{\tau_{ij}(t)^\alpha \cdot \eta_{ij}^\beta}{\sum_m \tau_{im}(t)^\alpha \cdot \eta_{im}^\beta}.$$

В результате полученных решений при моделировании определяется совокупность кратчайших путей, свойственных тому или иному этапу реализации технологических процессов.

Сравнительные исследования данных алгоритмов выявили, что АМК содержит большую эффективность при оптимизации системы.

На *этапе 3* выполняется алгоритм распознавания соответствия информационного портрета и структуры подграфа сети, отвечающего реализуемому этапу технологического процесса.



Процедура распознавания основана на применении теоремы [10] о соответствии циклов изоморфных графов. Для сравнения используются полученные ранее информационные портреты, представленные в виде графов-эталонов, а в качестве графов-реализации – параметры и структуры сети передачи данных, наблюдаемые в реальном времени. В ходе вычислений граф-реализации уточняется и дополняется, так как изменяется во времени. В результате принимается решение о вложении одного из графов-эталонов в граф-реализации, что будет соответствовать одному из этапов технологического процесса [11].

Этап 4 подразумевает вычисление вероятности структурной скрытности распознавания во времени:

$$P_{ik} = w_i(k)/N^*,$$

где  $w_i(k)$  – число случаев, когда граф реализации относится к  $i$ -му эталону при фактическом розыгрыше  $k$ -го элемента.

Расчеты показывают, что за время около 3 ч работы СПД ОТН нарушитель с вероятностью не хуже 0,9 способен распознавать деятельность должностных лиц, реализующих заданный этап технологического процесса.

С целью затруднения распознавания деятельности должностных лиц организованным нарушителем был разработан алгоритм, показанный на рис. 3.

Реализация мероприятий осуществляется путем установки виртуальных сервисов и сетевых элементов, формирующих  $k$ -связные информационные портреты, наблюдаемые нарушителем при сканировании сети. Это позволяет разорвать связь между наблюдаемым информационным обменом в СПД ОТН и

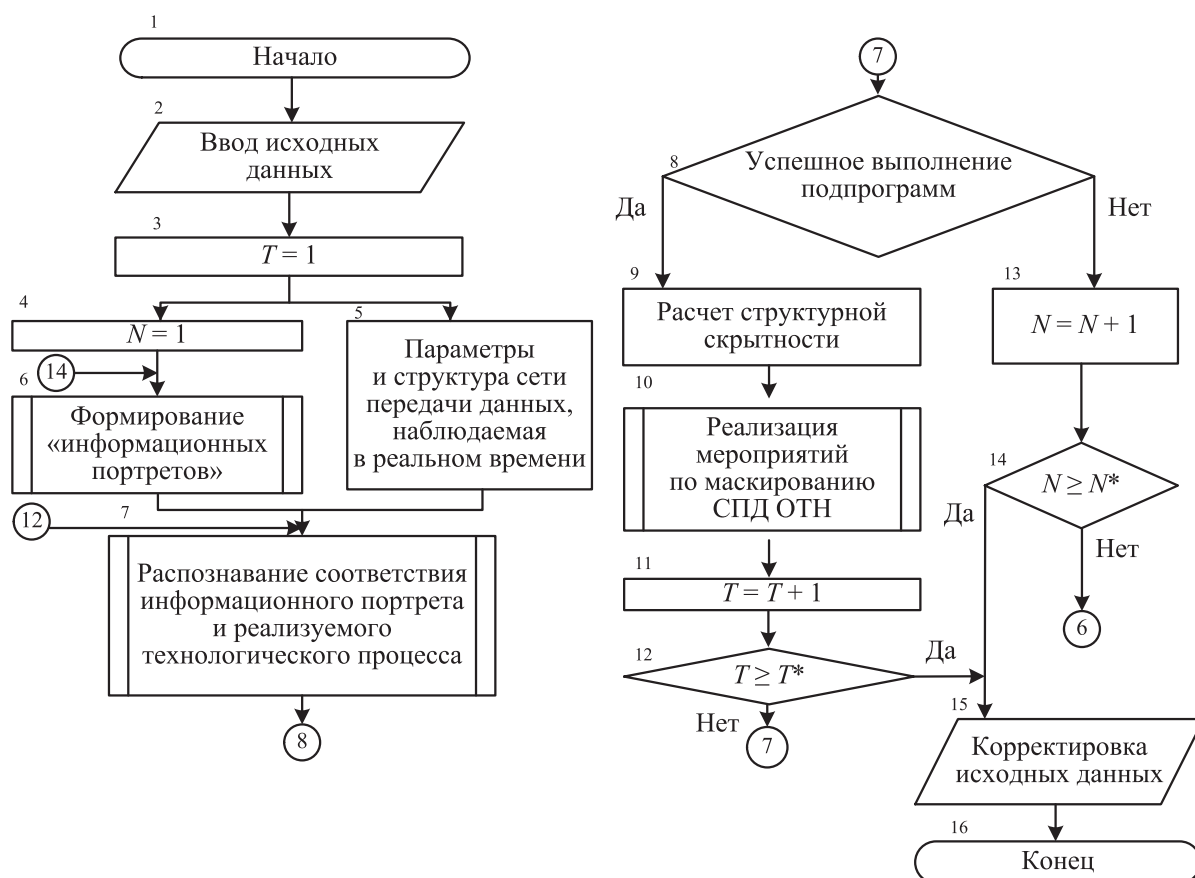


Рис. 3. Блок-схема маскирования ТКС, обеспечивающий затруднение вскрытия деятельности должностных лиц

деятельностью должностных лиц, что существенно затрудняет вскрытие их деятельности средствами ТКР.

Информационный обмен необходимо организовывать между терминалами должностных лиц и виртуальными сервисами. Сетевые элементы, не участвующие в информационном обмене на любом из этапов, также должны осуществлять маскирующий обмен, который будет имитировать деятельность должностного лица на других этапах. Перечисленные мероприятия (рис. 3) направлены на обеспечение правдоподобности информационного обмена, наблюдаемого нарушителем.

Таким образом, при сканировании IP-сети нарушитель будет наблюдать «параллельную» реализацию всех этапов технологического процесса. Затрудняется задача сопоставления конкретного информационного портрета к технологическому процессу, выполняемому в данный момент времени.

Реализация указанных выше мероприятий обеспечивает существенное снижение вероятности вскрытия СПД ОТН. Так, через 3 ч работы СПД ОТН вероятность ее вскрытия организованным нарушителем не превышает 0,4. Результаты моделирования представлены на рис. 4.

Следует учесть, что представленные мероприятия существенно затрудняют реализацию нарушителем целевой атаки, тогда

при управлении информационным обменом  $k$ -изоморфная структура перестает меняться от этапа к этапу.

## Заключение

Таким образом, при сканировании IP-сети организованный нарушитель будет наблюдать «параллельную» реализацию всех этапов технологического процесса. Следовательно, усложняется задача выделения конкретного «информационного портрета» к заданному моменту времени и осуществления привязки результата сканирования сети к конкретному этапу технологического процесса и роду деятельности должностных лиц. Однако «ложный» вид деятельности должен иметь минимальное количество общих узлов с реально выполняемым технологическим процессом.

В итоге проведенный авторами анализ показал, что реализация указанных выше мероприятий обеспечивает существенное снижение вероятности вскрытия ТКС.

Разработанный алгоритм маскирования СПД ОТН способен усложнить организованному нарушителю процесс успешной реализации целевых атак и обеспечить не только безопасность, но и повышение устойчивости СПД по отношению к различным видам информационных воздействий.

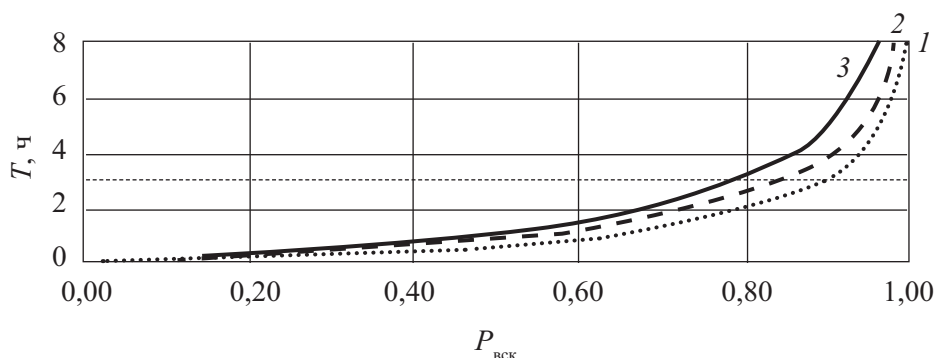


Рис. 4. Функции распределения времени вскрытия  $k$ -й структуры при условии реализации типовых мероприятий по маскированию информационного обмена и реализации демонстративных действий:  
 $1 - P_i(T)$ ;  $2 - P_j(T)$ ;  $3 - P_k(T)$

**Библиографический список**

1. Lau Lap Bann. Trusted Security Policies for Tackling Advanced Persistent Threat via Spear Phishing in BYOD Environment Procedia / Lau Lap Bann, Manmeet Mahinderjit Singh, Azman Samsudin // *Computer Science*. – 2015. – N 72. – P. 129–136.

2. Лукацкий Ал. Целенаправленные атаки: из жизни невидимок / Ал. Лукацкий // *Безопасность деловой информации*. – 2014. – № 6. – С. 4–9.

3. Прозоров А. Как борются с АРТ / А. Прозоров // *Безопасность деловой информации*. – 2014. – № 6. – С. 14–15.

4. Греков В. Автоматизированная система обработки и анализа разведывательных данных ASAS / В. Греков // *Зарубежное воен. обозрение*. – 1990. – № 12. – С. 27–35.

5. Скуднева Е. В. Модель процесса передачи однопакетного сообщения по IP-сети / Е. В. Скуднева, Ю. С. Карабанов, В. О. Кириленко, Е. О. Болтенкова // *Бюл. результатов научных исследований*. – 2015. – Вып. 1 (14). – С. 84–95.

6. Бураков М. В. Генетический алгоритм: теория и практика : учеб. пособие / М. В. Бураков. – СПб. : ГУАП, 2008. – 164 с.

7. Привалов А. А. Методика формирования типовых портретов IP-сети для распознавания органов управления технологическим процессом на основе генетических алгоритмов / А. А. Привалов, Е. В. Скуднева // *Сб. тр. 71-й науч.-технич. конференции, посвященной Дню радио*. Санкт-Петербург, 20–28 апр. 2016 г. – СПб. : Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2016. – С. 210–211.

8. Привалов А. А. Подход к формированию типовых портретов IP-сети на основе биологических алгоритмов / А. А. Привалов, Е. В. Скуднева // *Сб. тр. 71-й науч.-технич. конференции, посвященной Дню радио*. Санкт-Петербург, 20–28 апр. 2016 г. – СПб. : Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2016. – С. 211–212.

9. Штовба С. Д. Муравьиные алгоритмы / С. Д. Штовба // *Exponenta Pro. Математика в приложениях*. – 2003. – № 4. – С. 70–75.

10. Куделя В. Н. Методы математического моделирования систем и процессов связи / В. Н. Куделя, А. А. Привалов, О. В. Петриева, В. П. Чемиренко ; под общ. ред. В. П. Чемиренко. – СПб. : Изд-во Политехн. ун-та, 2009. – 368 с.

11. Привалов А. А. Подход к оценке вероятности вскрытия пространственно-временной и информационной структуры СПД ОТН / А. А. Привалов, Ал. А. Привалов, Е. В. Скуднева, И. В. Чалов // *Изв. Петерб. ун-та путей сообщения*. – СПб. : ПГУПС, 2015. – Вып. 3 (44). – С. 165–172.

**References**

1. Bann Lau Lap & Singh Manmeet Mahinderjit, Samsudin Azman. Trusted Security Policies for Tackling Advanced Persistent Threat via Spear Phishing in BYOD Environment Procedia. *Computer Science*, 2015, no. 72, pp. 129–136.

2. Lukatskiy Al. Tselenapravlenkiye ataky: iz zhyzny nevidimok [Advanced persistent threats: a day in the life of stealth]. *Bezopasnost delovoy informatsii [Business information safety]*, 2014, no. 6, pp. 4–9. (In Russian)

3. Prozorov A. Kak boryutsya s ART [How to deal with APT]. *Bezopasnost delovoy informatsii [Business information safety]*, 2014, no. 6, pp. 14–15. (In Russian)

4. Grekov V. Avtomatyzyrovannaya sistema obrabotki i analiza razvedyvatelnykh dannykh ASAS [Automated system of ASAS intelligence data processing and analysis]. *Zarubeznoye voyennoye obozreniye [Foreign military survey]*, 1990, no. 12, pp. 27–35. (In Russian)

5. Skudneva Y. V., Karabanov Y. S., Kirilenko V. O. & Boltenkova Y. O. Model protsessa peredachy odnopaketnogo soobsheniya po IP-sety [The model of packet message forwarding process through IP-based network]. *Bulletin of scientific research results*, 2015, vol. 1 (14), pp. 84–95. (In Russian)

6. Burakov M. V. *Genetycheskiy algorytm: teoriya i praktika [Genetic algorithm: theory and practice]*. Saint Petersburg, State University of Aerospace Instrumentation Publ., 2008, 164 p. (In Russian)

7. Pryvalov A. A. & Skudnyeva Y. V. *Metodyka formirovaniya tipovykh portretov IP-sety dlya raspoznavaniya organov upravleniya tekhnologicheskym protsessom na osnove genetycheskykh algorytmov [The forming method of IP-based network typical portraits for identification of technological process controlling elements on the basis of genetic algorithms]*.

*Sbornyk trudov 71-oy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii, posvyashennoy Dnyu radio [Collected papers of the 71st scientific and technical conference, dedicated to the Radio Day]*. Saint Petersburg, April, 20–28th 2016. Saint Petersburg, Saint Petersburg Electrotechnical University “LETI” Publ., 2016, pp. 210–211. (In Russian)

8. Pryvalov A. A. & Skudnyeva Y. V. Podkhod k formirovaniyu tipovykh portretov na osnove biologicheskikh algoritmov [IP-based network typical portraits forming approach on the basis of biological algorithms]. *Sbornyk trudov 71-oy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii, posvyashennoy Dnyu radio [Collected papers of the 71st scientific and technical conference, dedicated to the Radio Day]*. Saint Petersburg, April, 20–28th 2016. Saint Petersburg Electrotechnical University “LETI” Publ., 2016, pp. 211–212. (In Russian)

9. Shtovba S. D. Muravjiniye algoritmy [Ant colony optimization]. *Exponenta Pro. Matematika v prylozheniyakh [Mathematics in applications]*, 2003, no. 4, pp. 70–75. (In Russian)

10. Kudelya V. N., Pryvalov A. A., Petriyeva O. V. & Chemirenko V. P. *Metody matematycheskogo modelirovaniya sistem i protsessov svyazy [Methods of mathematical modelling of systems and communication processes]*. Saint Petersburg, Polytechnical University Publ., 2009, 368 p. (In Russian)

11. Pryvalov A. A., Pryvalov A. A., Skudnyeva Y. V. & Chalov I. V. Podkhod k otsenke veroyatnosti vskrytiya prostranstvenno-vremennoy i informatsionnoy struktury SPD-OTN [An approach to estimated probability of DTN-OTA spatiotemporal and information structure breaking]. *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2015, issue 3 (44), pp. 165–172. (In Russian)

ПРИВАЛОВ Андрей Андреевич – доктор военных наук, профессор, [apryvalov@inbox.ru](mailto:apryvalov@inbox.ru); \*СКУД-НЕВА Екатерина Валентиновна – аспирант, [skykatty@gmail.com](mailto:skykatty@gmail.com) (Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I).

УДК 621.396.931

**Д. Н. Роенков, П. А. Плеханов, Н. В. Яронова****СПОСОБ ОЦЕНКИ НАДЕЖНОСТИ СЕТИ ПОЕЗДНОЙ РАДИОСВЯЗИ**

Дата поступления: 13.05.2017

Решение о публикации: 12.07.2017

**Аннотация**

**Цель:** Оценить надежность сети поездной радиосвязи на базе разработанных моделей. **Методы:** Для достижения поставленной цели применены методы обработки статистических данных, теоретических исследований, теории вероятностей, теории надежности. **Результаты:** Были определены типовые каналы связи между абонентами сетей поездной радиосвязи. В сетях поездной радиосвязи используют следующие типы каналов: «поездной диспетчер – машинист поезда»; «поездной диспетчер – дежурный по станции»; «дежурный по станции – машинист поезда»; «машинист поезда – машинист поезда». Были установлены элементы, входящие в канал каждого типа: «распорядительная станция – проводной канал – стационарная радиостанция – радиоканал – возимая радиостанция»; «распорядительная станция – проводной канал – стационарная радиостанция»; «стационарная радиостанция – радиоканал – возимая радиостанция»; «возимая радиостанция – радиоканал – возимая радиостанция». Представлены разные модели для оценки надежности сети поездной радиосвязи: № 1 – для расчета усредненного значения коэффициента готовности каналов сети поездной радиосвязи; № 2 – для вычисления интегрального значения коэффициента готовности сети поездной радиосвязи для диспетчерского круга. По этим моделям выполнена оценка коэффициента готовности сети ПРС. **Практическая значимость:** Предложенные модели могут быть применены для расчета оценки коэффициента готовности сети поездной радиосвязи в целом на железнодорожном транспорте.

**Ключевые слова:** Поездная радиосвязь, надежность, готовность

**Dmitriy N. Royenkov**, Cand. Eng. Sci., assistant professor, roenkov\_dmitry@mail.ru; **Pavel A. Plekhanov**, Cand. Eng. Sci., assistant professor, pavelplekhanov@gmail.com; **Natalya V. Yaronova**, postgraduate student, tatochka83@list.ru (Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University) METHODS FOR ASSESSING THE RELIABILITY OF RADIO TRAIN COMMUNICATION NETWORK

**Summary**

**Objective:** To estimate radio train communication network reliability on the basis of developed models. **Methods:** The method of statistical data processing, theoretical research, probability theory, as well as reliability theory were applied in order to achieve the objective in question. **Results:** Conventional communication channels between subscribers of radio train communication network were determined. The following types of channels are used in radio train communication networks: “traffic controller – motorman”; “traffic controller– station duty officer”; “station duty officer – motorman”; “motorman – motorman”. The elements present in a channel of each type were determined: “terminal station – wire channel – stationary radio station – radio channel – mobile radio station”; “terminal station – wire channel – stationary radio station”; “stationary radio station – radio channel – mobile radio station”; “mobile radio station – radio channel – mobile radio station”. The following reliability evaluation models were presented in the study: Model 1 – to calculate the average values of the coefficient of readiness of the radio train communication network channel; Model 2 – to calculate the integral value of the coefficient of radio train communication network availability for the dispatcher area. Estimated coefficient of radio train communication network availability was calculated by means of the models in question. **Practical importance:** The presented models may be used for identification of an estimated coefficient of radio train communication network on railroad transport.

**Keywords:** Radio train communication, reliability, availability.

## Введение

В соответствии с Правилами технической эксплуатации [1] на всех участках железных дорог должна быть организована поездная радиосвязь (ПРС), обеспечивающая надежную двустороннюю связь с подвижными объектами в пределах всего диспетчерского круга. Она является элементом системы оперативно-управления движения поездов.

Сеть ПРС можно представить в виде набора элементов: распорядительная станция (СР), стационарные радиостанции (РС), возимые радиостанции (РВ), проводной канал (ПК) и радиоканал (РК).

Поскольку сеть ПРС – восстанавливаемая техническая система, то для расчета ее надежности необходимо использовать комплексный показатель – коэффициент готовности [2, 3]. Готовность работы сети ПРС есть важное условие обеспечения безопасности и надежности перевозочного процесса на железнодорожном транспорте, в том числе на высокоскоростных магистралях [4–6].

Вопросом повышения значения коэффициента готовности сетей связи, в частности радиосвязи, занимались авторы работ [7–12], но расчету коэффициента готовности сети ПРС должное внимание до сих пор не уделялось.

## Типовые каналы сети поездной радиосвязи

Анализ работ [13–15] позволил выявить типовые варианты организации каналов между отдельными абонентами сетей ПРС:

1) СР–ПК–РС–РК–РВ – между поездным диспетчером (ДНЦ) и машинистом локомотива (ТЧМ) – далее для удобства обозначим его каналом типа 1;

2) СР–ПК–РС – между ДНЦ и дежурным по станции (ДСП) – канал типа 2;

3) РС–РК–РВ – между ДСП и ТЧМ – канал типа 3;

4) РВ–РК–РВ – между двумя ТЧМ, находящимися на одном перегоне – канал типа 4.

Для оценки готовности сети ПРС необходимо рассматривать коэффициенты готовности ее отдельных элементов [16]: 1) аппаратуры (СР –  $K_{Г.СР}$ , РС –  $K_{Г.РС}$ , РВ –  $K_{Г.РВ}$ ); 2) проводного канала связи –  $K_{Г.ПК}$ . При этом следует учитывать все отказы: аппаратуры преобразования, линейной аппаратуры, кабеля, устройств электропитания; 3) по радиопокрытию –  $K_{Г.РК}$ .

Согласно [17], при наличии последовательных элементов коэффициент готовности определяется следующим образом:

$$K_{Г} = \prod_{i=1}^n K_{Г,i}, \quad (1)$$

а при параллельном соединении –

$$K_{Г} = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - K_{Г,i}). \quad (2)$$

В соответствии с (1), (2) были получены формулы для расчета коэффициентов готовности каналов каждого типа (табл. 1).

Из описанных в табл. 1 типов каналов наиболее значимым является канал типа 1, так как важным условием обеспечения безопасности движения поездов и своевременности их прибытия служит надежная связь между ДНЦ и ТЧМ. Канал этого типа состоит из наибольшего количества элементов сети ПРС.

Значения коэффициентов готовности элементов сети ПРС подразделяют на:

- требуемую готовность, которая определяется по нормам (стандартам);
- фактическую готовность, которая находится по статическим данным и измерениям.

## Модель сети ПРС для расчета усредненного значения коэффициента готовности каналов данной сети (модель № 1)

Модель № 1 представляет собой совокупность каналов типа 1, каждый из которых рассматривают по отдельности. Затем находится

ТАБЛИЦА 1. Типовые формулы для расчета значений коэффициента готовности каналов поездной радиосвязи разных типов

Канал связи	Тип канала	Типовые формулы
СР–ПК–РС–РК–РВ	1	$K_{Г.СР} \cdot K_{Г.ПК} \cdot K_{Г.РС} \cdot K_{Г.РК} \cdot K_{Г.РВ}$
СР–ПК–РС	2	$K_{Г.СР} \cdot K_{Г.ПК} \cdot K_{Г.РС}$
РС–РК–РВ	3	$K_{Г.РС} \cdot K_{Г.РК} \cdot K_{Г.РВ}$
РВ–РК–РВ	4	$K_{Г.РВ} \cdot K_{Г.РК} \cdot K_{Г.РВ}$

Примечание. Каждый канал имеет как прямое, так и обратное направление (т. е. каналу РС–РК–РВ соответствует обратный канал РВ–РК–РС) [1, 18].

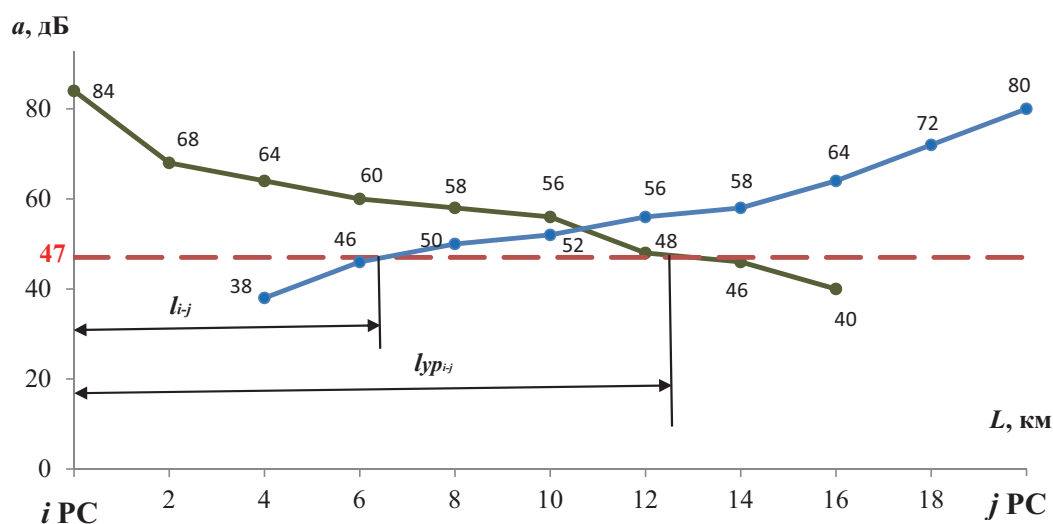


Рис. 1. Зависимости уровня сигнала от стационарной радиостанции на входе возимой радиостанции и определение коэффициента готовности по радиопокрытию

среднее значение коэффициента готовности по всем этим каналам:

$$K_{Г.М1} = \frac{\sum_{i=1}^k K_{Г.i}}{k},$$

где  $K_{Г.i}$  – коэффициент готовности  $k$ -го канала типа 1;  $k$  – количество каналов типа 1.

Согласно [18–20], требуемая готовность по радиопокрытию составляет 0,95, а фактический коэффициент готовности по радиопокрытию  $K_{Г.ПК}$  для данной модели зависит от

дальности уверенной радиосвязи между РВ и соседней РС на перегоне и определяется следующим образом:

– если зоны покрытия двух соседних РС перекрывают друг друга (рис. 1), то коэффициент готовности по радиопокрытию равен 1;

– если зоны покрытия двух соседних РС не перекрывают друг друга, то коэффициент готовности по радиопокрытию рассчитывается по формуле

$$K_{Г.ПК.i-j} = \frac{l_{yp.i-j}}{l_{i-j}},$$

где  $l_{\text{ур},i-j}$  – дальность уверенной радиосвязи  $i$ -й РС в направлении прилегающего к ней перегона, км;  $l_{i-j}$  – расстояние от  $i$ -й РС до границы зоны уверенной радиосвязи  $j$ -й РС в направлении  $i$ -й РС, км.

### Модель сети ПРС для расчета интегрального значения коэффициента готовности данной сети (модель № 2)

В данной модели сеть рассматривается как единая система, элементы которой расположе-

ны параллельно и/или последовательно друг другу, что позволяет получить общую формулу для расчета интегрального значения коэффициента готовности сети ПРС (рис. 2).

В этой модели коэффициент готовности по радиопокрытию  $i$ -й РС находится по формуле

$$K_{\Gamma.\text{ПК-РС},i} = \frac{\sum_{j=1}^n r_{ij}}{L}, \quad (3)$$

где  $L$  – длина рассматриваемого участка (протяженность одного диспетчерского круга), км;

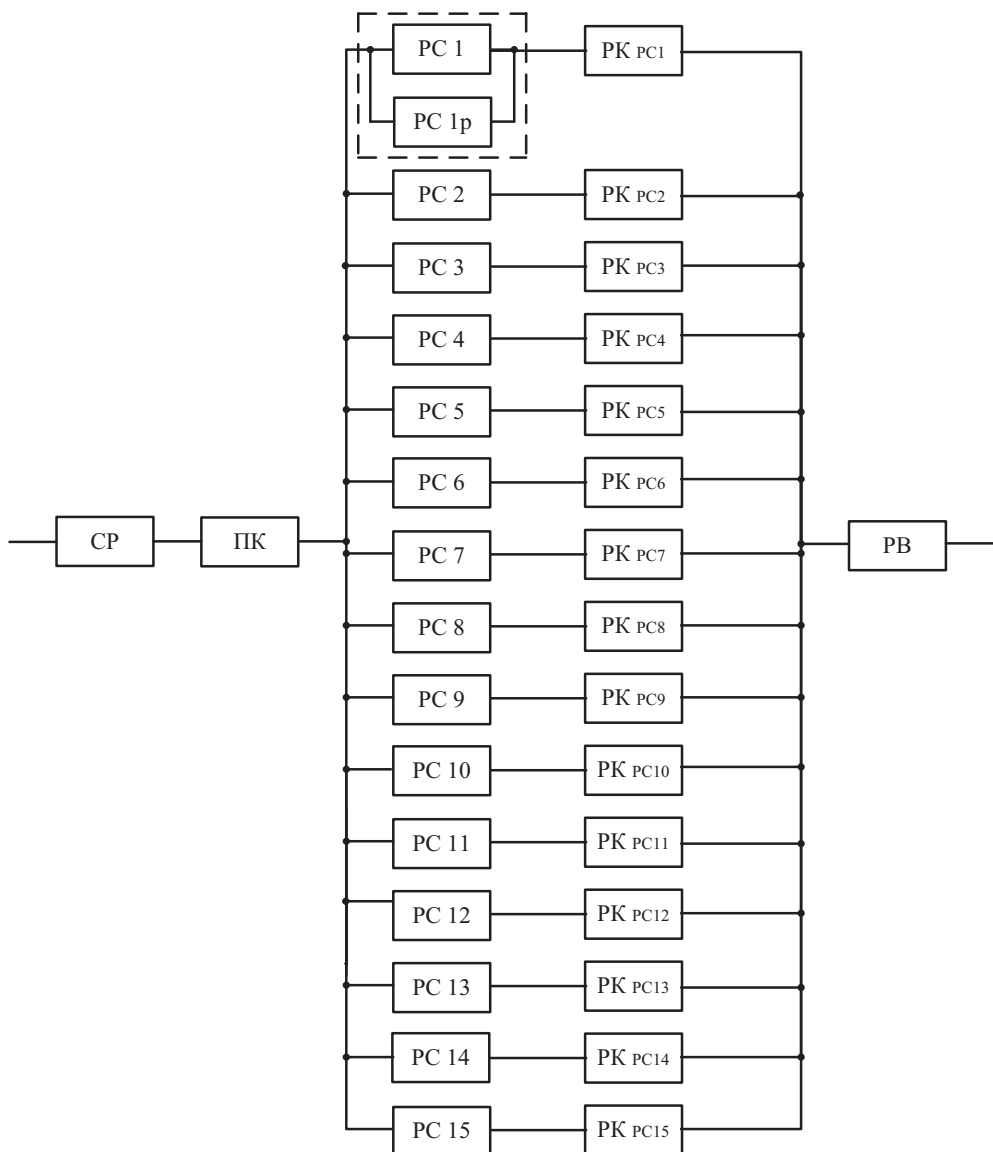


Рис. 2. Модель сети ПРС для расчета интегрального значения коэффициента готовности радиосети одного диспетчерского круга



$\sum_{j=1}^n r_{ij}$  – суммарная протяженность участков с уверенной радиосвязью от  $i$ -й РС для каждого прилегающего к ней перегона  $j$  ( $j = 1, \dots, n$ ), км.

### Расчет коэффициента готовности сети ПРС по разработанным моделям

В качестве примера для расчета коэффициента готовности сети ПРС рассмотрим один диспетчерский круг сети ПРС (рис. 3). На этом участке движение поездов осуществляется со скоростями до 160 км/ч, а ПРС организована в гектометровом диапазоне длин волн (2 МГц).

На основе статистических данных и результатов измерений были определены фактические значения коэффициентов готовности элементов сети ПРС на данном участке. Расчет показал, что  $K_{Г.СР} = 0,99972$ ,  $K_{Г.ПК} = 0,99017$ ,  $K_{Г.РС} = 0,99851$ ,  $K_{Г.РВ} = 0,99851$ .

Коэффициенты готовности отдельных элементов сетей ПРС регламентируются норма-

тивными документами, согласно которым, в частности,  $K_{Г.ПК} \geq 0,996$  [21] и  $K_{Г.РВ} \geq 0,95$ . Требуемое значение коэффициента готовности аппаратуры (СР, РС, РВ) находится по следующим данным: среднее время наработки на отказ – 45 000 ч; среднее время на восстановление работоспособности – 0,5 ч.

### Расчет коэффициента готовности сети ПРС по модели № 1

На рис. 4 представлена модель сети ПРС одного диспетчерского круга для расчета значений коэффициента готовности.

На станции № 1 имеется двукратное резервирование РС, а на остальных станциях работа РС осуществляется без резервирования.

Расчет, проведенный с использованием модели № 1, показал, что фактическое значение коэффициента готовности сети ПРС на рассматриваемом участке на 0,14 меньше, чем требуемое: фактическое – 0,801; требуемое – 0,946.

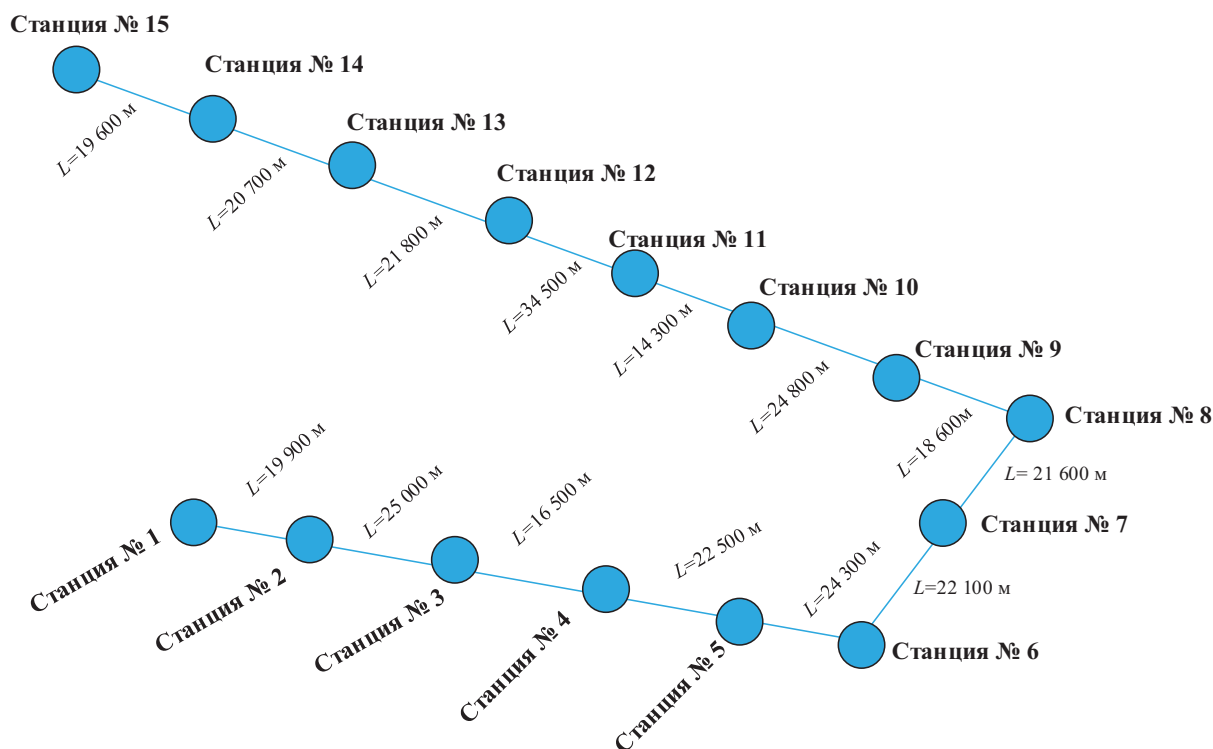


Рис. 3. Схема железнодорожного участка, относящегося к одному диспетчерскому кругу

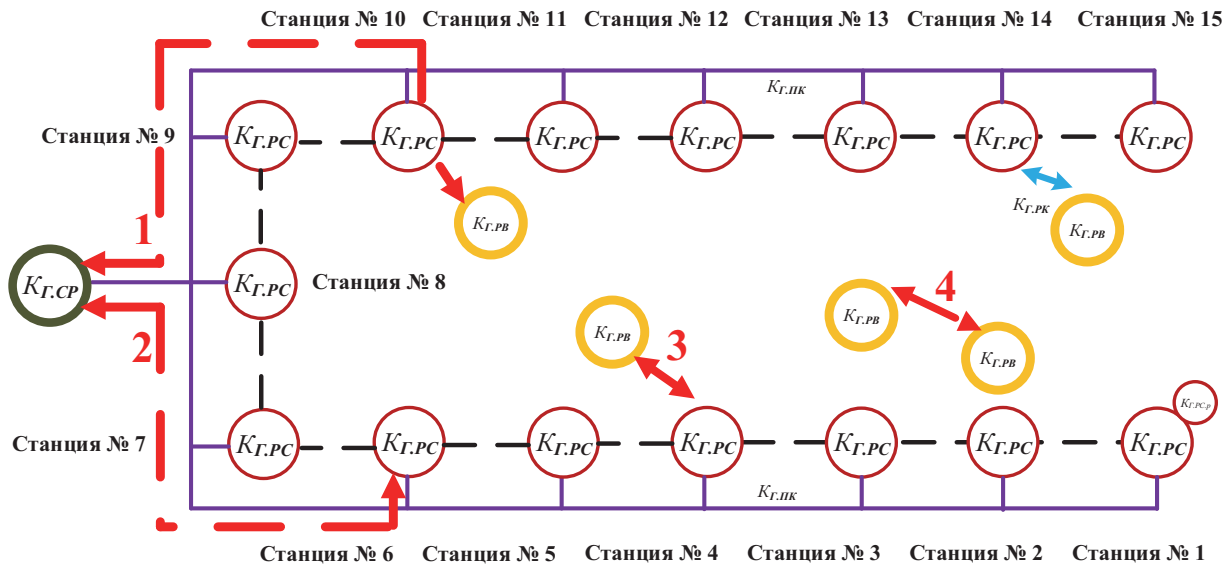


Рис. 4. Модель сети ПРС одного диспетчерского круга для расчета значений коэффициента готовности каналов связи:

$K_{Г.РС}$  – РС с соответствующим коэффициентом готовности  $K_{Г.РС}$ ;  $K_{Г.РВ}$  – РВ с соответствующим коэффициентом готовности  $K_{Г.РВ}$ ;  $K_{Г.СР}$  – СР с соответствующим коэффициентом готовности  $K_{Г.СР}$ ;  $K_{Г.РС.р}$  – резервная РС с соответствующим коэффициентом готовности  $K_{Г.РС.р}$ ;  $K_{Г.ПК}$  – ПК с соответствующим коэффициентом готовности  $K_{Г.ПК}$ ;  $K_{Г.РК}$  – РК с соответствующим коэффициентом готовности по радиопокрытию  $K_{Г.РК}$ ; — — — — — железнодородная линия;  $\longleftrightarrow$  — типовые каналы связи

### Расчет коэффициента готовности сети ПРС по модели № 2

Модель № 2 использована для расчета коэффициента готовности сети ПРС одного диспетчерского круга (см. рис. 2).

Согласно формуле (3), можно найти коэффициент готовности сети ПРС одного диспетчерского круга по модели № 2:

$$K_{Г.М2} = K_{Г.СР} \cdot K_{Г.ПК} \times \left[ 1 - \prod_{i=1}^n \left( 1 - \left( 1 - \prod_{k=1}^m (1 - K_{Г.РСi.k}) \right) \cdot K_{Г.РК.РСi} \right) \right] \times K_{Г.РВ},$$

где  $n$  – порядковый номер РС;  $m$  – количество основных и резервных РС.

Для определения фактической готовности по радиопокрытию  $i$ -й РС ( $K_{Г.РКi}$ ) необходимо воспользоваться результатами радиоизмерений, проведенных с использованием вагона-лаборатории.

Результаты вычислений для определения фактической и требуемой готовности по радиопокрытию сети ПРС рассматриваемого диспетчерского круга приведены в табл. 2.

Произведем расчет по модели № 2, подставим требуемые и фактические значения коэффициентов готовности элементов сети ПРС: фактическое – 0,606; требуемое – 0,866.

ТАБЛИЦА 2. Расчет готовности по радиопокрытию  $i$ -й РС сети ПРС одного диспетчерского круга

Наименование РС	Суммарная протяженность участков с уверенной радиосвязью от $i$ -й РС для каждого прилегающего к ней перегона $j$ ( $j = 1, \dots, n$ ), $\sum_{j=1}^n r_{ij}$ , км		Готовность по радиопокрытию $i$ -й РС сети ПРС, $K_{Г.РК-РС.i} = \sum_{j=1}^n r_{ij} / L$ ( $L = 307$ км)	
	Значение			
	фактическое	требуемое	фактическое	требуемое
РС 1	12	19,95	0,03909	0,06498
РС 2	28	43,7	0,09121	0,14235
РС 3	15	38,95	0,04886	0,12687
РС 4	25	38	0,08143	0,12378
РС 5	22	43,7	0,07166	0,14235
РС 6	22	42,75	0,07166	0,13925
РС 7	24	41,8	0,07818	0,13616
РС 8	23	38	0,07492	0,12378
РС 9	17	41,8	0,05537	0,13616
РС 10	22	47,5	0,07166	0,15472
РС 11	13	46,55	0,04235	0,15163
РС 12	18,5	42,75	0,06026	0,13925
РС 13	21,5	40,375	0,07003	0,13151
РС 14	30	38,95	0,09772	0,12687
РС 15	5	18,525	0,01629	0,06034

## Заключение

Для определения коэффициента готовности сети ПРС были предложены следующие модели:

– модель № 1 – для расчета усредненного значения коэффициента готовности каналов сети ПРС с отображением всех элементов и типов каналов;

– модель № 2 – для расчета интегрального значения коэффициента готовности сети ПРС для диспетчерского круга.

Различие этих моделей заключается в разных подходах к вычислению коэффициента готовности по радиопокрытию.

1. Требуемое значение коэффициента готовности по радиопокрытию для модели № 1 принимается равным 0,95 в соответствии с [18–20], а фактическое – по результатам измерений.

Согласно модели № 1, фактическое значение коэффициента готовности сети ПРС на рассматриваемом участке меньше требуемого на 0,14 (фактическое – 0,801; требуемое – 0,946). Это связано с тем, что минимальное (наихудшее) значение коэффициента готовности канала между ДНЦ и ТЧМ (СР–ПК–РС–РК–РВ) – 0,444, а максимальное – 0,908, на что в значительной степени повлияли наихудшие величины готовности по радиопокрытию

между ДНЦ и ТЧМ (СР–ПК–РС–РК–РВ) сети ПРС на перегонах между РС 2 и 3, 9 и 10, 10 и 11, 11 и 12.

2. Особенностью модели № 2 является то, что коэффициент готовности по радиопокрытию оценивается как отношение суммарной протяженности участков с уверенной радиосвязью данной РС к протяженности всего диспетчерского круга.

При расчете с использованием модели № 2 значения коэффициента готовности сети ПРС на рассматриваемом участке составили: фактическое – 0,606; требуемое – 0,866.

Результаты выполненных расчетов показали, что фактические значения коэффициента готовности элементов сети ПРС и всей сети в целом как для модели № 1, так и для модели № 2 оказываются хуже, чем рекомендованы нормативными документами. Для исправления ситуации требуются разработка и реализация ряда мер по повышению коэффициента готовности сети ПРС.

## Библиографический список

1. Правила технической эксплуатации железных дорог Республики Узбекистан. – Ташкент, 2009. – 164 с.
2. IEC 62278. Railway applications – Specification and demonstration of reliability, availability, maintainability and safety (RAMS)\*. – М. : Стандартинформ, 2002. – 162 с.
3. ГОСТ 53111–2008. Устойчивость функционирования сети связи общего пользования. – М. : Стандартинформ, 2008. – 19 с.
4. Роенков Д. Н. Основные требования к организации радиосвязи на высокоскоростной магистрали / Д. Н. Роенков, В. В. Шматченко, П. А. Плеханов, В. Г. Иванов // Транспорт Российской Федерации. – 2015. – № 2 (57). – С. 49–52.
5. Зайцев А. А. Современная нормативная база обеспечения безопасности высокоскоростного железнодорожного транспорта / А. А. Зайцев, В. В. Шматченко, П. А. Плеханов, Д. Н. Роенков, В. Г. Иванов // Транспорт Российской Федерации. – 2015. – № 5 (60). – С. 60–63.
6. Плеханов П. А. Проблема формирования требований к качеству и безопасности перевозочных услуг железнодорожного транспорта / П. А. Плеханов // Экономика железных дорог. – 2015. – № 10. – С. 20–27.
7. Черникова О. А. Математическая модель оценки надежности информационно-телекоммуникационных систем, использующих линии радиосвязи с псевдослучайной перестройкой рабочих частот / О. А. Черникова // Вестн. Воронеж. ин-та МВД России. – 2014. – № 3. – С. 41–47.
8. Черникова О. А. Математическая модель системы радиосвязи с псевдослучайной перестройкой рабочих частот / О. А. Черникова // Вестн. Воронеж. ин-та МВД России. – 2011. – № 4. – С. 94–100.
9. Обухов А. Н. Методический подход к оценке надежности систем радиосвязи с псевдослучайной перестройкой рабочих частот / А. Н. Обухов, О. А. Черникова // Вестн. Воронеж. ин-та МВД России. – 2013. – № 4. – С. 155–159.
10. Котов В. К. Научно-методические основы управления надежностью и безопасностью эксплуатации сетей связи железнодорожного транспорта : монография / В. К. Котов, В. Р. Антонец, Г. П. Лабецкая, В. В. Шмыгинский. – М. : Учеб.-метод. центр по образованию на ж.-д. транспорте, 2012. – 193 с.
11. Держо Г. Г. Количественная оценка вклада систем связи в безопасность технологических процессов на железнодорожном транспорте: монография / Г. Г. Держо. – М. : Учеб.-метод. центр по образованию на ж.-д. транспорте, 2007. – 130 с.
12. Рекомендация МСЭ-R M.828-2. Определение готовности каналов радиосвязи в подвижной спутниковой службе. – Женева : Междунар. союз электросвязи, 2006. – 8 с. – URL : <http://www.itu.int/pub/R-REC/en> (дата обращения: 10.03.2017).
13. Ваванов Ю. В. Радиотехнические системы железнодорожного транспорта / Ю. В. Ваванов, А. В. Елизаренко, А. А. Танцюра, А. Л. Комягин. – М. : Транспорт, 1991. – 303 с.
14. Горелов Г. В. Радиосвязь с подвижными объектами железнодорожного транспорта / Г. В. Горелов, Ю. И. Таныгин. – М. : Маршрут, 2009. – 263 с.
15. Горелов Г. В. Системы связи с подвижными объектами : учеб. пособие / Г. В. Горелов, Д. Н. Ро-

\* Железнодорожные приложения – Обоснование и подтверждение выполнения требований по надежности, готовности, ремонтпригодности и безопасности.

енков – М. : Учеб.-метод. центр по образованию на ж.-д. транспорте, 2014. – 335 с.

16. Роенков Д. Н. Способ оценки надежности сети поездной радиосвязи на железных дорогах Республики Узбекистан / Д. Н. Роенков, Н. В. Яронова // Труды 70-й межвуз. науч.-технич. конференции СПБНТОРЭС им. А. С. Попова, посвященной Дню радио (21–29 апреля 2015 г.). Секция «Телекоммуникации на железнодорожном транспорте». – СПб. : СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2015. – С. 252–253.

17. Рогинский В. Н. Теория сетей связи : учебник для вузов связи / В. Н. Рогинский, А. Д. Харкевич, М. А. Шнепс, Г. Б. Давыдов, А. Я. Толчан. – М. : Радио и связь, 1981. – 192 с.

18. ГОСТ 54959–2012. Железнодорожная электросвязь. Поездная радиосвязь. Технические требования и методы контроля. – М. : Стандартинформ, 2013. – 26 с.

19. Роенков Д. Н. Методические указания по организации и расчету сетей ПРС / Д. Н. Роенков, Г. О. Коренной // Автоматика, связь, информатика. – 2014. – № 6. – С. 18–20.

20. Роенков Д. Н. Методические указания по организации и расчету сетей ПРС / Д. Н. Роенков, Г. О. Коренной // Автоматика, связь, информатика. – 2014. – № 7. – С. 11–15.

21. ITU-T Recommendation G.602. Reliability and availability of analogue cable transmission systems and associated equipment's. – Geneva : ITU, 1993. – 5 p. – URL : <http://www.itu.int/pub/R-REC/en> (дата обращения: 10.03.2017).

## References

1. *Pravila tekhnicheskoy ekspluatatsii zheleznnykh dorog Respublyky Uzbekistan [Operating and maintenance rules for the railroads of the Republic of Uzbekistan]*. Tashkent, 2009, 164 p. (In Russian)

2. IEC 62278. *Railway applications – Specification and demonstration of reliability, availability, maintainability and safety (RAMS)*. Moscow, Standartinform Publ., 2002, 162 p.

3. GOST 53111–2008. *Ustoychivost funktsionirovaniya sety svyazy obshego polzovaniya [State Standard 53111–2008. Public communications network performance stability]*. Moscow, Standartinform Publ., 2008, 19 p. (In Russian)

4. Royenkov D. N., Shmatchenko V. V., Plekhanov P. A. & Ivanov V. G. Osnovniye trebovaniya k

organizatsii radiosvyazy na vysokoskorostnoy magistraly [Basic requirements to communication service organization on high-speed network]. *Transport of the Russian Federation*, 2015, no. 2 (57), pp. 49–52. (In Russian)

5. Zaytsev A. A., Shmatchenko V. V., Plekhanov P. A., Royenkov D. N. & Ivanov V. G. Sovremennaya normativnaya baza obespecheniya bezopasnosti vysokoskorostnogo zheleznodorozhnogo transporta [Modern regulatory framework of providing high-speed train safety control]. *Transport of the Russian Federation*, 2015, no. 5 (60), pp. 60–63. (In Russian)

6. Plekhanov P. A. Problema formirovaniya trebovaniy k kachestvu i bezopasnosti perevozhnykh uslug zheleznodorozhnogo transporta [The problem of rail traffic quality and safety requirements formation]. *Ekonomika zheleznnykh dorog [Railroads economics]*, 2015, no. 10, pp. 20–27. (In Russian)

7. Chernikova O. A. Matematicheskaya model otsenki nadezhnosti informatsionno-telekommunikatsionnykh sistem, ispolsuyushykh linii radiosvyazy s psevdosluchainoy perestroikoy rabochykh chastot [Mathematical model of reliability evaluation of informational and telecommunication systems using frequency hopping radio lines]. *Vestnyk Voronezhskogo instituta MVD Rossii [Voronezh Institute of Interior Ministry of the Russian Federation Bulletin]*, 2014, no. 3, pp. 41–47. (In Russian)

8. Chernikova O. A. Matematicheskaya model systemy radiosvyazy s psevdosluchainoy perestroikoy rabochykh chastot [Mathematical model of frequency hopping radio communications system]. *Vestnyk Voronezhskogo instituta MVD Rossii [Voronezh Institute of Interior Ministry of the Russian Federation Bulletin]*, 2011, no. 4, pp. 94–100. (In Russian)

9. Obukhov A. N. & Chernikova O. A. Metodicheskiy podkhod k otsenke nadezhnosti system radiosvyazy s psevdosluchainoy perestroikoy rabochykh chastot [Methodological approach to reliability evaluation of frequency hopping radio communications systems]. *Vestnyk Voronezhskogo instituta MVD Rossii [Voronezh Institute of Interior Ministry of the Russian Federation Bulletin]*, 2013, no. 4, pp. 155–159. (In Russian)

10. Kotov V. K., Antonets V. R., Labetskaya G. P. & Shmytinskiy V. V. *Nauchno-metodycheskiye osnovy upravleniya nadezhnosti i bezopasnosti ekspluatatsii setey svyazy zheleznodorozhnogo transporta [Methodological and research fundamentals of reli-*

*ability and safety control of communications network operation on railroad transport*]. Moscow, Uchebno-metodicheskiy tsentr po obrazovaniyu na zheleznodorozhnom transporte [Learning and teaching educational center of railway transport] Publ., 2012, 193 p. (In Russian)

11. Derzho G. G. *Kolychestvennaya otsenka vklada system svyazy v bezopasnost tekhnologicheskikh protsessov na zheleznodorozhnom transporte [Quantitative assessment of communications systems' contribution into technology processes on railroad transport]*. Moscow, Uchebno-metodicheskiy tsentr po obrazovaniyu na zheleznodorozhnom transporte [Learning and teaching educational center of railway transport] Publ., 2007, 130 p. (In Russian)

12. *Rekomendatsiya MSE-R M.828-2. Opredeleniye gotovnosti kanalov radiosvyazy v podvyzhnoy sputnykovoy sluzhbe [ITU-R M.828-2. Recommendation Radio channels availability determination in a mobile satellite system]*. Geneva, International Telecommunication Union Publ., 2006, 8 p. – URL: <http://www.itu.int/pub/R-REC/en> (accessed: 10.03.2017). (In Russian)

13. Vavanov Y. V., Yelizarenko A. V., Tantsyura A. A. & Komyagn A. L. *Radiotekhnicheskiye systemy zheleznodorozhnogo transporta [Radio engineering systems of railroad transport]*. Moscow, Transport Publ., 1991, 303 p. (In Russian)

14. Gorelov G. V. & Tanygyn Y. I. *Radiosvyaz s podvyzhnymi objektamy zheleznodorozhnogo transporta [Railroad transport mobile communication]*. Moscow, Marshrut Publ., 2009, 263 p. (In Russian)

15. Gorelov G. V. & Royenkov D. N. *Systemy svyazy s podvyzhnymi objektamy [Mobile communication systems]*. Moscow, Uchebno-metodicheskiy tsentr po obrazovaniyu na zheleznodorozhnom transporte [Learning and teaching educational center of railway transport], 2014, 335 p. (In Russian)

16. Royenkov D. N. & Yaronova N. V. *Sposob otsenki nadezhnosti sety poyezdnoy radiosvyazy na zheleznikh dorogakh Respublyky Uzbekistan [Esti-*

*mation method of network reliability on railroads of the Republic of Uzbekistan]*. *Trudy 70oy mezhvuzovskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii SPbNTORES im. A. S. Popova, posvyashennoy Dnyu radio (21–29 aprelya 2015). Sektsiya "Telekommunikatsii na zheleznodorozhnom transporte"* [Proceedings of the 70th interuniversity scientific and technical conference Popov A. S. SPbNTORES, dedicated to the Radio Day (April, 21–29, 2015). "Telecommunications on railroad transport" workshop]. Saint Petersburg, Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI" Publ., 2015, pp. 252–253. (In Russian)

17. Rogynskiy V. N., Kharkevich A. D., Shneps M. A., Davydov G. B. & Tolchan A. Y. *Teoriya setey svyazy: uchebnik dlya vuzov svyazy [Communications network theory: textbook for communications colleges]*. Moscow, Radio and communications Publ., 1981, 192 p. (In Russian)

18. GOST 54959–2012. *Zheleznodorozhnaya elektrosvyaz. Poyezdnaya radiosvyaz. Tekhnicheskiye trebovaniya i metody kontrolya [State Standard 54959–2012. Railway telecommunication. Radio train communication. Technical requirements and methods of testing]*. Moscow, Standartinform Publ., 2013, 26 p. (In Russian)

19. Royenkov D. N. & Korennoy G. O. *Metodycheskiye ukazaniya po organizatsii i raschetu setey PRS [Guidelines on RTC (Radio Train Communication) network organization and calculation]*. *Automatics, communications, information science*, 2014, no. 6, pp. 18–20. (In Russian)

20. Royenkov D. N. & Korennoy G. O. *Metodycheskiye ukazaniya po organizatsii i raschetu setey PRS [Guidelines on RTC (Radio Train Communication) network organization and calculation]*. *Automatics, communications, information science*, 2014, no. 7, pp. 11–15. (In Russian)

21. *ITU-T Recommendation G.602. Reliability and availability of analogue cable transmission systems and associated equipment's*. Geneva, ITU, 1993, 5 p. – URL: <http://www.itu.int/pub/R-REC/en> (accessed: 10.03.2017).

РОЕНКОВ Дмитрий Николаевич – канд. техн. наук, доцент, roenkov\_dmitry@mail.ru; ПЛЕХАНОВ Павел Андреевич – канд. техн. наук, доцент, pavelplekhanov@gmail.com; \*ЯРОНОВА Наталья Валерьевна – аспирант, tatochka83@list.ru (Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I).

УДК 621.331:621.319.4

**Д. А. Соколов****ПОТЕРИ МОЩНОСТИ В ПРОВОДАХ КОНТАКТНОЙ СЕТИ  
ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА ПРИ УСТАНОВКЕ  
КОМПЕНСИРУЮЩЕГО УСТРОЙСТВА В СЕРЕДИНЕ МЕЖПОДСТАНЦИОННОЙ  
ЗОНЫ С УЧЕТОМ ДВИЖЕНИЯ ПО НЕЙ ПОЕЗДОВ**

Дата поступления: 15.06.2017

Решение о публикации: 03.07.2017

**Аннотация**

**Цель:** Изучить изменения потерь мощности в проводах контактной сети при поперечной емкостной компенсации с учетом перемещения поездов по межподстанционной зоне. **Методы:** В основу приведенных расчетов положен метод подвижных нагрузок. Были определены мгновенные и средние потери мощности в проводах контактной сети при прохождении по межподстанционной зоне одного поезда и двух следующих друг за другом поездов. Потери рассчитаны для двух случаев: при отсутствии компенсирующего устройства и при его установке в середине межподстанционной зоны. Средние значения потерь мощности в проводах контактной сети получены путем интегрирования перечисленных функций, проведено их сравнение. **Результаты:** При выборе мощности компенсирующего устройства по среднему значению реактивной мощности, потребляемой одним поездом, прохождение его по межподстанционной зоне с постоянным током вызывает в проводах контактной сети такие же средние потери мощности, что и при отсутствии компенсирующего устройства. Увеличение числа поездов, одновременно находящихся на межподстанционной зоне при прежней мощности компенсирующего устройства, влечет за собой снижение потерь мощности в проводах контактной сети относительно аналогичной ситуации без компенсирующего устройства, однако реактивная мощность при этом компенсируется лишь частично. Сделан вывод о недопустимости чрезмерного завышения мощности компенсирующих устройств из-за увеличения потерь мощности в контактной подвеске и необходимости проведения экономических изысканий с целью выбора оптимальной мощности компенсирующих устройств. **Практическая значимость:** Материалы, представленные в статье, касаются актуальной темы повышения энергоэффективности системы тягового электроснабжения переменного тока и уточняют существующие методы выбора мощности компенсирующих устройств.

**Ключевые слова:** Электроснабжение, тяговая сеть, компенсация реактивной мощности, контактная подвеска, потери мощности, энергосбережение, подвижная нагрузка.

**Denis A. Sokolov**, student, sokoloffffff@gmail.com (Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University) LOSS OF POWER IN WIRES OF RAILROADS ALTERNATING CURRENT CATENARY SYSTEM IN THE PROCESS OF COMPENSATING DEVICE INSTALLATION CENTRALLY TO LENGTH OF INTERSUBSTANTIONAL ZONE TAKING INTO ACCOUNT TRAFFIC

**Summary**

**Objective:** To study alterations of power loss in wires of catenary system under cross capacitive compensation taking into account train traffic along an intersubstantial zone. **Methods:** The method of rolling loads was an underlying method for the given calculations. Sudden and average power losses in wires of catenary system were identified in the process of one train and two trains, following one another, passing along an intersubstantial zone. The losses were calculated for two cases: with compensating device installation centrally to length of intersubstantial zone and with its absence. The average values

of power loss in wires of catenary system were identified by means of integrating the enumerated functions as well as the comparison of the latter. **Results:** In case of selecting compensator capacity by average value of reactive power, consumed by one train, its passing along an intersubstational zone with direct current generates average power losses in wires of catenary system similar to the second case mentioned above. In case the number of trains being all at the same time at an intersubstational zone with the above stated power of compensator capacity increases, it will lead to the decrease in power losses in the wires of catenary system, compared to the case without a compensator device. However, the reactive power is compensated only partially. It was concluded that the excessive increase in power of compensating devices is prohibitive, due to the increase in power losses in a catenary and the necessity to conduct economical surveys aimed at selecting optimal power for compensatory devices. **Practical importance:** The materials, presented in the article, are related to a topical issue of increasing power saving in alternating current traction energy systems and may improve the current compensator capacity selection methods.

**Keywords:** Power supply, electric traction network, reactive power compensation, catenary, power losses, power saving, rolling load.

## Введение

Одним из наиболее распространенных способов снижения потребления реактивной мощности на железных дорогах, электрифицированных на переменном токе, является установка в системах тягового электроснабжения компенсирующих устройств, емкость которых выбирается в зависимости от реактивной мощности, расходуемой электроподвижным составом.

Существуют несколько способов включения конденсаторных установок в электротяговую сеть. В данной статье рассматривается поперечная емкостная компенсация реактивной мощности на железных дорогах переменного тока с установкой компенсирующего устройства в середине межподстанционной зоны.

Большинство исследований, проводимых советскими и российскими специалистами в

области емкостной компенсации реактивной мощности, направлены в основном на выбор оптимальной мощности компенсирующих устройств, их конструкции, режимов работы и оценку технико-экономического эффекта [1–12]. Однако в них не учтены особенности железнодорожного электропотребителя: перемещение и изменение расстояний от тяговых подстанций и компенсирующего устройства до поезда.

В основе представленных расчетов лежит метод подвижных нагрузок, сформулированный в 1926 г. проф. А. Б. Лебедевым [13–15].

## Выбор исходных данных

В качестве примера рассмотрим межподстанционную зону протяженностью  $L = 50$  км (рис. 1). Уровень напряжения в контактной сети остается неизменным. Удельное актив-

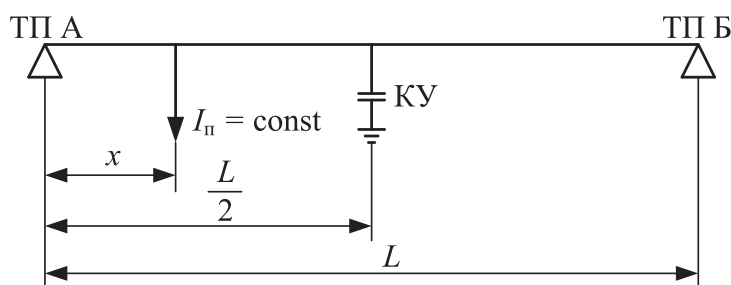


Рис. 1. Схема исследуемой системы электроснабжения



ное сопротивление контактной подвески  $r_0 = 0,1$  Ом/км. Примем, что поезда на данном участке потребляют ток постоянного значения  $I_{\text{п}} = 100$  А с коэффициентом мощности  $\cos\varphi = 0,8$ , тогда  $\sin\varphi = 0,6$ . Исходя из условия, что емкость компенсирующего устройства выбрана по среднему индуктивному току поезда  $I_{\text{пи}}$ , получим ток компенсирующего устройства (в А)

$$I_{\text{КУ}} = I_{\text{пи}} = I_{\text{п}} \cdot \sin\varphi = 100 \cdot 0,6 = 60.$$

При этом значение активного тока поезда (в А)

$$I_{\text{па}} = I_{\text{п}} \cdot \cos\varphi = 100 \cdot 0,8 = 80.$$

### Расчет потерь мощности в проводах контактной сети при прохождении по межподстанционной зоне одного поезда

На рис. 2 представлена расчетная схема, иллюстрирующая токораспределение при прохождении одного поезда по рассматриваемой межподстанционной зоне.

Доли активного и индуктивного токов поезда, протекающих от тяговой подстанции А, определяются в зависимости от координаты поезда  $x$ :

$$I_{\text{паА}} = I_{\text{п}} \cdot \cos\varphi \cdot \left(1 - \frac{x}{L}\right),$$

$$I_{\text{пиА}} = I_{\text{п}} \cdot \sin\varphi \cdot \left(1 - \frac{x}{L}\right),$$

доли активного и индуктивного токов поезда, протекающих от тяговой подстанции Б, – выражениями

$$I_{\text{паБ}} = I_{\text{п}} \cdot \cos\varphi \cdot \frac{x}{L},$$

$$I_{\text{пиБ}} = I_{\text{п}} \cdot \sin\varphi \cdot \frac{x}{L}.$$

Ток компенсирующего устройства разделяется между тяговыми подстанциями поровну:

$$I_{\text{КУ-А}} = I_{\text{КУ-Б}} = \frac{1}{2} \cdot I_{\text{п}} \cdot \sin\varphi.$$

Так как межподстанционная зона симметрична относительно ее середины, то достаточно произвести расчет потерь мощности в проводах контактной сети при прохождении поездом участка от тяговой подстанции А до компенсирующего устройства и отобразить результаты на участок от тяговой подстанции Б до компенсирующего устройства. На рис. 2 выделены три участка контактной сети с разными значениями токов.

Величина потерь мощности на участке от тяговой подстанции А до поезда находится по выражению

$$\Delta P_1 = r_0 \cdot x \cdot \sqrt{I_{\text{паА}}^2 + (I_{\text{пиА}} - I_{\text{КУ-А}})^2},$$

на участке от поезда до компенсирующего устройства – по формуле

$$\Delta P_2 = r_0 \cdot \left(\frac{L}{2} - x\right) \cdot \sqrt{I_{\text{паБ}}^2 + (I_{\text{пиБ}} + I_{\text{КУ-А}})^2},$$

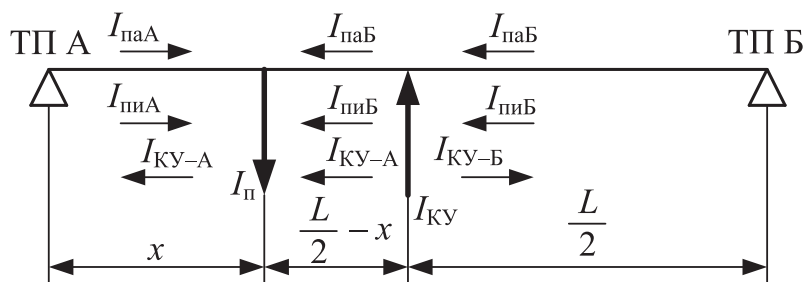


Рис. 2. Схема межподстанционной зоны с одним поездом с указанием токов в участках контактной сети

на участке от компенсирующего устройства до тяговой подстанции Б – по

$$\Delta P_3 = r_0 \cdot \frac{L}{2} \cdot \sqrt{I_{\text{пАБ}}^2 + (I_{\text{пБ}} - I_{\text{КУ-Б}})^2}.$$

Общие потери мощности в проводах контактной сети на всей межподстанционной зоне в каждый момент времени определяются суммированием потерь на этих трех участках.

При отсутствии компенсирующего устройства потери мощности в проводах контактной сети складываются из потерь, вызванных долями полного тока поезда на участках от тяговой подстанции А до поезда и от поезда до тяговой подстанции Б.

С целью ускорения расчета потери мощности в проводах контактной сети при наличии компенсирующего устройства и без него были получены с использованием электронной модели, созданной в среде MATLAB-Simulink. Результаты расчетов в контрольных точках по приведенным выше формулам совпали. По итогам произведенных расчетов были построены графики изменения потерь мощности в проводах контактной сети при прохождении одного поезда по межподстанционной зоне, оборудованной компенсирующим устрой-

ством ( $\Delta P_{\text{КУ}}$ , кривая 1), и при его отсутствии ( $\Delta P_0$ , кривая 2), представленные на рис. 3.

Однако по графикам довольно проблематично проводить сравнение потерь при наличии компенсирующего устройства и его отсутствии ввиду их различного характера. Для более точного определения и последующего сравнения средних значений потерь мощности в проводах контактной сети при прохождении поезда по межподстанционной зоне воспользуемся интегрированием функций потерь.

Среднее значение потерь мощности в проводах контактной сети на участке от тяговой подстанции А до поезда при прохождении одного поезда и наличии компенсирующего устройства определено по выражению

$$\Delta P_{\text{ср}} = \frac{2}{L} \cdot \int_0^{\frac{L}{2}} \times \left[ \left( I_{\text{п}} \cdot \cos \varphi \cdot \left( 1 - \frac{x}{L} \right) \right)^2 + \left( I_{\text{п}} \cdot \sin \varphi \cdot \left( 1 - \frac{x}{L} \right) - \frac{1}{2} \cdot I_{\text{п}} \times \sin \varphi \right)^2 \right] \times \times r_0 \cdot x \times dx = 3854 \text{ Вт},$$

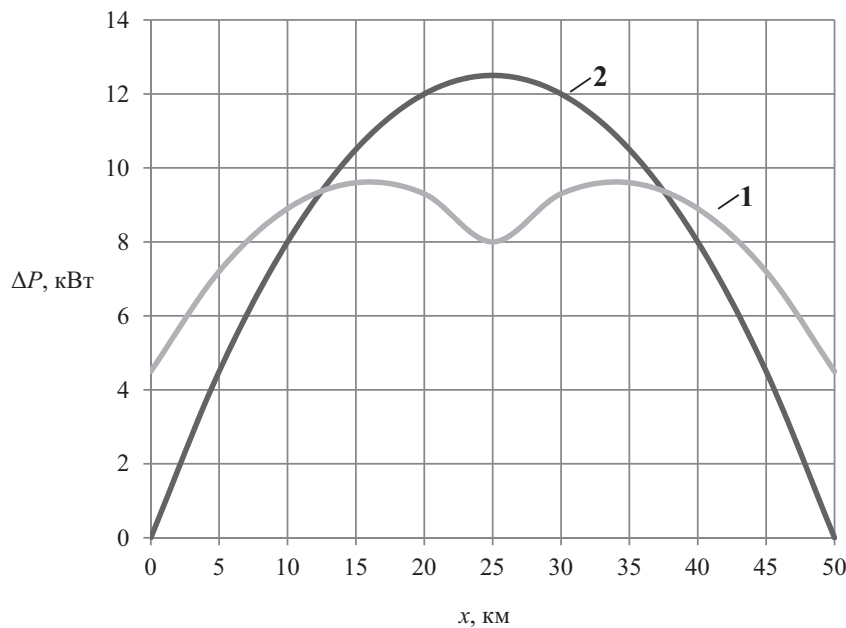


Рис. 3. Распределение потерь мощности в проводах контактной сети при прохождении по межподстанционной зоне одного поезда

на участке от поезда до компенсирующего устройства при прохождении одного поезда – по формуле

$$\Delta P_{2cp} = \frac{2}{L} \cdot \int_0^{\frac{L}{2}} \times \left[ \left( I_n \cdot \cos \varphi \cdot \frac{x}{L} \right)^2 + \left( I_n \cdot \sin \varphi \cdot \frac{x}{L} + \frac{1}{2} \cdot I_n \cdot \sin \varphi \right)^2 \right] \cdot r_0 \times \left( \frac{L}{2} - x \right) dx = 2396 \text{ Вт},$$

на участке от компенсирующего устройства до тяговой подстанции Б при прохождении одного поезда – по

$$\Delta P_{3cp} = \frac{2}{L} \cdot \int_0^{\frac{L}{2}} \times \left[ \left( I_n \cdot \cos \varphi \cdot \frac{x}{L} \right)^2 + \left( I_n \cdot \sin \varphi \cdot \frac{x}{L} - \frac{1}{2} \cdot I_n \cdot \sin \varphi \right)^2 \right] \times r_0 \times \frac{L}{2} dx = 2083 \text{ Вт},$$

при прохождении одного поезда и наличии компенсирующего устройства – по

$$\Delta P_{cp(1)-кУ} = \Delta P_{1cp} + \Delta P_{2cp} + \Delta P_{3cp} = 8333 \text{ Вт},$$

при прохождении одного поезда и отсутствии компенсирующего устройства – по

$$\Delta P_{cp(1)} = \frac{2}{L} \cdot \int_0^{\frac{L}{2}} \times$$

$$\times \left[ \left( I_n \cdot \left( 1 - \frac{x}{L} \right) \right)^2 \cdot r_0 \cdot x + \left( I_n \cdot \frac{x}{L} \right)^2 \cdot r_0 \cdot (L - x) \right] dx = 8333 \text{ Вт}.$$

Для оценки эффекта от применения компенсирующего устройства с точки зрения снижения потерь мощности в проводах контактной сети вводится величина  $\Delta \Delta P$  – разность потерь без компенсирующего устройства и при его наличии. На основе рис. 3 строится график разности потерь, представленный на рис. 4.

Среднее значение разности потерь определяется путем вычитания средних потерь мощности в проводах контактной сети с установленным компенсирующим устройством из аналогичного при его отсутствии. Если полученный результат больше нуля, то эффект от установки компенсирующего устройства с точки зрения снижения потерь мощности в проводах контактной сети является положительным, если меньше – отрицательным.

В изученном случае при прохождении одного поезда разность средних потерь мощности в проводах контактной сети равна нулю, т. е. эффект от установки компенсирующего устройства по исследуемому параметру отсутствует. Но следует иметь в виду, что, как только поезд покидает межподстанционную зону и она остается без тяговой нагрузки, в проводах контактной сети продолжают происходить потери мощности от токов компенсирующего устройства, которых не было бы при отсутствии этого устройства, т. е. рассматриваемый эффект от его установки в данной ситуации становится отрицательным.

### Расчет потерь мощности в проводах контактной сети при прохождении по межподстанционной зоне двух поездов

На рис. 5 представлена расчетная схема, иллюстрирующая токораспределение при

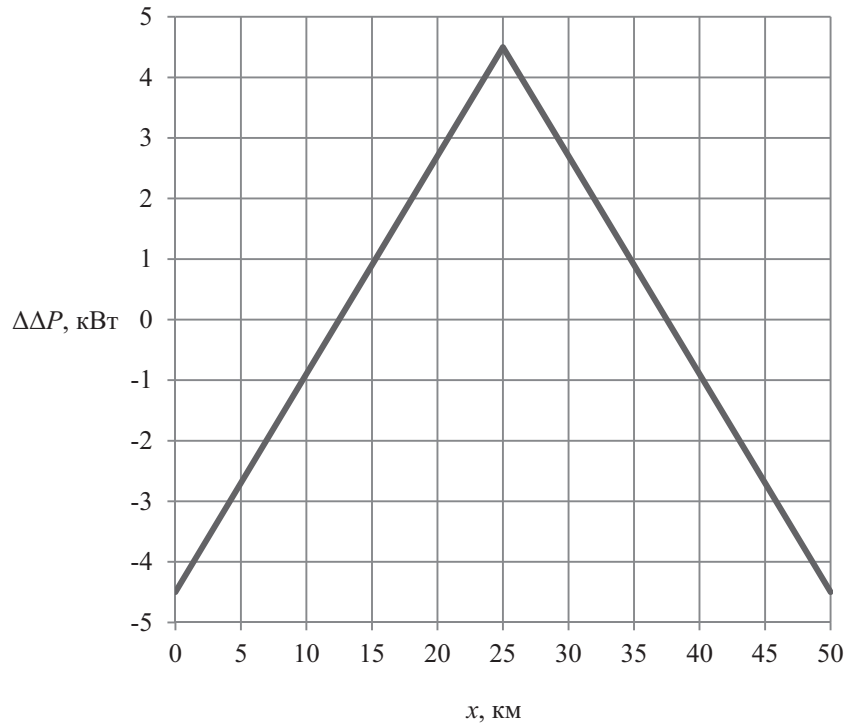


Рис. 4. Распределение разности потерь мощности в проводах контактной сети при отсутствии компенсирующего устройства и его наличии при прохождении по межподстанционной зоне одного поезда

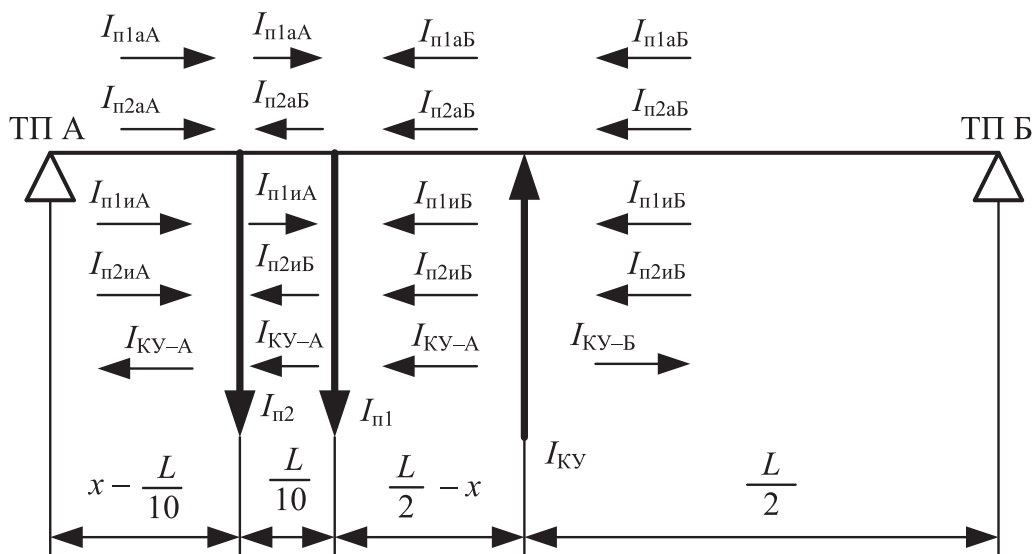


Рис. 5. Схема межподстанционной зоны с двумя поездами с указанием токов в участках контактной сети

прохождении двух поездов, следующих друг за другом на расстоянии 5 км по обследуемой межподстанционной зоне с одинаковой скоростью. Расчет токов и потерь мощности в проводах контактной сети производится по

формулам, аналогичным рассмотренным при прохождении одного поезда. Тем не менее следует обратить внимание на то, что данная схема справедлива с момента прохождения второго поезда тяговой подстанции А до до-

стижения первым поездом компенсирующего устройства. При прохождении первым поездом первых 5 км межподстанционной зоны для расчетов используется схема, приведенная на рис. 2. После того, как компенсирующее устройство оказывается между поездами, токораспределение также отличается от показанного на рис. 5. В расчетах оба участка учтены корректно. Вычисления произведены при условии, что  $I_{кв} = I_{п} \cdot \sin\phi$ .

Графики изменения потерь мощности в проводах контактной сети при прохождении двух следующих друг за другом поездов по межподстанционной зоне при отсутствии компенсирующего устройства ( $\Delta P_0$ ) и наличии такового ( $\Delta P_{кв}$ ) представлены на рис. 6 (кривые **2** и **1** соответственно), а изменения разности этих потерь ( $\Delta\Delta P$ ) – на рис. 7.

Средние значения потерь мощности в проводах контактной сети также определяются интегрированием функций этих потерь. Результаты интегрирования таковы: при наличии компенсирующего устройства  $\Delta P_{ср(2)-кв} = 21071$  Вт, а при его отсутствии  $\Delta P_{ср(2)} = 26606$  Вт.

Средняя разность потерь мощности в проводах контактной сети при отсутствии компенсирующего устройства и его наличии при прохождении двух следующих друг за другом поездов определена по формуле

$$\Delta\Delta P_{ср(2)} = \Delta P_{ср(2)} - \Delta P_{ср(2)-кв} = 5535 \text{ Вт.}$$

То есть при прохождении по исследуемой межподстанционной зоне двух следующих друг за другом поездов установка компенсирующего устройства, мощность которого выбрана по среднему току одного поезда, вызывает положительный эффект, выражаемый в снижении средних потерь мощности в проводах контактной сети на 5535 Вт по отношению к потерям, возникающим при отсутствии компенсирующего устройства в аналогичной ситуации.

### Заключение

Выбор мощности компенсирующих устройств, устанавливаемых на межподстанционной зоне, по среднему току одного поезда не

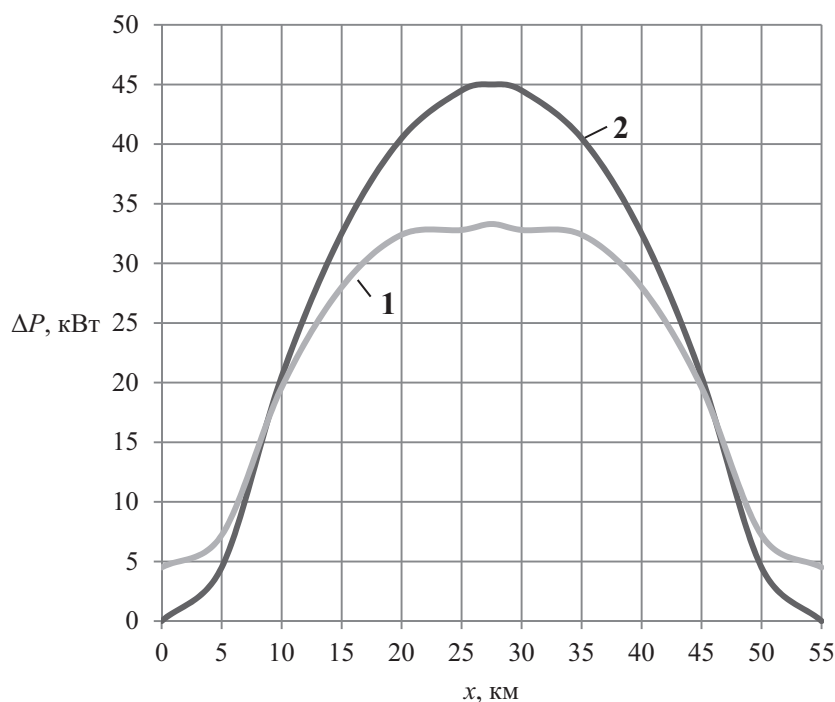


Рис. 6. Распределение потерь мощности в проводах контактной сети при прохождении по межподстанционной зоне двух поездов

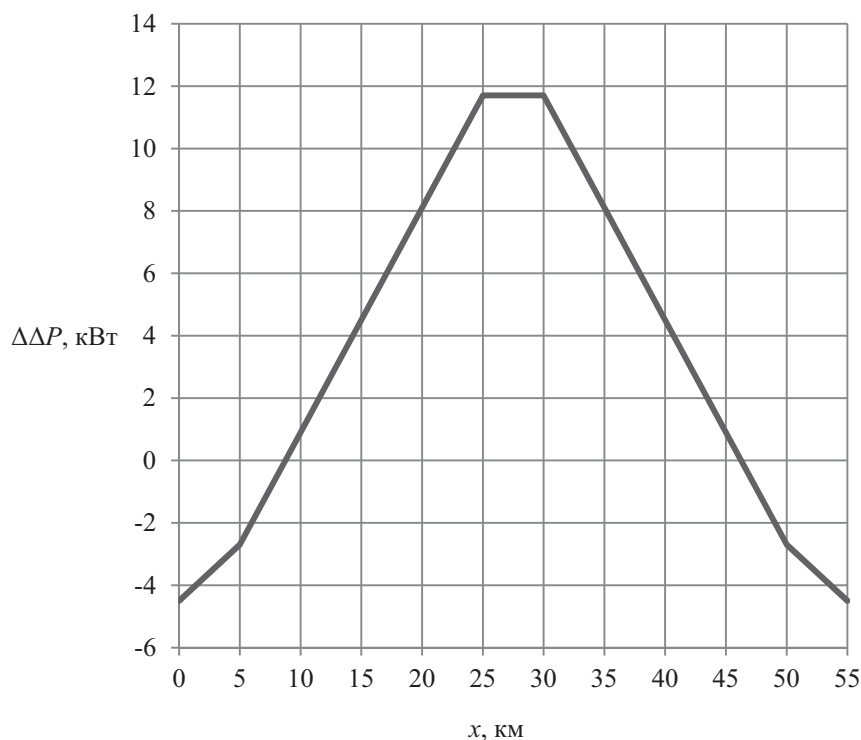


Рис. 7. Распределение разности потерь мощности в проводах контактной сети при отсутствии компенсирующего устройства и его наличии при прохождении по межподстанционной зоне двух поездов

может являться экономически обоснованным без анализа потерь мощности в проводах контактной сети ввиду того, что данные потери увеличиваются с установкой компенсирующих устройств, особенно, если поезда ходят достаточно редко и межподстанционная зона регулярно остается без тяговой нагрузки.

Вместе с тем при интенсивном движении поездов такой выбор мощности компенсирующего устройства приводит к уменьшению потерь в контактной подвеске, однако снижается эффект уменьшения потребления на железных дорогах переменного тока реактивной мощности.

Необоснованный рост мощности компенсирующих устройств в целях повышения напряжения также ведет к увеличению потерь мощности в проводах контактной сети.

При выборе мощности компенсирующих устройств с учетом потерь мощности в проводах контактной сети необходимо учитывать перемещение и величину токопотребления поезда на межподстанционной зоне.

### Библиографический список

1. Бородулин Б. М. Конденсаторные установки электрифицированных железных дорог / Б. М. Бородулин, Л. А. Герман, Г. А. Николаев. – М. : Транспорт, 1983. – 183 с.
2. Варенцов В. М. Методика расчета продольной емкостной компенсации при заданных размерах движения поездов / В. М. Варенцов, Б. П. Сорин // Бюл. результатов научных исследований. – 2016. – № 1 (18). – С. 37–45.
3. Герман Л. А. Эффективность фильтрокомпенсирующих устройств в тяговой сети переменного тока / Л. А. Герман, А. С. Серебряков, В. П. Гончаренко, А. В. Мизинцев // Вестн. ВНИИЖТ. – 2013. – № 5. – С. 56–62.
4. Герман Л. А. Энергосбережение в тяговом электроснабжении установками емкостной компенсации / Л. А. Герман, А. В. Котельников // Железнодорожный транспорт. – 2012. – № 11. – С. 64–68.
5. Герман Л. А. Фильтрокомпенсирующие установки в тяговых сетях переменного тока / Л. А. Гер-

ман, А. С. Серебряков, А. А. Максимова // Вестн. ВНИИЖТ. – 2016. – № 1. – С. 26–34.

6. Донской А. Л. Компенсация реактивной мощности – эффективный способ снижения энергоемкости перевозочного процесса / А. Л. Донской, В. В. Литовченко, А. А. Тимошук // Материалы Пятого междунар. симпозиума «ELTRANS'2009». – СПб. : ПГУПС, 2010. – С. 437–445.

7. Ермоленко Д. В. Исследование эффективности многофункциональных компенсирующих устройств в эксплуатационных условиях / Д. В. Ермоленко, Н. И. Молин, И. В. Павлов, В. А. Цыбанков, Б. В. Шевцов // Вестн. ВНИИЖТ. – 1991. – № 7. – С. 44–47.

8. Железко Ю. С. Компенсация реактивной мощности в сложных электрических системах / Ю. С. Железко. – М.: Энергоиздат, 1981. – 200 с.

9. Марикин А. Н. Адаптивное устройство поперечной компенсации реактивной мощности в тяговом электроснабжении переменного тока / А. Н. Марикин, В. А. Мирощенко // Изв. Петерб. ун-та путей сообщения. – СПб. : ПГУПС, 2014. – Вып. 1 (38). – С. 16–21.

10. Марикин А. Н. Устройство поперечной компенсации реактивной мощности с изменяющейся индуктивностью / А. Н. Марикин, В. А. Мирощенко, С. В. Кузьмин // Изв. Петерб. ун-та путей сообщения. – СПб. : ПГУПС, 2015. – Вып. 3 (44). – С. 77–84.

11. Мирощенко В. А. Анализ конструктивных вариантов взаимного расположения конденсаторной батареи и управляемого реактора в устройстве поперечной компенсации реактивной мощности / А. Н. Марикин, В. А. Мирощенко // Транспорт: проблемы, идеи, перспективы : сб. тр. LXXVI Всерос. науч.-технич. конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. – СПб. : ПГУПС, 2016. – С. 229–231.

12. Степанская О. А. Применение устройств поперечной емкостной компенсации на станциях стыкования / О. А. Степанская // Материалы Четвертого междунар. симпозиума «ELTRANS'2007». – СПб. : ПГУПС, 2009. – С. 405–408.

13. Кузин С. Е. Методы расчета системы электроснабжения электрических железных дорог : учеб. пособие / С. Е. Кузин. – Л. : ЛИИЖТ, 1970. – 96 с.

14. Лебедев А. Б. Основы электрической тяги / А. Б. Лебедев. – Л. ; М. : ОНТИ. Гл. ред. энергетич. лит., 1937. – 620 с.

15. Розенфельд В. Е. Электрические железные дороги / В. Е. Розенфельд, Н. Н. Сидоров, С. Е. Кузин. – М. : Трансжелдориздат, 1951. – 536 с.

## References

1. Borodulin B. M., German L. A., Nikolaev G. A. *Kondensatornyye ustanovki elektrifitsirovannykh zheleznykh dorog* [Capacitive installations of electrified railways]. Moscow, Transport Publ., 1983, 183 p. (In Russian)

2. Varentsov V. M., Sorin B. P. *Metodika rascheta prodol'noy emkostnoy kompensatsii pri zadannykh razmerakh dvizheniya poyezdov* [Calculation technique of series compensation under given values of train traffic]. *Byulleten rezultatov nauchnykh issledovaniy* [Bulletin of scientific research results], 2016, no. 1 (18), pp. 37–45. (In Russian)

3. German L. A., Serebryakov A. S., Goncharenko V. P., Mizintsev A. V. *Effektivnost filtrokompensiruyushchikh ustroystv v tyagovoy seti peremennogo toka* [Efficiency of filter compensating devices as used with AC traction power supply system]. *Vestnik VNIIZHT*, 2013, no. 5, pp. 56–62. (In Russian)

4. German L. A., Kotel'nikov A. V. *Energosberezheniye v tyagovom elektrosnabzhenii ustanovkami emkostnoy kompensatsii* [Energy saving in traction power supply by capacitive compensation installations]. *Zheleznodorozhnyy transport* [Railway Transport], 2012, no. 11, pp. 64–68. (In Russian)

5. German L. A., Serebryakov A. S., Maksimova A. A. *Filtrokompensiruyushchiye ustanovki v tyagovykh setyakh peremennogo toka* [Filter compensating installations in AC traction networks]. *VNIIZhT Bulletin*, 2016, no. 1, pp. 26–34. (In Russian)

6. Donskoy A. L., Litovchenko V. V., Timoshchuk A. A. *Kompensatsiya reaktivnoy moshchnosti – effektivnyy sposob snizheniya energoemkosti perevochnogo protsessa* [Reactive power compensation is an effective way to reduce the energy intensity of the transportation process]. *Materialy Pyatogo mezhdunarodnogo simpoziuma «ELTRANS'2009»*

[*Materials of the 5th International Symposium «ELTRANS'2009»*]. Saint Petersburg, PGUPS Publ., 2010, pp. 437–445. (In Russian)

7. Yermolenko D. V., Molin N. I., Pavlov I. V., Tsybankov V. A., Shevtsov B. V. Issledovaniye effektivnosti mnogofunktsionalnykh kompensiruyushchikh ustroystv v ekspluatatsionnykh usloviyakh [Investigation of the efficiency of multifunctional compensating devices under operating conditions]. *VNIIZhT Bulletin*, 1991, no. 7, pp. 44–47. (In Russian)

8. Zhelezko Y. S. *Kompensatsiya reaktivnoy moshchnosti v slozhnykh elektricheskikh sistemakh* [Reactive power compensation in complex electrical systems]. Moscow, Energoizdat Publ., 1981, 200 p. (In Russian)

9. Marikin A. N., Miroshchenko V. A. Adaptivnoye ustroystvo poperechnoy kompensatsii reaktivnoy moshchnosti v tyagovom elektrosnabzhenii peremennogo toka [Adaptive device for traverse reactive power compensation in alternative current traction power supply]. *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2014, issue 1 (38), pp. 16–21. (In Russian)

10. Marikin A. N., Miroshchenko V. A., Kuzmin S. V. Ustroystvo poperechnoy kompensatsii reaktivnoy moshchnosti s izmenyayushcheyshyay induktivnostyu [Reactive power shunt compensation device with variable inductance]. *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2015, issue 3 (44), pp. 77–84. (In Russian)

11. Miroshchenko V. A., Marikin A. N. Analiz konstruktivnykh variantov vzaimnogo raspolozheniya kondensatornoy batarei i upravlyayemogo reaktora v

ustroystve poperechnoy kompensatsii reaktivnoy moshchnosti [Analysis of design options for the mutual arrangement of the capacitor bank and the controlled reactor in the transverse reactive power compensation device]. *Transport: problemy, idei, perspektivy: sbornik trudov LXXXVI Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii studentov, aspirantov i molodykh uchennykh* [Transport: problems, ideas, prospects. Collection of works of the 76th All-Russian scientific and technical conference of students, postgraduates and young scientists]. Saint Petersburg, PGUPS Publ., 2016, pp. 229–231. (In Russian)

12. Stepankaya O. A. Primeneniye ustroystv poperechnoy emkostnoy kompensatsii na stantsiyakh stykovaniya [The use of transverse capacitive compensation devices at the docking stations]. *Materialy Chetvertogo mezhdunarodnogo simpoziuma «ELTRANS'2009»* [Materials of the 4th International Symposium «ELTRANS'2009»]. Saint Petersburg, PGUPS Publ., 2009, pp. 405–408. (In Russian)

13. Kuzin S. E. *Metody rascheta sistemy elektrosnabzheniya elektricheskikh zheleznykh dorog* [Methods for calculating the power supply system of electric railways]. Leningrad, LIIZHT Publ., 1970, 96 p. (In Russian)

14. Lebedev A. B. *Osnovy elektricheskoy tyagi* [Basics of electric traction]. Leningrad, Moscow, ONTI. Glav. red. energetich. lit. Publ., 1937, 620 p. (In Russian)

15. Rozenfeld V. E., Sidorov N. N., Kuzin S. E. *Elektricheskiye zheleznyye dorogi* [Electric railways]. Moscow, Transzheldorizdat Publ., 1951, 536 p. (In Russian)

СОКОЛОВ Денис Алексеевич – студент, sokoloffffff@gmail.com (Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I).



УДК 625.1+004.9

**С. В. Шкурников, О. С. Морозова****О РАЗРАБОТКЕ ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ  
ВЫСОКОСКОРОСТНОГО ПОЕЗДА**

Дата поступления: 29.05.2017

Решение о публикации: 03.07.2017

**Аннотация**

**Цель:** Высокоскоростная железнодорожная магистраль «Москва–Казань–Екатеринбург» предполагает совмещение на одном рельсовом пути высокоскоростных пассажирских, движущихся со скоростью до 400 км/ч, скоростных региональных и специальных грузовых поездов со скоростями движения более 200 км/ч. Такое совмещение требует всестороннего анализа процессов, происходящих во всех элементах верхнего строения пути, в зависимости от типа подвижного состава, его скорости движения, а также различных параметров плана и продольного профиля пути. В настоящее время отсутствует реальный опыт эксплуатации такого совмещения, поэтому наилучшим способом решения поставленной задачи является компьютерное моделирование. **Методы:** Компьютерное имитационное моделирование. Оптимизация параметров рессорного подвешивания проводилась методами планирования экстремального эксперимента. **Результаты:** Разработана компьютерная имитационная модель высокоскоростного поезда в программном комплексе «Универсальный механизм». **Практическая значимость:** Данная модель поможет комплексно подойти к вопросам увеличенного износа элементов верхнего строения пути при скоростях движения до 400 км/ч, а также к вопросам, касающимся неравномерности износа рельсовых нитей при пропуске по одному рельсовому пути составов различных категорий.

**Ключевые слова:** Высокоскоростной железнодорожный транспорт, движение рельсового экипажа в круговой кривой, компьютерное моделирование, задача оптимизации, экстремальный эксперимент.

**Sergey V. Shkurnikov**, Cand. Eng. Sci., associated professor, head of a chair, 3123810@mail.ru; \***Olga S. Morozova**, postgraduate student, olya.morozova51@gmail.com (Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University) ON HIGH-SPEED TRAIN SIMULATION MODEL DEVELOPMENT

**Summary**

**Objective:** “Moscow–Kazan–Yekaterinburg” high-speed railway line is supposed to hold high-speed passenger trains, moving at a speed up to 400 km/h, regional high-speed trains and special freight trains, accelerating to a speed of more than 200 km/h on one track. Such a combining demands an in-depth analysis of processes occurring in all elements of a railway superstructure, depending on the type of a rolling stock, its speed, as well as different design parameters and vertical alignment of a road. At present, there is no service experience of such a combining, that is why computer modeling is the best way of solving the task in question. **Methods:** Computer simulation modeling was applied. Parameter optimization of spring suspension was carried out by means of extreme experiment design methods. **Results:** A computer simulated model of a high-speed train was developed in “Universal mechanism” software. **Practical importance:** The model in question allows for an integrated approach of severe wear issues of railway superstructure components with speeds up to 400 km/h, as well as the issues of nonuniform rails wear when handling trains of different categories on one track.

**Keywords:** High-speed railway transport, railway vehicle operation in a circular curve, computer modeling, optimization task, extreme experiment.

## Введение

Характерной особенностью российской высокоскоростной магистрали (ВСМ) «Москва–Казань–Екатеринбург» является организация совмещенного движения высокоскоростных пассажирских, скоростных региональных и специальных грузовых поездов на одном рельсовом пути [1]. Различия в массе, скорости движения поездов всех категорий, а также их количественное соотношение оказывают существенное влияние на выбор параметров круговых кривых на линии ВСМ [2]. Для анализа динамического взаимодействия поезда и железнодорожного пути в кривой используется метод математического моделирования железнодорожного экипажа и пути [3].

В настоящее время решение этой задачи упрощается применением современных программных комплексов, предназначенных для исследования динамических систем. Рассматриваемый объект представляется в виде совокупности абсолютно твердых тел, связанных между собой шарнирными, упругими или диссипативными элементами. Процесс вывода уравнений движения автоматизирован и сведен к заданию пользователем массовых, геометрических, кинематических параметров, а также силовых взаимодействий элементов системы [4]. Для получения приближенного решения системы уравнений движения используются схемы численного интегрирования. В России для изучения динамического взаимодействия сложных систем наибольшую популярность приобрел программный комплекс «Универсальный механизм» (ПК «УМ») [5].

## Описание модели рельсового экипажа

Часть исследования посвящена разработке динамической модели высокоскоростного поезда в ПК «УМ», которая смогла бы достаточно точно описать его движение в круговой кривой.

Геометрические характеристики состава обусловлены уже имеющейся в России эксплуатацией поезда «Сапсан» [6]. Длина поезда, состоящего из 12 условных вагонов, равна 300 м (рис. 1). Модель вагона представлена в виде совокупности твердых тел (4 колесные пары, 2 рамы тележки и кузов вагона), связанных между собой шарнирами и силовыми элементами (рис. 2).

Высокоскоростное движение предъявляет повышенные требования к динамическим качествам экипажа, в состав которых входят численные значения показателей горизонтальной динамики  $P_{\text{гор}}$  (не более 0,20), вертикальной динамики первой  $P_{\text{д1}}$  (не более 0,20) и второй  $P_{\text{д2}}$  (не более 0,15) ступени рессорного подвешивания, а также показатели плавности хода в вертикальном  $W_z$  и поперечном горизонтальном  $W_y$  (не более 2,8) направлении [7]. В связи с этим возникла необходимость поиска оптимальной комбинации параметров рессорного подвешивания.

## Оптимизация параметров рессорного подвешивания

Задача оптимизации решалась с помощью полного факторного эксперимента типа  $N = 2^k$ , где  $N$  – число опытов,  $k$  – число факторов,

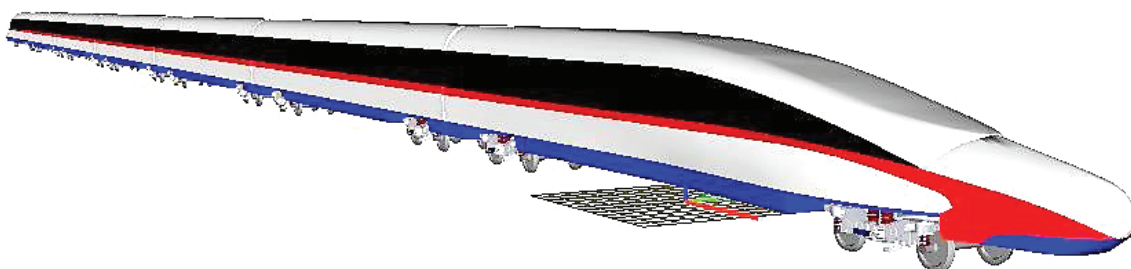
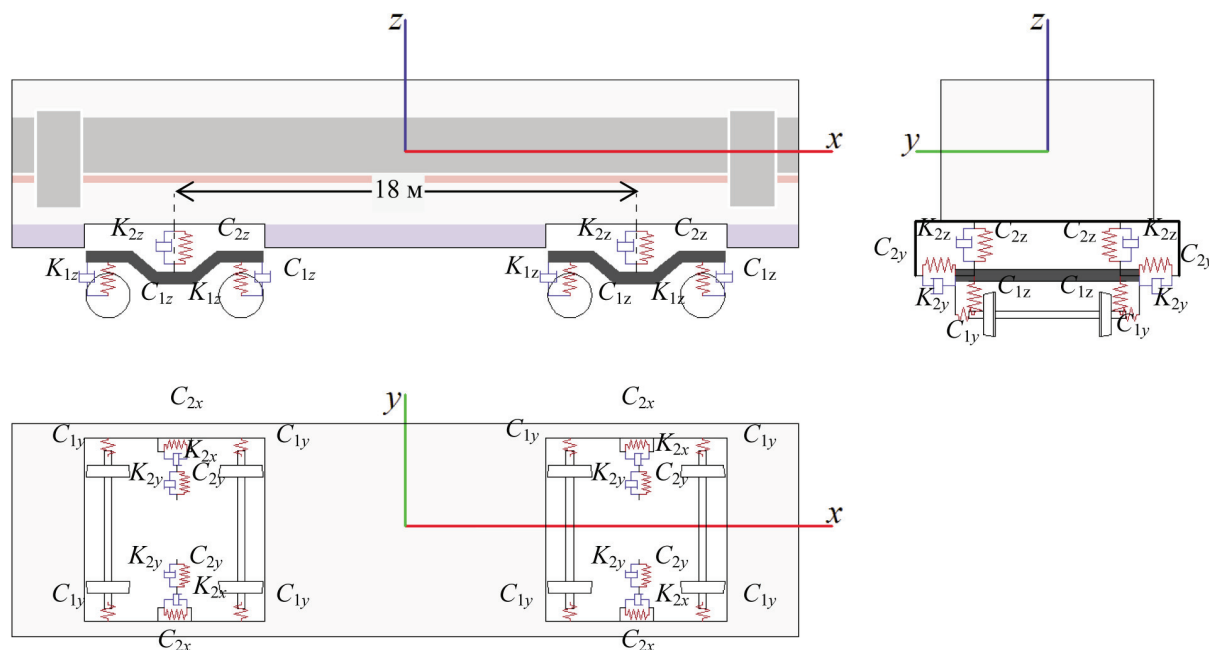


Рис. 1. Общий вид высокоскоростного пассажирского поезда в ПК «УМ»



Инерционно-массовые характеристики					
Масса кузова вагона, $M_k$	56 000 кг	Масса базы тележки, $M_T$	3500 кг	Масса колесной пары, $M_{кп}$	1500 кг
$I_{xк}$	105 748 кг·м <sup>2</sup>	$I_{xт}$	3363 кг·м <sup>2</sup>	$I_{xкп}$	1200 кг·м <sup>2</sup>
$I_{yк}$	2 925 990 кг·м <sup>2</sup>	$I_{yт}$	1447 кг·м <sup>2</sup>	—	—
$I_{zк}$	2 911 330 кг·м <sup>2</sup>	$I_{zт}$	4706 кг·м <sup>2</sup>	$I_{zкп}$	1500 кг·м <sup>2</sup>

Рис. 2. Структурная схема вагона высокоскоростного поезда

2 – число уровней варьирования факторов (см. табл. 1–3) [8]. Параметром оптимизации был выбран показатель плавности хода в горизонтальном поперечном направлении  $W_y$ . Движение экипажа со скоростью 111 м/с (примерно 400 км/ч) осуществлялось по круговой кривой:  $l_k = 500$  м,  $R = 9355$  м,  $h = 150$  мм с переходными кривыми  $l_{пк} = 300$  м. Выбор параметров круговой кривой обусловлен необходимостью реализации скорости 400 км/ч для высокоскоростного поезда, с учетом обеспечения условия комфортабельности езды ( $a_{нп.вс} = 0,4$  м/с<sup>2</sup>) [9].

Линейное уравнение регрессии, полученное в серии опытов I оказалось неадекватным (табл. 3). Поэтому было принято решение о сужении интервалов варьирования и переносе центра плана эксперимента в условия опыта

15 или 12, где значения параметра оптимизации  $W_y$  минимальны.

Критерий Фишера для линейной модели, полученной в серии опытов II, равен  $2,05 < F_{табл} = 2,8$  (табл. 3), что говорит об ее адекватности. Все величины параметра оптимизации этой серии не превышают 2,8.

Среднее значение  $b_0$  в серии опытов II снизилось на 32% в сравнении с серией I.

На этапе «крутого восхождения» [8] после проведения серии опытов II удалось незначительно уменьшить величину параметра оптимизации до значения 2,07.

Окончательной проверкой являлся поиск комбинаций параметров рессорного подвешивания, при которых плавность хода в горизонтальном поперечном направлении  $W_y$  не превышает нормативное значение. Используя

ТАБЛИЦА 1. Уровни варьирования факторов

№ серии опытов	Уровни варьирования	Факторы			
		$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$
		$C_{1y}$ – жесткость 1-й ступени рессорного подвешивания в поперечном направлении	$C_{1x}$ – жесткость 1-й ступени рессорного подвешивания в продольном направлении	$C_{2y}$ – жесткость 2-й ступени рессорного подвешивания в поперечном направлении	$C_{2x}$ – жесткость 2-й ступени рессорного подвешивания в продольном направлении
I	Верхний	$55,0 \cdot 10^6$	$55 \cdot 10^6$	$1,05 \cdot 10^6$	$3,5 \cdot 10^6$
	Нижний	$5,0 \cdot 10^6$	$1,0 \cdot 10^6$	$0,35 \cdot 10^6$	$0,7 \cdot 10^6$
II	Верхний	$10,0 \cdot 10^6$	$15,0 \cdot 10^6$	$0,7 \cdot 10^6$	$4,2 \cdot 10^6$
	Нижний	$2,5 \cdot 10^6$	$5,0 \cdot 10^6$	$0,175 \cdot 10^6$	$2,8 \cdot 10^6$
	Основной	$6,25 \cdot 10^6$	$10,0 \cdot 10^6$	$0,4375 \cdot 10^6$	$3,5 \cdot 10^6$
	Интервал варьирования	$3,75 \cdot 10^6$	$5,0 \cdot 10^6$	$0,2625 \cdot 10^6$	$0,7 \cdot 10^6$

ТАБЛИЦА 2. Матрица планирования и результаты I и II серий опытов

№ опыта	$X_0$	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	$X_1X_2$	$X_1X_3$	$X_1X_4$	$X_2X_3$	$X_2X_4$	$X_3X_4$	У I серии	У II серии
												$y_1$	$y_2$
1	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	4,18	2,19
2	+	+	-	-	-	-	-	-	+	+	+	3,02	2,12
3	+	+	+	-	-	+	-	+	-	-	+	3,11	2,17
4	+	+	+	+	-	+	+	+	+	-	-	4,66	2,22
5	+	-	+	-	-	-	+	-	-	-	+	2,96	2,11
6	+	-	+	+	-	-	-	-	+	-	-	4,62	2,24
7	+	-	+	-	+	-	+	+	-	+	-	2,12	2,10
8	+	-	-	+	-	+	-	-	-	+	-	3,49	2,34
9	+	+	-	+	-	-	+	+	-	+	-	4,08	2,18
10	+	+	-	+	+	-	+	-	-	-	+	2,85	2,20
11	+	-	-	+	+	+	-	+	-	-	+	2,73	2,28
12	+	+	-	-	+	-	-	-	+	-	-	2,07	2,10
13	+	+	+	-	+	+	-	-	-	+	-	2,44	2,09
14	+	-	+	+	+	-	-	+	+	+	+	4,03	2,24
15	+	-	-	-	+	+	+	+	+	-	-	2,07	2,17
16	+	-	-	-	-	+	+	-	+	+	+	2,71	2,31

ТАБЛИЦА 3. Значения коэффициентов регрессии для I и II серий опытов

№ серии опытов	$b_0$	$b_1$	$b_2$	$b_3$	$b_4$	$b_{12}$	$b_{13}$	$b_{14}$	$b_{23}$	$b_{24}$	$b_{34}$	$S_b, F$
I	3,20	0,10	0,32	0,63	-0,38	-0,02	0,01	0,18	0,22	0,06	0,003	$S_b=0,018,$ $F=80,61$
II	2,19	-0,03	-0,02	0,04	-0,02	0,03	-0,01	0,003	0,007	0,005	0,01	$S_b=0,018,$ $F=2,05$

модуль «Сканирование» в ПК «УМ», удалось провести 7<sup>4</sup> опытов [10]. Цифра 4 – это те же факторы  $C_{1y}, C_{1x}, C_{2y}$  и  $C_{2x}$ , а 7 – число уровней варьирования ( $0,1X_i; 1,1X_i; 2,1X_i; 3,1X_i; 5,1X_i; 8,1X_i; 9,1X_i$ ). Начальное значение  $C_{1y}$  и  $C_{1x} = 10^7$ , а  $C_{2y}$  и  $C_{2x} = 0,35 \cdot 10^6$ . Результаты предыдущих расчетов позволили допустить фиксацию  $C_{2x}$  на максимальном уровне, так как при неизменных величинах  $C_{1y}, C_{1x}, C_{2y}$  параметр оптимизации принимает минимальное значение на верхнем уровне варьирования  $C_{2x}$ .

Результаты моделирования представлены на рис. 3. Величины фактора  $C_{2y}$  показаны цветом и ограничены значением  $5,1X_i$ , поскольку дальнейшее увеличение этого фактора приводит к выходу  $W_y$  из области оптимума. Пара-

метр оптимизации достигает минимума при значениях жесткости 1-й ступени рессорного подвешивания в продольном направлении  $1,1 \cdot 10^7$ . Фактор  $C_{1y}$  можно принять в довольно широком диапазоне от  $1,1 \cdot 10^7$  до  $9,1 \cdot 10^7$  при одновременном уменьшении  $C_{2y}$  до  $0,385 \cdot 10^6$  и максимальном значении  $C_{2x}$ .

### Некоторые результаты компьютерного моделирования

Для дальнейшего исследования модели  $C_{1x}, C_{1y}, C_{2x}, C_{2y}$  принимаются значения 11 000, 7700, 4200, 287 кН/м. Характеристики гидродемпферов, предназначенных для гашения

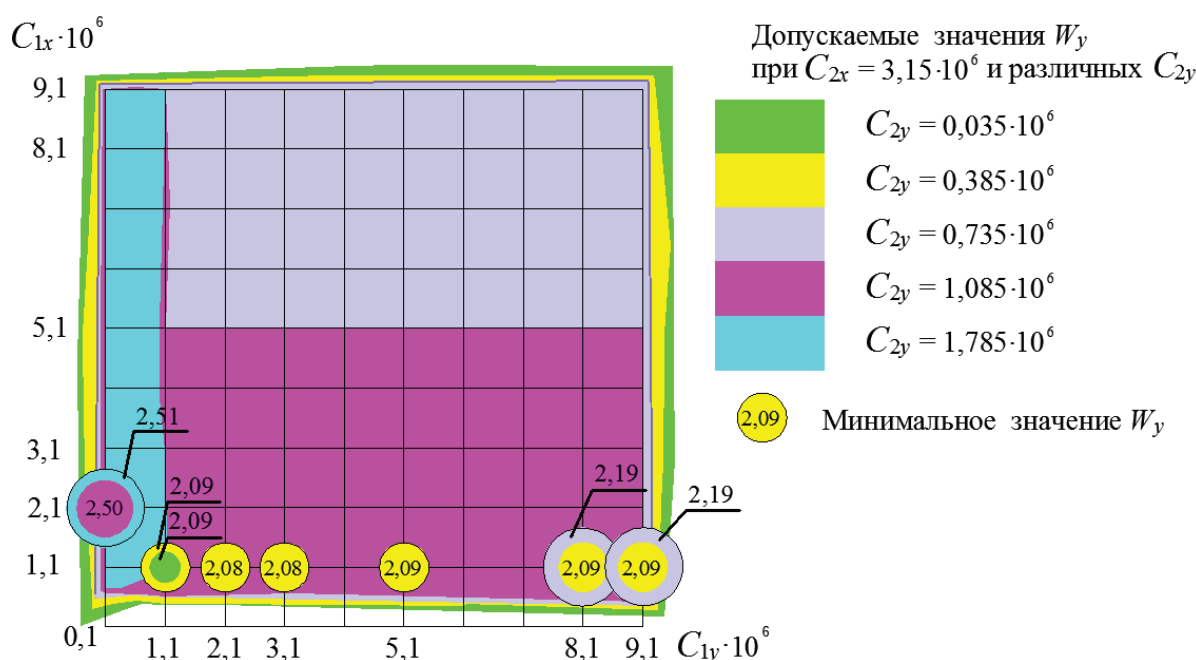


Рис. 3. Схема распределения оптимальных параметров рессорного подвешивания

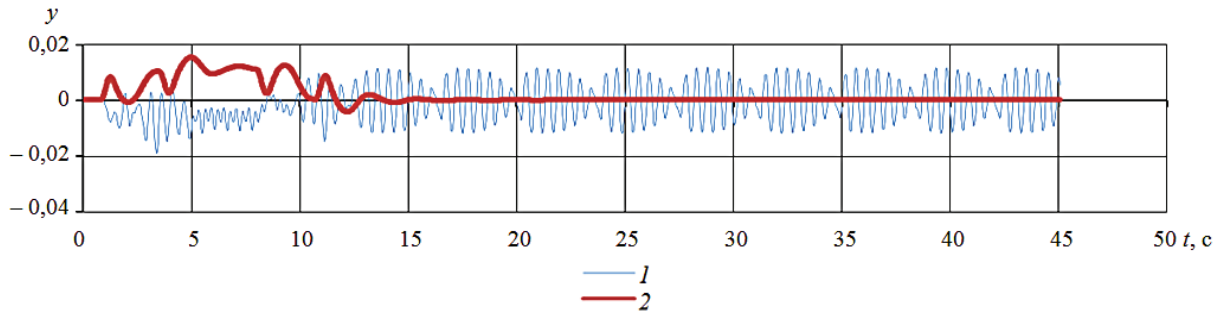


Рис. 4. Поперечные колебания кузова вагона при наихудшей комбинации параметров рессорного подвешивания из серии опытов I и принятой комбинации:

$$1 - C_{1y} = 55 \cdot 10^6, C_{1x} = 55 \cdot 10^6, C_{2y} = 1,05 \cdot 10^6, C_{2x} = 0,7 \cdot 10^6;$$

$$2 - C_{1y} = 7,7 \cdot 10^6, C_{1x} = 11 \cdot 10^6, C_{2y} = 0,287 \cdot 10^6, C_{2x} = 4,2 \cdot 10^6$$

колебаний кузова, взяты аналогично поезду «Сапсан» [11].

Характеристики рессорного подвешивания, принятые в варианте 4 серии опытов I, показывают (рис. 4) неустойчивое движение экипажа после прохождения круговой кривой. В то же время поперечные колебания кузова вагона быстро затухают при использовании принятых для дальнейших исследований комбинации факторов.

Для изучения совмещенного движения необходимо показать возможность модификации данной модели для грузового поезда путем изменения массово-инерционных характеристик смоделированного экипажа (рис. 5, 6).

### Заключение

Анализ зарубежной литературы [12–14] показал сходимость принятых величин продольной и поперечной жесткостей рессорного подвешивания. Для достижения наибольших скоростей движения продольная жесткость 1-й ступени рессорного подвешивания должна быть выше поперечной. Однако в кривых участках пути высокая продольная жесткость приводит к увеличению контактных сил между колесом и рельсом, следствием которых является значительный износ. Общая тенденция к уменьшению величин продольной и поперечной жесткости 1-й ступени рессорно-

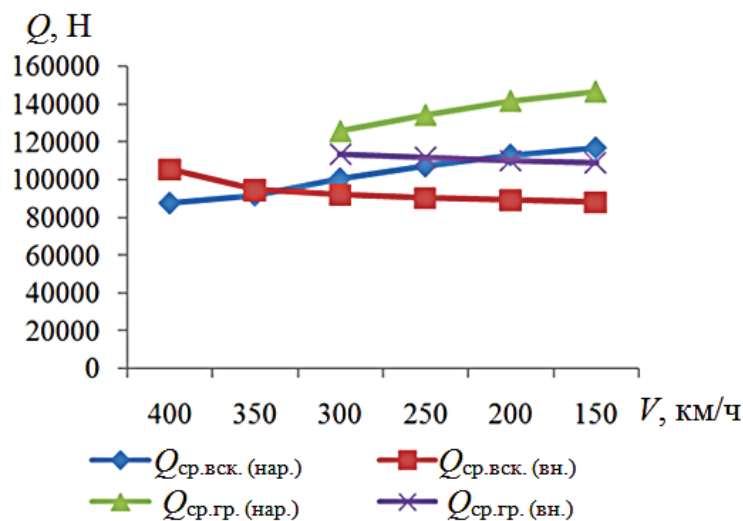


Рис. 5. Максимальное усредненное значение вертикальной силы  $Q$  для скоростного и грузового экипажей

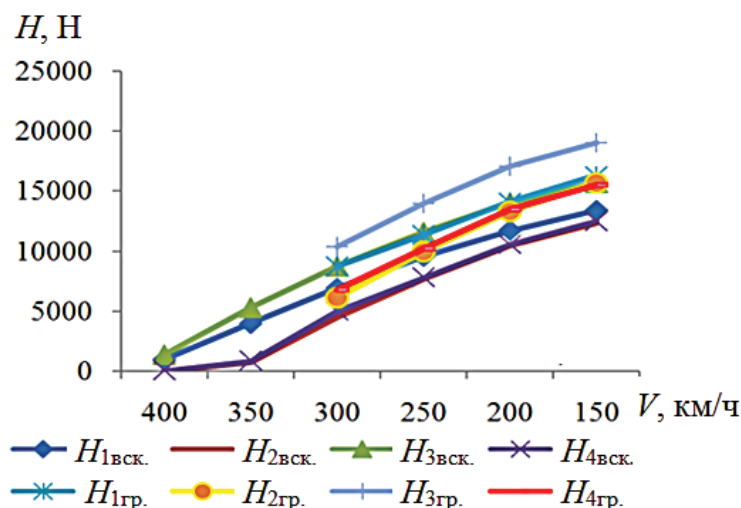


Рис. 6. Значение рамной силы  $H$  для каждой колесной пары для скоростного и грузового экипажей

го подвешивания отмечена в работах [14, 15]. С целью уменьшения динамического воздействия на кузов вагона, напрямую отвечающего за комфортабельность и безопасность езды пассажира, поперечная жесткость 2-й ступени рессорного подвешивания должна принимать наименьшее возможное значение [12].

Дальнейшее применение компьютерной модели позволит произвести анализ процессов, происходящих во всех элементах верхнего строения пути – рельсах, шпалах, креплениях, балластной и безбалластной конструкций при движении поезда, а также исследовать контактное взаимодействие колеса и рельса, непосредственно влияющее на износ системы, на различных участках плана и профиля пути.

## Библиографический список

1. Шкурников С. В. Общие требования к проектированию высокоскоростной железнодорожной магистрали Москва–Казань / С. В. Шкурников, Н. С. Бушуев, В. А. Голубцов // Транспорт Российской Федерации. – 2015. – № 2 (57). – С. 26–29.
2. Бушуев Н. С. Рекомендации по выбору параметров круговых кривых при совмещенном движении высокоскоростных пассажирских и скоростных специальных грузовых поездов / Н. С. Бушуев, С. В. Шкурников, В. А. Голубцов // Техника железных дорог. – 2016. – Вып. 2 (34). – С. 71–76.
3. Гарг В. К. Динамика подвижного состава / В. К. Гарг, Р. В. Дуккипати ; пер. с англ. ; под ред. Н. А. Панькина. – М. : Транспорт, 1988. – 391 с.
4. Погорелов Д. Ю. Компьютерное моделирование динамики технических систем с использованием программного комплекса «Универсальный механизм» / Д. Ю. Погорелов // Вестн. компьютерных и информационных технологий. – 2005. – № 4. – С. 27–34.
5. Погорелов Д. Ю. Программный комплекс «Универсальный механизм». Начинаем работать / Д. Ю. Погорелов. – Брянск, 2016. – URL : [http://www.universalmechanism.com/download/80/rus/gs\\_um.pdf](http://www.universalmechanism.com/download/80/rus/gs_um.pdf) (дата обращения: 17.05.2017).
6. Гапанович В. А. Технические особенности высокоскоростного поезда VelaroRus / В. А. Гапанович, А. С. Назаров, А. Н. Яговкин, Е. Г. Янченко, С. В. Шулындин, О. Н. Назаров // Техника железных дорог. – 2009. – № 1 (5). – С. 37–49.
7. Высокоскоростной железнодорожный подвижной состав для ВСМ. Технические требования. – Утв. первым вице-президентом ОАО «РЖД» А. С. Мишариным 06.08.2015 г. – М. : ОАО «РЖД», 2015.
8. Адлер А. П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / А. П. Адлер, Е. В. Маркова, Ю. В. Грановский. – М. : Наука, 1976. – 279 с.

9. Специальные технические условия для проектирования, строительства и эксплуатации высокоскоростной железнодорожной магистрали «Москва–Казань–Екатеринбург». – Сogl. Минстрoем РФ 03.08.2016 г. – № 24651-EC/03.

10. Погорелов Д. Ю. Программный комплекс «Универсальный механизм». Многовариантные расчеты. Руководство пользователя / Д. Ю. Погорелов. – Брянск, 2016. – URL : [http://www.universalmechanism.com/download/80/rus/06\\_um\\_experiments.pdf](http://www.universalmechanism.com/download/80/rus/06_um_experiments.pdf) (дата обращения: 17.05.2017).

11. Максимов И. Н. Разработка профиля колес для скоростных поездов и прогнозирование его эволюции в процессе взаимодействия подвижного состава и пути : дис. канд. техн. наук : 05.22.07 / И. Н. Максимов. – М. : ОАО ВНИИЖТ, 2014. – 226 с.

12. B. Umesh Rai. Handbook of research on emerging innovations in rail transportation engineering / Rai B. Umesh. – Hershey : IGI Global, 2016. – 664 p.

13. Iwnicki Simon. Handbook of Railway Vehicle Dynamics / Simon Iwnicki. – Boca Raton : CRC Press. Taylor & Francis Group, 2006. – 552 p.

14. Sun S. Improving the critical speeds of high-speed trains using magnetorheological technology / S. Sun, H. Deng, W. Li, H. Du, Y. Qing Ni, J. Zhang, J. Yang // Smart Materials and Structures. – 2013. – N 22 (11). – P. 1–14.

15. Xiaoyan Lei. High Speed Railway Track Dynamics: Models, Algorithms and Applications / Lei Xiaoyan. – Singapore : Science Press, Beijing and Springer Nature Singapore Pte Ltd, 2017. – 414 p.

## References

1. Shkurnykov S. V., Bushuyev N. S. & Golubtsov V.A. Obshnye trebovaniya k proyektirovaniyu vysokoskorostnoy zheleznodorozhnoy magystraly Moskva–Kazan [General requirements on Moscow–Kazan high-speed railway line construction]. *Transport of the Russian Federation*, 2015, no. 2 (57), pp. 26–29. (In Russian)

2. Bushuyev N. S., Shkurnikov S. V. & Golubtsov V.A. Rekomendatsii po vyboru parametrov krugovykh kryvykh pry sovmeshennom dvizhenii vysoko-

skorostnykh passazhyrskykh i skorostnykh spetsialnykh gruzovykh poyezdov [Recommendations on identification of parameters of circular curves with dual operation of high-speed passenger trains and special freight trains]. *Tekhnika zheleznykh dorog [Railroad engineering]*, 2016, vol. 2 (34), pp. 71–76. (In Russian)

3. Garg V.K. & Dukkypaty R.V. *Dynamiyka podvyzhnogo sostava [Dynamics of the rolling stock]*. Tr. from English; ed. by N.A. Pankyna. Moscow, Transport Publ., 1988, 391 p. (In Russian)

4. Pogorelov D.Y. Kompyuternoye modelirovaniye dynamyky tekhnicheskyykh system s ispolzovaniyem programmnoy kompleksa “Universalniy mekhanizm” [Computer simulation technique of engineering systems’ dynamics on the basis of “Universal mechanism” software application]. *Vestnyk kompjuternyykh i informatsionnykh tekhnologiy [Computer and information technologies bulletin]*, 2005, no. 4, pp. 27–34. (In Russian)

5. Pogorelov D.Y. *Programmniy kompleks “Universalniy mekhanizm”. Nachynayem rabotat [“Universal mechanism” software. The start of work]*. Bryansk, 2016. – URL: [http://www.universalmechanism.com/download/80/rus/g\\_s\\_um.pdf](http://www.universalmechanism.com/download/80/rus/g_s_um.pdf) (accessed: 17.05.2017) (In Russian)

6. Gapanovich V.A., Nazarov A.S., Yagovkyn A.N., Yanchenko Y.G., Shulyndyn S.V. & Nazarov O.N. Tekhnicheskiye osobennosti vysokoskorostnogo poyezda VelaroRus [Technical peculiarities of VelaroRus high-speed train]. *Railroad engineering*, 2009, no. 1 (5), pp. 37–49. (In Russian)

7. *Vysokoskorostnoy zheleznodorozhniy podvyzhnoy sostav dlya VSM. Tekhnicheskiye trebovaniya [High-speed rolling stock for HSN. Technical requirements]*. Approved by vice-president of JSC “Russian railways” A. S. Mysharyn, dated 06.08.2015. Moscow, JSC “Russian Railways” Publ., 2015. (In Russian)

8. Adler A.P., Markova Y.V. & Granovskiy Y.V. *Planyrovaniye eksperimenta pry poyske optimalnykh usloviy [Experimental design in the search for optimum conditions]*. Moscow, Nauka Publ., 1976, 279 p. (In Russian)

9. *Spetsialniye tekhnicheskiye usloviya dlya proyektirovaniya, stroitelstva i ekspluatatsii vysokoskorostnoy zheleznodorozhnoy magystraly “Moskva–Kazan–Yekaterinburg” [Special technical regulations*



on construction, building and maintenance of “Moscow–Kazan–Yekatiirenbuurg” high-speed railroad line]. *Soglasovano Mynstroyem RF 03.08.2016* [Approved by the Ministry of construction of the Russian Federation 03.08.2016]. – no. 24651-EC/03. (In Russian)

10. Pogorelov D. Y. *Programmniy kompleks “Universalniy mekhanizm”*. *Mnogovariantniye raschety. Rukovodstvo polzovatelya* [“Universal mechanism” software application. Multiversion calculations. User guide]. Bryansk, 2016. – URL: [http://www.universalmechanism.com/download/80/rus/06\\_um\\_experiments.pdf](http://www.universalmechanism.com/download/80/rus/06_um_experiments.pdf) (accessed: 17.05.2017) (In Russian)

11. Maksimov I. N. *Razrabotka profilya kolyes skorostnykh poyezdov i prognozyrovaniye yego evolutsii v protsesse vzaimodeystviya podvyzhnogo sostava i puty* [Wheel profile engineering for high-speed trains and forecasting of its evolution in the process

of train-track interaction]. Cand. diss.: 05. 22. 07. Moscow, OAO VNIICHT Publ., 2014, 226 p. (In Russian)

12. B. Umesh Rai. *Handbook of research on emerging innovations in rail transportation engineering*. Hershey, IGI Global Publ., 2016, 664 p.

13. Iwnicki Simon. *Handbook of Railway Vehicle Dynamics*. Boca Raton, CRC Press. Taylor & Francis Group Publ., 2006, 552 p.

14. Sun S., Deng H., Li W., Du H. & Qing Ni Y. Improving the critical speeds of high-speed trains using magnetorheological technology. *Smart Materials and Structures*, 2013, no. 22 (11), pp. 1–14.

15. Xiaoyan Lei. *High Speed Railway Track Dynamics: Models, Algorithms and Applications*. Singapore, Science Press, Beijing and Springer Nature Singapore Pte Ltd Publ., 2017, 414 p.

ШКУРНИКОВ Сергей Васильевич – канд. техн. наук, доцент, заведующий кафедрой, 3123810@mail.ru; \*МОРОЗОВА Ольга Сергеевна – аспирант, olya.morozova51@gmail.com (Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I).

УДК 621.396.931

**В. В. Шматченко, Д. Н. Роенков, П. А. Плеханов, В. Г. Иванов, Н. В. Яронова****ВЛИЯНИЕ ОТКАЗОВ И СБОЕВ СИСТЕМЫ РАДИОСВЯЗИ GSM-R  
НА ГОТОВНОСТЬ ПЕРЕВОЗОЧНОГО ПРОЦЕССА**

Дата поступления: 03.05.2017

Решение о публикации: 17.07.2017

**Аннотация**

**Цель:** Оценить действие отказов и сбоев систем цифровой радиосвязи стандарта GSM-R, использовавшихся различными эксплуатирующими организациями на железных дорогах Европы, на своевременность (готовность) прибытия поездов. **Методы:** Использовались методы анализа риска (изложенные в стандарте EN 50126), включающие идентификацию отказов и сбоев в системах GSM-R, оценку частоты их появления, оценку тяжести их последствий для своевременности прибытия поездов. **Результаты:** В ходе выполненного исследования были получены следующие основные результаты: 1) показана взаимосвязь между безопасностью и готовностью перевозочного процесса, обусловленная надежностью систем радиосвязи железнодорожного транспорта; 2) выявлены последствия отказов и сбоев, имевших место в технических системах и средствах цифровой радиосвязи стандарта GSM-R; 3) введена метрика полноты готовности (своевременности) в зависимости от надежности систем и средств GSM-R (уровни полноты готовности – Availability Integrity Levels – AIL); 4) сформирована классификация отказов и сбоев в системе GSM-R, как факторов снижения готовности; 5) установлены параметры, учитываемые при определении уровней полноты готовности (своевременности) систем и средств поездной радиосвязи стандарта GSM-R; 6) оценены рассмотренные отказы и сбои в терминах уровней полноты готовности. **Практическая значимость:** Полученный способ оценки уровней полноты готовности может быть применен при проектировании сетей радиосвязи и других систем на железнодорожном транспорте.

**Ключевые слова:** Отказ, сбой, GSM-R, поездная цифровая радиосвязь, надежность, готовность, безопасность, уровни полноты безопасности, уровни полноты готовности, стандарт EN 50126.

**Vladimir V. Shmatchenko**, Cand. Eng. Sci., assistant professor, railwayradio@gmail.com; **Dmitriy N. Roenkov**, Cand. Eng. Sci., assistant professor, roenkov\_dmitry@mail.ru; **Pavel A. Plekhanov**, Cand. Eng. Sci., assistant professor, pavelplekhanov@gmail.com; **Victor G. Ivanov**, senior lecturer, ivanov.v.g.spb@gmail.com; \***Natalya V. Yaronova**, postgraduate student, tatochka83@list.ru (Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University) THE IMPACT OF MALFUNCTIONS AND FAILURES OF GSM-R RADIO COMMUNICATIONS SYSTEM ON AVAILABILITY OF RAIL TRAFFIC MANAGEMENT SYSTEM

**Summary**

**Objective:** To assess the effect of failures and malfunctions of GSM-R digital radio, used by different operating organizations of European railways, on timeliness (availability) of train arrival. **Methods:** Methods of risk analysis were applied, in accordance with CENELEC Committee EN 50126 standard, including failure and malfunction identification in GSM-R systems, the assessment of their frequency and severity of consequences for timeliness of trains' arrival. **Results:** The following main results were obtained as a result of the conducted research: 1) the relations between transportation process safety and its availability determined by GSM-R systems' reliability were shown; 2) the consequences of GSM-R failures and malfunctions occurring in engineering systems and digital radio facilities were determined; 3) availability (timeliness) metrics was introduced depending on GSM-R system and facilities' reliability (AIL – availability Integrity Levels); 4) the classification of failures and malfunctions in GSM-R system, being the

causes of availability reduction, was formed; 5) the parameters, taken into account in the process of AIL determination, were established; 6) the considered failures and malfunctions, occurring in the GSM-R system, were assessed in terms of AIL. **Practical importance:** The obtained method of AIL evaluation may be used in design of radio network and railway systems.

**Keywords:** Failure, malfunction, GSM-R, train digital radio, reliability, safety, availability, safety integrity levels, availability integrity levels, EN 50126 standard.

## Введение

Известно, что основу как для безопасности, так и для готовности составляет надежность одних и тех же систем и средств [1–4]. Эту взаимосвязь иллюстрирует рис. 1. Из него следует, что перевозочный бизнес объективно должен быть заинтересован в увеличении готовности, которой характеризуется способность бизнеса получать прибыль и укреплять свою репутацию, и в повышении безопасности, от которой зависит способность бизнеса минимизировать материальные и репутационные потери, связанные с причинением вреда людям и окружающей среде.

Эта логика закреплена также международными нормативными документами, в частности, стандарт EN 50126-1 (международная версия – IEC 62278 [2]) в разделе 4.3.2 утверждает, что безопасность и готовность связаны друг с другом в том смысле, что слабость требований

к одной из этих характеристик или наличие противоречий между ними является признаком недостаточной надежности системы.

Система цифровой поездной радиосвязи (ПРС) стандарта GSM-R на протяжении 15 лет эксплуатируется на европейских железных дорогах. После анализа документа [5] в работе [6] было представлено подробное изучение действия отказов и сбоев в сетях GSM-R на безопасность движения поездов. Анализ риска, проведенный в [6] применительно к причинам и последствиям отказов и сбоев в цифровой системе ПРС стандарта GSM-R, позволил оценить уровни полноты безопасности (Safety Integrity Levels – SIL) для этих отказов и сбоев и предложить меры по снижению связанного с ними риска. В настоящей работе рассмотрено воздействие отказов и сбоев в сетях GSM-R на готовность железнодорожной транспортной системы к предоставлению перевозочных услуг.



Рис. 1. Взаимосвязь готовности и безопасности с надежностью и ремонтопригодностью систем

### Анализ действия отказов и сбоев в сетях GSM-R на своевременность прибытия поездов

При анализе действия отказов и сбоев на безопасность движения поездов системы радиосвязи GSM-R параллельно изучалось влияние указанных отказов и сбоев на своевременность прибытия поездов (т. е. влияние готовности этой системы радиосвязи на готовность транспортной системы к предоставлению перевозочных услуг). Все установленные отказы и сбои, а также их причины и воздействие на готовность приведены в табл. 1.

Представляется, что, подобно тому, как на множестве этих отказов и сбоев в [6] была введена метрика SIL, на этом же множестве может быть введена метрика уровней полноты готовности (своевременности) (Availability Integrity Levels – AIL). Это позволит классифицировать опасные события (отказы и сбои) еще и с такой точки зрения.

Под полнотой готовности будем понимать степень уверенности в том, что при штатных условиях эксплуатации и обслуживания система будет выполнять свои функции в соответствии со штатными требованиями к готовности системы. Следовательно, уровень полноты готовности – численное значение, которым характеризуется полнота готовности.

Согласно [7, 8], все отказы и сбои можно классифицировать по категориям в зависимости от тяжести последствий. Эта классификация в исходном виде представлена в табл. 2. В ней приведено расширение этой классификации – для 3-й категории отказов приведены два уровня тяжести последствий. Такое подразделение 3-й категории было произведено в связи с необходимостью учета отказов и сбоев, действие которых могло вызвать опоздания поездов, но не привело к ним в силу своевременного реагирования службы движения или по другим причинам. Понятно, что в любом случае причины и потенциальные последствия таких отказов и сбоев должны быть исследованы, для чего их необходимо группировать в отдельную категорию.

Кроме того, степень  $C_2$  тяжести последствий включает нарушение одного или нескольких обобщенных показателей качества перевозочной услуги, которыми оценивается ее восприятие клиентами и к которым относятся (модель SERVQUAL [9]):

- 1) надежность точного и своевременного предоставления всех аспектов услуги (Reliability);
- 2) способность обеспечить компетентность и конфиденциальность при предоставлении услуги (Assurance);
- 3) способность услуги производить положительное впечатление на клиентов (Tangible);
- 4) способность оценивать восприятие предоставляемой услуги клиентами (Empathy);
- 5) готовность оказать помощь при предоставлении услуги (Responsiveness).

С учетом вышесказанного и по аналогии с метрикой уровней полноты безопасности можно формализовать метрику уровней полноты готовности (AIL), определяя действующие параметры  $C, I, P, F$  так, как показано в табл. 3.

Для рассмотренных параметров справедливости соотношения

$$C_1 < C_2 < C_3 < C_4,$$

$$I_1 < I_2,$$

$$P_1 < P_2,$$

$$F_1 < F_2 < F_3.$$

Алгоритм компоновки этих параметров для формирования уровней полноты готовности представлен на рис. 2.

Оценка вероятностей появления отказов или сбоев должна производиться с использованием методов априорного и апостериорного оценивания. Априорное оценивание позволяет использовать мнение и опыт линейного персонала, для чего необходимо разрабатывать тематические вопросники, позволяющие классифицировать ответы по уровням полноты готовности. Апостериорное оценивание

ТАБЛИЦА 1. Отказы и сбои в цифровой системе ПРС стандарта GSM-R и уровни полноты безопасности и готовности

Отказы и сбои	Причины	Последствия	Уровень полноты безопасности	Уровень полноты готовности
1	2	3	4	5
Сбой при тестировании	Неисправность оборудования ПРС	Недостаточность гарантий своевременности (задержка поезда при отправлении)	–	–
Задержка передачи данных по радиоканалу о маршруте следования	Сбой канала GPRS	Недостаточность гарантий своевременности (задержка отправления поезда составила 30 мин)	–	AIL 1
Ошибочный аварийный вызов	Недоработка человеко-машинного интерфейса	Недостаточность гарантий своевременности (многократные задержки, измеряемые в единицах–десятках минут)	SIL 2	AIL 2
Отказ в доступе к услугам связи	Неисправность сетевой инфраструктуры GSM-R	Недостаточность гарантий своевременности (ограничение скорости в соответствии с процедурой безопасной деградации системы управления, задержки, измеряемые в единицах–десятках минут)	SIL 2	AIL 2
Проблемы регистрации подвижного состава при пересечении национальных границ	Недоработка процедуры межнационального роуминга, обусловленная различиями в правилах эксплуатации	Недостаточность гарантий своевременности (потери связи на значительной площади радиопокрытия GSM-R и значительные задержки по времени (15–30 мин на 1 поезд))	SIL 4+	AIL 3
Отказ передачи индивидуального вызова GSM-R	Помехи со стороны публичных сетей GSM	Недостаточность гарантий своевременности (возможное снижение своевременности из-за задержек получения важного распоряжения)	SIL 4+	AIL 3
Отказ передачи аварийного вызова GSM-R	Неисправность оборудования ПРС (из-за повреждения при крушении поезда на каменной осыпи)	Недостаточность гарантий своевременности (две аварийных ситуации подряд, со значительными (более часа) задержками движения поездов)	SIL 4+	AIL 3
		Недостаточность гарантий своевременности (потеря связи. ТЧМ удалось передать ДНЦ только вызов «112» по обычному телефону GSM. Задержка передачи вызова «112» около 20 мин)	SIL 4+	AIL 3

Окончание табл. 1

1	2	3	4	5
Отказ передачи аварийного вызова GSM-R	Помехи со стороны публичных сетей GSM	Недостаточность гарантий своевременности (задержка при выполнении восстановительных работ)	SIL 4+	AIL 3
Отказ передачи группового вызова, прерывание группового соединения		Недостаточность гарантий своевременности (задержка при выполнении маневровых работ)	SIL 4+	AIL 3
Неверная адресация при индивидуальном вызове ДНЦ→ТЧМ	Неправильное определение соты, в которой находится поезд	Недостаточность гарантий своевременности (возможное снижение своевременности из-за неполучения важного распоряжения)	SIL 4+	AIL 3
Неверная адресация при аварийном вызове ДНЦ→ТЧМ			SIL 4+	AIL 3
Проблемы передачи соединения при пересечении национальных границ	Несовершенство процедуры передачи соединения	Недостаточность гарантий своевременности (возможное снижение своевременности из-за задержек получения важного распоряжения, потери связи на время до 20 с)	SIL 4+	AIL 3

ТАБЛИЦА 2. Классификация отказов

Категория отказов	Последствия		Степень тяжести последствий
1-я	Отказы, приведшие к задержке движения поездов на время 1 ч и более (либо приведшие к транспортным происшествиям или событиям, связанным с нарушением правил безопасности движения и эксплуатации железнодорожного транспорта)		$C_4$
2-я	Отказы, приведшие к задержке движения поездов на время от 6 мин до 1 ч		$C_3$
3-я	Отказы, не имеющие последствий, относящихся к отказам 1-й и 2-й категорий	Задержка поездов на время до 6 мин	$C_2$
		Задержка одного поезда с возвращением в график	$C_1$

определяется на основе статистики реальных событий, учитываемых в системе мониторинга и администрирования.

Предложенный подход позволяет ввести метрику уровней полноты готовности АПЛ транспортной системы (табл. 4).

ТАБЛИЦА 3. Параметры полноты готовности (своевременности)

Параметры готовности		Градация параметров
Тяжесть последствий отказа или сбоя	$C_1$	Поезд приходит своевременно, но затраты при этом превышают штатные значения
	$C_2$	Поезд выходит из графика, но возвращается в него за счет выхода из графика других поездов
	$C_3$	Поезд приходит с задержкой от 6 мин до 1 ч (возможно, потребуется компенсация пассажирам)
	$C_4$	Задержка прибытия более 1 ч (возможно, что помимо компенсации пассажирам необходимо будет предоставить другие транспортные средства)
Интенсивность движения поездов	$I_1$	Незначительная
	$I_2$	Значительная
Возможность предотвращения (подконтрольность отказа или сбоя)	$P_1$	Возможно предотвращение отказов или сбоев или уменьшение тяжести их последствий
	$P_2$	Отказы или сбои неотвратимы
Вероятность появления отказа или сбоя в системе радиосвязи	$F_1$	Очень низкая (очень редкие события)
	$F_2$	Низкая (редкие события)
	$F_3$	Высокая (частые события)

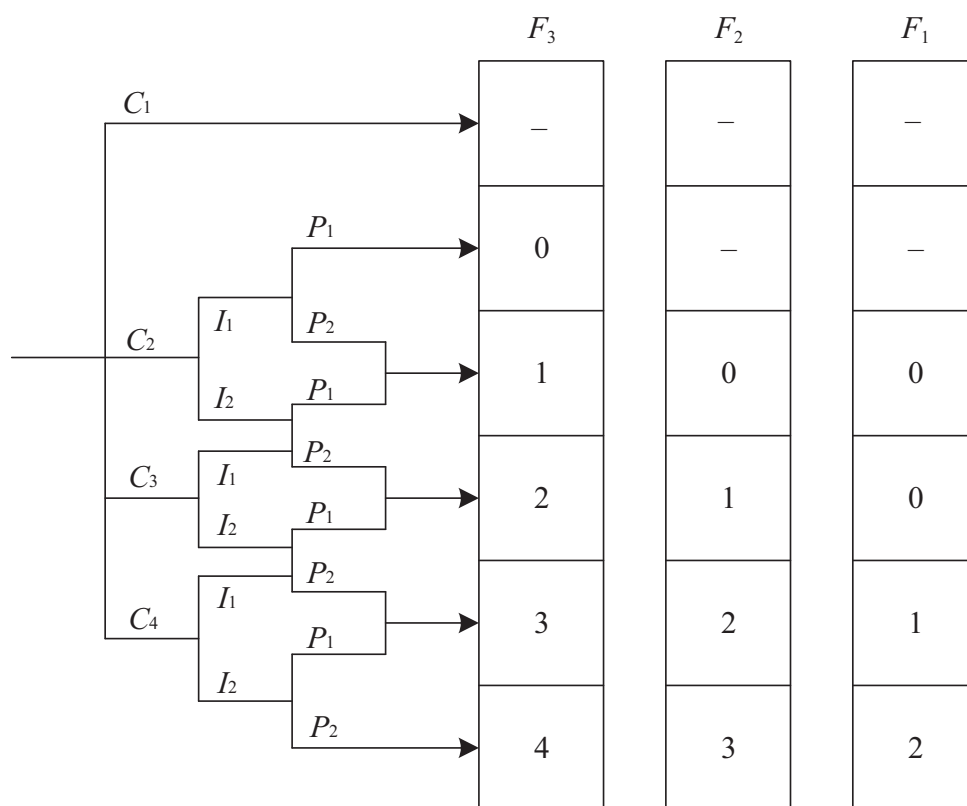


Рис. 2. Определение уровней полноты готовности

ТАБЛИЦА 4. Требования, предъявляемые к уровням полноты готовности

Уровни полноты готовности	Пояснения
–	Дополнительные требования по повышению готовности системы радиосвязи могут вырабатываться в рамках процесса совершенствования деятельности в системе менеджмента качества предприятия-перевозчика, и решение по их реализации остается на усмотрение руководства предприятия
AII 0	Дополнительные требования по повышению готовности системы радиосвязи могут вырабатываться в рамках процесса совершенствования деятельности в системе менеджмента качества предприятия-перевозчика, и руководству предприятия рекомендуется реализовать эти требования
AII 1	Необходимо сформулировать дополнительные требования, направленные: – либо на повышение надежности аппаратуры радиосвязи (чтобы отказы стали редкими или очень редкими событиями); – либо на предотвращение отказов (повышение ремонтпригодности на основе резервирования отказывающихся модулей) с выходом на уровень AII 0. Обоснование требований производится путем апостериорного оценивания имеющейся статистики и (или) априорного оценивания – анализа мнения линейного персонала, определяемого по результатам аудита. Соответствующие процедуры должны быть включены в процесс совершенствования деятельности в системе менеджмента качества предприятия-перевозчика
AII 2	Необходимо сформулировать дополнительные требования, направленные: – на повышение надежности аппаратуры радиосвязи (чтобы отказы стали редкими или очень редкими событиями); – на предотвращение отказов (повышение ремонтпригодности на основе резервирования отказывающихся модулей) с выходом на уровень AII 0. Обоснование требований производится путем апостериорного оценивания имеющейся статистики и априорного оценивания – анализа мнения линейного персонала, определяемого по результатам аудита. Соответствующие процедуры должны быть включены в процесс совершенствования деятельности в системе менеджмента качества предприятия-перевозчика
AII 3	Необходимо сформулировать дополнительные требования, направленные: – на повышение надежности аппаратуры радиосвязи (чтобы отказы стали редкими или очень редкими событиями); – на предотвращение отказов (повышение ремонтпригодности на основе резервирования отказывающихся модулей) с выходом на уровень AII 0. Обоснование требований производится путем апостериорного оценивания имеющейся статистики отказов и предотказных состояний и априорного оценивания – анализа мнения линейного персонала относительно отказов и предотказных состояний, определяемого по результатам аудита. Соответствующие процедуры должны быть включены в процесс совершенствования деятельности в системе менеджмента качества предприятия-перевозчика
AII 4	Необходимо сформулировать дополнительные требования, направленные: – на повышение надежности аппаратуры радиосвязи (чтобы отказы стали редкими или очень редкими событиями);



Уровни полноты готовности	Пояснения
AII 4	<p>– на предотвращение отказов (повышение ремонтпригодности на основе резервирования отказывающихся модулей) с выходом на уровень AII 0.</p> <p>Обоснование требований производится путем апостериорного оценивания имеющейся статистики отказов и предотказных состояний и априорного оценивания – анализа мнения линейного персонала относительно отказов и предотказных состояний, определяемого по результатам аудита. Соответствующие процедуры должны быть включены в процесс совершенствования деятельности в системе менеджмента качества предприятия-перевозчика, а также всех причастных организаций в кооперации работ с возможностью использования соответствующих данных предприятием-перевозчиком</p>
AII 2	<p>Необходимо сформулировать дополнительные требования, направленные:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– на повышение надежности аппаратуры радиосвязи (чтобы отказы стали редкими или очень редкими событиями);</li> <li>– на предотвращение отказов (повышение ремонтпригодности на основе резервирования отказывающихся модулей) с выходом на уровень AII 0.</li> </ul> <p>Обоснование требований производится путем апостериорного оценивания имеющейся статистики и априорного оценивания – анализа мнения линейного персонала, определяемого по результатам аудита. Соответствующие процедуры должны быть включены в процесс совершенствования деятельности в системе менеджмента качества предприятия-перевозчика</p>
AII 3	<p>Необходимо сформулировать дополнительные требования, направленные:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– на повышение надежности аппаратуры радиосвязи (чтобы отказы стали редкими или очень редкими событиями);</li> <li>– на предотвращение отказов (повышение ремонтпригодности на основе резервирования отказывающихся модулей) с выходом на уровень AII 0.</li> </ul> <p>Обоснование требований производится путем апостериорного оценивания имеющейся статистики отказов и предотказных состояний и априорного оценивания – анализа мнения линейного персонала относительно отказов и предотказных состояний, определяемого по результатам аудита. Соответствующие процедуры должны быть включены в процесс совершенствования деятельности в системе менеджмента качества предприятия-перевозчика</p>
AII 4	<p>Необходимо сформулировать дополнительные требования, направленные:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– на повышение надежности аппаратуры радиосвязи (чтобы отказы стали редкими или очень редкими событиями);</li> <li>– на предотвращение отказов (повышение ремонтпригодности на основе резервирования отказывающихся модулей) с выходом на уровень AII 0.</li> </ul> <p>Обоснование требований производится путем апостериорного оценивания имеющейся статистики отказов и предотказных состояний и априорного оценивания – анализа мнения линейного персонала относительно отказов и предотказных состояний, определяемого по результатам аудита. Соответствующие процедуры должны быть включены в процесс совершенствования деятельности в системе менеджмента качества предприятия-перевозчика, а также всех причастных организаций в кооперации работ с возможностью использования соответствующих данных предприятием-перевозчиком</p>

## Заключение

В статье рассмотрено влияние отказов и сбоев в системе радиосвязи GSM-R на готовность перевозочного процесса (на своевременность прибытия поездов) по данным документа [5].

Проведена классификация отказов и сбоев с учетом их воздействия на своевременность прибытия поездов; классификация выражена в уровнях полноты (гарантированности) готовности (AIL), подобно тому, как это было сделано для уровней полноты безопасности (SIL) [6].

Для каждого класса отказов и сбоев определен комплекс действий, направленных на минимизацию действия отказов и сбоев в системе радиосвязи и приведение этой системы в состояние AIL 0, т. е. с минимальным воздействием на своевременность прибытия поездов. В составе этих действий предусмотрены, в частности, идентификация предотказных состояний (для AIL 3 и AIL 4) и аудиты, основывающиеся на опросе линейного персонала.

Процедуры, регламентирующие указанные выше действия, могут быть составной частью процесса совершенствования деятельности в системе менеджмента качества ISO 9001 или системе менеджмента бизнеса IRIS [10] у предприятия-перевозчика, а уровни полноты готовности AIL могут рассматриваться как ключевые показатели эффективности (KPI – Key Performance Indicate).

Полнота готовности во многом зависит от полноты нормативной базы, регламентирующей организацию сетей радиосвязи на всех этапах их жизненного цикла. Нормативная база должна жестко соблюдать не только требования к сетям и средствам радиосвязи, но и к работам по их эксплуатации и обслуживанию на всех этапах жизненного цикла. От качества нормативной базы и ее соответствия современным требованиям зависит и качество работы радиосетей [11–16].

Представленный в статье подход, учитывающий уровни полноты как безопасности,

так и готовности, может быть применен и для других технических систем железнодорожного транспорта.

## Библиографический список

1. Шматченко В. В. Требования по надежности, готовности и ремонтпригодности для сетей GSM-R / В. В. Шматченко, П. Н. Ерлыков, П. А. Плеханов // Изв. Петерб. ун-та путей сообщения. – СПб. : ПГУПС, 2010. – Вып. 1. – С. 94–106.
2. IEC 62278. Railway applications – Specification and demonstration of reliability, availability, maintainability and safety (RAMS)\*. – М. : Стандартиформ, 2002. – 162 с.
3. IEC 62280. Railway applications – Communication, signalling and processing systems – Safety-related communication in transmission systems\*\*. – М. : Стандартиформ, 2014. – 136 с.
4. Шматченко В. В. Стандарты Комитета CENELEC как составная часть Международного стандарта железнодорожной промышленности IRIS / В. В. Шматченко, П. А. Плеханов // Сб. науч. тр. «Актуальные вопросы развития систем железнодорожной автоматики и телемеханики». – СПб. : ПГУПС, 2013. – С. 75–79.
5. Operational requirements of railway radio communication systems. – Valenciennes : European railway agency, 2014. – 77 p.
6. Шматченко В. В. Влияние отказов и сбоев системы радиосвязи GSM-R на безопасность перевозочного процесса / В. В. Шматченко, Д. Н. Роенков, П. А. Плеханов, В. Г. Иванов, Н. В. Яронова // Изв. Петерб. ун-та путей сообщения. – СПб. : ПГУПС, 2016. – Вып. 4 (49). – С. 570–578.
7. Управление ресурсами, рисками и надежностью на этапах жизненного цикла (УРРАН) : методика расчета показателей надежности железнодорожной электросвязи. – М. : ОАО «РЖД», 2014. – 68 с.

\* Железнодорожные приложения – Обоснование и подтверждение выполнения требований по надежности, готовности, ремонтпригодности и безопасности.

\*\* Железнодорожные приложения – Системы связи, сигнализации и обработки данных – Безопасная передача данных в системах связи.

8. Распоряжение ОАО «РЖД» от 19 мая 2014 г. № 1223р «Об утверждении стандарта СТО РЖД 02.046–2014 – Классификация инцидентов, вызывающих нарушения графика движения поездов». – М. : ОАО «РЖД», 2014. – 10 с.

9. Parasuraman A. SERVQUAL: A Multiple-Item Scale for Measuring Consumer Perceptions of Service Quality / A. Parasuraman, Valarie A. Zeithaml, Leonard L. Berry // *Journal of Retailing*. – 1988. – N 64 (1). – P. 12–40.

10. IRIS Revision 02.1. International Railway Industry Standard\*. – 2012.

11. Яронова Н. В. Методика оценки обеспеченности нормативной документацией сетей и средств поездной радиосвязи на всех этапах их жизненного цикла / Н. В. Яронова // Науч. тр. республикан. науч.-технич. конференции с участием зарубежных ученых «Ресурсосберегающие технологии на железнодорожном транспорте» (тр. конференции 14–15 декабря 2015 г.). – Ташкент : ТаШИИТ, 2015. – С. 269–272.

12. Роенков Д. Н. Основные требования к организации радиосвязи на высокоскоростной магистрали / Д. Н. Роенков, В. В. Шматченко, П. А. Плеханов, В. Г. Иванов // *Транспорт Российской Федерации*. – 2015. – № 2 (57). – С. 49–52.

13. Специальные технические условия «Проектирование участка Москва–Казань высокоскоростной железнодорожной магистрали Москва–Казань–Екатеринбург со скоростями движения до 400 км/ч. Изменение № 1». – СПб. : ПГУПС, 2016. – 73 с.

14. Специальные технические условия «Железнодорожная электросвязь участка Москва–Казань высокоскоростной железнодорожной магистрали Москва–Казань–Екатеринбург. Технические нормы и требования к проектированию и строительству железнодорожной радиосвязи. Изменение № 1». – СПб. : ПГУПС, 2016. – 50 с.

15. Специальные технические условия «Проверка действия и контроль параметров поездной радиосвязи и беспроводных систем передачи данных на участке Москва–Казань высокоскоростной железнодорожной магистрали Москва–Казань–Екатеринбург. Изменение № 1». – СПб. : ПГУПС, 2016. – 30 с.

16. Специальные технические условия «Обеспечение безопасности движения поездов на участке

Москва–Казань высокоскоростной железнодорожной магистрали Москва–Казань–Екатеринбург. Технические нормы и требования к проектированию и строительству. Изменение № 1». – СПб. : ПГУПС, 2016. – 25 с.

## References

1. Shmatchenko V. V., Yerlykov P. N. & Plekhanov P. A. Trebovaniya po nadezhnosti, gotovnosti i remontoprygodnosti dlya setey GSM-R [Reliability, availability and maintainability requirements for GSM-R networks]. *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2010, issue 1, pp. 94–106. (In Russian)

2. IEC 62278. *Railway applications – Specification and demonstration of reliability, availability, maintainability and safety (RAMS)*. Moscow, Standartinform Publ., 2002, 162 p.

3. IEC 62280. *Railway applications – Communication, signaling and processing systems – Safety-related communication in transmission systems*. Moscow, Standartinform Publ., 2014, 136 p.

4. Shmatchenko V. V. & Plekhanov P. A. Standarty Komyteta CENELEC kak sostavnaya chast Mezh-dunarodnogo standarta zheleznodorozhnoy promyshlennosti IRIS [CENELEC Committee Standards as an integral part of International Railway Industry Standard IRIS]. *Sbornyk nauchnykh trudov “Aktualniye voprosy razvitiya system zheleznodorozhnoy avtomatyki i telemekhaniky”* [“Topical issues of railway automatics and telemechanics systems’ development”]. Saint Petersburg, PGUPS Publ., 2013, pp. 75–79. (In Russian)

5. *Operational requirements of railway radio communication systems*. Valenciennes, European railway agency Publ., 2014, 77 p.

6. Shmatchenko V. V., Royenkov D. N., Plekhanov P. A., Ivanov V. G. & Yaronova N. V. Vliyaniye otkazov i sbojev systemy radiosvyazy GSM-R na bezopasnost perevochnogo protsessa [The impact of malfunctions and failures of GSM-R radio communications systems on the safety of transportation process]. *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2016, vol. 13, issue 4 (49), pp. 570–578. (In Russian)

7. *Upravleniye resursamy, riskamy i nadezhnostiyu na etapakh zhyznennogo tsykla (URRAN): metodyka rascheta pokazateley nadezhnosti zheleznodorozhnoy elektrosvyazy* [Resources, risks and reliability manage-

\* Международный стандарт железнодорожной промышленности.

ment at the stages of a life cycle (URRAN): calculation method of railway telecommunication reliability indices]. Moscow, OJSC “Russian Railways” Publ., 2014, 68 p. (In Russian)

8. *Rasporyazheniye OAO “RZhD” ot 19 maya 2014 g. no. 1223r “Ob utverzhdenii standarta STO RZhD 02.046–2014 – Klassifikatsiya intsydentov, vyzvayushykh narusheniya grafika dvyzheniya poyezdov”* [OJSC “Russian Railways” order dated May 19th 2014 section N 1223 “On approval of 02.046–2014 OJSC “Russian Railways” Industry Standard – Classification of incidents which cause train schedule delays”]. Moscow, OJSC “Russian Railways” Publ., 2014, 10 p. (In Russian)

9. Parasuraman A., Zeithaml Valerie A., Berry Leonard L. SERVQUAL: A Multiple-Item Scale for Measuring Consumer Perceptions of Service Quality. *Journal of Retailing*, 1988, no. 64 (1), pp. 12–40.

10. *IRIS Revision 02.1. International Railway Industry Standard*, 2012.

11. Yaronova N. V. *Metodyka otsenky obespechennosti normativnoy dokumentatsiyey setey i sredstv poyezdnoy radiosvyazy na vseh etapakh ikh zhiznennogo tsikla* [Estimation procedure of regulatory documentation support of radio train communication networks and facilities at all stages of the life cycle]. *Nauchniye trudy respublykanskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii s uchastiyem zarubezhnykh uchenykh “Resursosberegayushiye tekhnologii na zheleznodorozhnom transporte” (trudy konferentsii 14–15 dekabrya 2015g.)* [Scientific works of the republican scientific and technical conference with the participation of scholars abroad “Resource-saving technologies on railway transport” (Proceedings of the conference on December 14–15 2015)]. Tashkent, TashIT Publ., 2015, pp. 269–272. (In Russian)

12. Royenkov D. N., Shmatchenko V. V., Plekhanov P. A. & Ivanov V. G. *Osnovniye trebovaniya k organizatsii radiosvyazy na vysokoskorostnoy magystraly* [Basic requirements on organization of radiocommunication on a high-speed network]. *Transport of the Russian Federation*, 2015, no. 2 (57), pp. 49–52. (In Russian)

13. *Spetsialniye tekhnicheskiye usloviya “Proyektyrovaniye uchastka Moskva–Kazan vysokoskorostnoy zheleznodorozhnoy magystraly Moskva–Kazan–Yekaterinburg so skorostyamy dvyzheniya do 400 km/ch. Izmeneniye no. 1”* [Special technical regulations “The development of Moscow–Kazan district of Moscow–Kazan–Yekaterinburg high-speed railroad with speeds up to 400 km/h. Amendment N 1”]. Saint Petersburg, PGUPS Publ., 2016, 73 p. (In Russian)

14. *Spetsialniye tekhnicheskiye usloviya “Zheleznodorozhnaya elektrosvyaz uchastka Moskva–Kazan vysokoskorostnoy zheleznodorozhnoy magystraly Moskva–Kazan–Yekaterinburg. Tekhnicheskiye normy i trebovaniya k proyektyrovaniyu i stroitelstvu zheleznodorozhnoy radiosvyazy. Izmeneniye no. 1”* [Special technical regulations “Railway telecommunication of Moscow–Kazan district of Moscow–Kazan–Yekaterinburg high-speed railroad. Technical regulations and engineering and construction requirements of railway radio communication. Amendment N 1”]. Saint Petersburg, PGUPS Publ., 2016, 50 p. (In Russian)

15. *Spetsialniye tekhnicheskiye usloviya “Proverka deystviya i control parametrov poyezdnoy radiosvyazy i besprovodnykh system peredachy dannykh na uchastke Moskva–Kazan vysokoskorostnoy zheleznodorozhnoy magystraly Moskva–Kazan–Yekaterinburg. Izmeneniye no. 1”* [Special technical regulations “Functioning and parameter checkout of radio train communication and wireless data communication network at Moscow–Kazan district of Moscow–Kazan–Yekaterinburg high-speed railroad. Amendment N 1”]. Saint Petersburg, PGUPS Publ., 2016, 30 p. (In Russian)

16. *Spetsialniye tekhnicheskiye usloviya “Obespecheniye bezopasnosti dvyzheniya poyezdov na uchastke Moskva–Kazan vysokoskorostnoy zheleznodorozhnoy magystraly Moskva–Kazan–Yekaterinburg. Tekhnicheskiye normy i trebovaniya k proyektyrovaniyu i stroitelstvu. Izmeneniye no. 1”* [Special technical regulations “Train safety control at Moscow–Kazan district of Moscow–Kazan–Yekaterinburg high-speed railroad. Technical regulations and engineering and construction requirements. Amendment N 1”]. Saint Petersburg, PGUPS Publ., 2016, 25 p. (In Russian)

ШМАТЧЕНКО Владимир Владимирович – канд. техн. наук, доцент, railwayradio@gmail.com; РОЕНКОВ Дмитрий Николаевич – канд. техн. наук, доцент, goenkov\_dmitry@mail.ru; ПЛЕХАНОВ Павел Андреевич – канд. техн. наук, доцент, pavelplekhanov@gmail.com; ИВАНОВ Виктор Геннадьевич – ст. преподаватель, ivanov.v.g.spb@gmail.com; \*ЯРОНОВА Наталья Валерьевна – аспирант, tatochka83@list.ru (Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I).



УДК 656.2:658.382.3

**М. А. Гаранин, А. М. Завьялов, Ю. В. Дементьева**

## **КОРРЕЛЯЦИОННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПРИЧИН НЕСЧАСТНЫХ СЛУЧАЕВ НА СТАТИСТИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ТРАВМАТИЗМА**

Дата поступления: 22.03.2017

Решение о публикации: 03.07.2017

### **Аннотация**

**Цель:** Идентифицировать причины несчастных случаев, оказывающих влияние на статистические показатели производственного травматизма хозяйства пути Куйбышевской железной дороги, с учетом степени тяжести повреждения здоровья пострадавших. Определить степень взаимосвязи исследуемых характеристик и величин. **Методы:** Интегрированы материалы расследования несчастных случаях на производстве, происшедших на предприятиях хозяйства пути Куйбышевской железной дороги за период с 2004 по 2016 г. Травматические события обследуемого периода ранжированы по степени тяжести повреждения здоровья пострадавших. Изучены обстоятельства несчастных случаев и выявлены причины их наступления. Для реализации постановочной цели были использованы: акты о несчастных случаях на производстве по форме Н-1, статистический анализ производственного травматизма хозяйства пути, классификатор причин несчастных случаев на производстве, диаграмма Исикавы, корреляционный анализ Пирсона, шкала Чеддока. **Результаты:** В рамках хозяйства пути Куйбышевской железной дороги проведены корреляционные исследования влияния причин несчастных случаев на количество пострадавших работников с учетом степени тяжести повреждения их здоровья. Идентифицированы причины несчастных случаев, влияющие на статистические показатели производственного травматизма. Отмечена заметная, а также высокая степень установленной статистической взаимосвязи анализируемых характеристик и величин. **Практическая значимость:** Результаты корреляционного анализа представлены как инструмент выявления в трудовой деятельности хозяйства пути таких нарушений требований безопасности, которые фактически стали причинами трагических и фатальных последствий. Проведенные научные работы позволяют представлять потенциальные последствия несчастных случаев, т. е. степень тяжести повреждения здоровья от воздействия тех или иных причин. Практическая дееспособность результатов анализа достигается посредством дополнения ими основного перечня вопросов первичного и повторного инструктажей на рабочем месте, что определяет фокус внимания работников хозяйства пути на причинах несчастных случаев постфактум и повышает их ответственность за собственную безопасность в процессе трудовой деятельности. Предложенные превентивные мероприятия способствуют формированию и (или) корректировке планов и программ, направленных на снижение уровня риска травмирования работников, занятых текущим содержанием и ремонтом пути.

**Ключевые слова:** Путевое хозяйство, причины несчастных случаев, статистические показатели производственного травматизма, несчастный случай на производстве, степень тяжести повреждения здоровья, коэффициент взаимной сопряженности, корреляционная зависимость.

**Maksim A. Garanin**, D. Eng. Sci., associate professor, garanin@samgups.ru; **Iuliia V. Dementieva**, postgraduate student, yulia\_dementyeva@bk.ru (Samara State Transport University) CORRELATION RESEARCH OF ACCIDENT CAUSES IMPACT ON STATISTIC INDEXES OF OCCUPATIONAL INJURIES

## Summary

**Objective:** To identify accident causes affecting statistical indexes of occupational injuries of the staff of the Kuibyshev Railway track facilities with the account of severity of injuries, as well as to determine the correlation degree of the studied characteristics and values. **Methods:** Investigations of the occupational accidents that occurred at the track facilities enterprises of the Kuibyshev Railway during the period 2004–2016 were brought together. The accidents in question were ranged according to the severity of injuries. The circumstances of the accidents were studied and the causes for their occurrence were determined. N-1 notification form of an occupational injury, statistical analysis of workplace accidents at track facilities enterprises, classifier of occupational accidents causes, Ishikawa diagram, Pearson correlation analysis, Cheddok scale were applied to achieve the stated objective. **Results:** Correlation research of accident causes impact on the number of casualties with the account of severity of their injuries was carried out at the track facilities of the Kuibyshev Railway. Accident causes affecting statistic indexes of workplace accidents were identified. A noticeable and high degree of the determined statistical correlation between the analyzed characteristics and values was pointed out. **Practical relevance:** Results of the correlation analysis were presented as a tool for identification of safety requirements violations within track facilities activities, which in fact have resulted in tragic and fatal consequences. The conducted research in question provides workers with better understanding of potential consequences of accidents, i. e. the severity of injuries from specific causes. Practical relevance of the analysis results is achieved by contributing this information to the main list of issues of the basic and refresher trainings which focus the attention of employees on the accidents causes and increases their responsibility for their own safety at workplace. Generally, the proposed preventive measures contribute to forming and (or) adjusting plans and programs aimed at reducing the risk of injury of workers engaged in track maintenance and repair.

**Keywords:** Track facilities, accident causes, statistic indexes of occupational injuries, occupational accidents, severity of injuries, coefficient of mutual contingence, correlation dependence.

Условия труда и выраженная отраслевая специфика функционирования железнодорожного транспорта, особенности, сложность и разнообразие технологических процессов, эксплуатация оборудования и железнодорожного подвижного состава связаны с перманентной повышенной опасностью труда. Работа подразделений ОАО «РЖД» обусловлена круглосуточным обеспечением движения поездов в любых климатических условиях, в условиях дефицита времени и высокой ответственности за результат работы. В этой связи осуществление экономическими субъектами компании ОАО «РЖД» производственной деятельности сопряжено с риском наступления несчастного случая [1–4].

Основное направление политики ОАО «РЖД» в области охраны труда – обеспече-

ние приоритета сохранения жизни и здоровья работников в процессе их производственной деятельности. Охрана труда и техника безопасности, организация здоровых и безопасных условий труда на рабочем месте – одна из ключевых проблем железнодорожного транспорта, от состояния которой зависит его успешное функционирование. В условиях масштабного реформирования отрасли приоритетной задачей для всех видов деятельности остается сохранение жизни и здоровья каждого работающего [5, 6].

Служба пути – одно из основных и наиболее фондоемких хозяйств Центральной дирекции инфраструктуры ОАО «РЖД», главной задачей которого является безопасное и бесперебойное движение поездов при безусловном обеспечении исправного содержания же-

лезнодорожного пути и путевых устройств, а также приоритета сохранения жизни и здоровья работников в процессе производственной деятельности. Подавляющее большинство работников хозяйства пути по основным направлениям деятельности заняты на работах по текущему содержанию и ремонту пути, специфичность которых имеет ряд особенностей, непосредственно влияющих на безопасность труда [5, 7, 8].

Статистический анализ производственного травматизма Куйбышевской железной дороги в период с 2004 по 2016 г. свидетельствует о доминирующем количестве пострадавших от несчастных случаев на производстве в хозяйстве пути, что характеризует его, как самое травмоопасное [7, 8]. Несчастный случай на производстве, происшедший с работником структурных подразделений ОАО «РЖД», приводит не только к вреду причинения здоровья пострадавшему, но и к значительному материальному ущербу компании. Значительные социальные и экономические потери, вызванные производственным травматизмом, в приоритете сохранения жизни и здоровья работников, обуславливают актуальность и существенное возрастание значимости проведения углубленного исследования обстоятельств несчастных случаев и выявления причин, вызвавших их наступление.

Апостериорно-агрегированный анализ статистических показателей производственного травматизма показал, что в 2004–2016 гг. в хозяйстве пути Куйбышевской железной дороги произошло 135 несчастных случаев, в результате которых пострадали 154 человека, из них 78 получили травмы легкой степени тяжести, 56 – с тяжелым исходом и 20 были травмированы смертельно [7–9].

Трагические и фатальные события, происшедшие на производстве и приведшие к временной или стойкой утрате трудоспособности пострадавших либо к их смерти, происходят с работниками не случайно. В преобладающем большинстве всегда наличествуют причины, вызывающие травмирование работающих, т. е. несчастному случаю предшествуют те

или иные нарушения требований охраны труда, потенциально влияющие на безопасность их трудовой деятельности [1, 2–4, 9].

Для выявления причин несчастных случаев, происшедших на предприятиях хозяйства пути Куйбышевской железной дороги, были интегрированы материалы их расследования. Несчастные случаи на производстве изучаемого периода ранжированы по степени тяжести повреждения здоровья пострадавших. Посредством изучения актов о несчастных случаях на производстве по форме Н-1 проанализированы обстоятельства обследуемых событий и определены причины их наступления. Для распределения причин несчастных случаев на производстве, происшедших на предприятиях хозяйства пути Куйбышевской железной дороги, на родительские и дочерние был использован соответствующий классификатор [10].

В научных исследованиях [2] с доверительной вероятностью 0,99% было установлено влияние родительских причин несчастных случаев хозяйства пути, как качественного факторного признака, на показатели и динамику производственного травматизма, а также на степень тяжести повреждения здоровья пострадавших. Произведенная оценка полученного коэффициента корреляции Пирсона показала, что между этими переменными имеет место заметная, т. е. значимая, взаимосвязь. Основываясь на результатах корреляционного анализа [2], рассмотрим влияние дочерних причин производственного травматизма, оказывающих непосредственное воздействие на травмирование работников путевого хозяйства.

Для наглядного представления совокупности и распределения причин несчастных случаев на родительские и дочерние используем причинно-следственную диаграмму Исикавы [11] и применим ее с целью графического отображения взаимосвязи между проблемой производственного травматизма за ряд последовательных лет исследуемого периода и причинами несчастных случаев. Диаграмма Исикавы позволяет прояснить и учесть все

существующие причины травмирования работников хозяйства пути, воздействующие на работника в процессе трудовой деятельности и повлекшие за собой несчастный случай на производстве, наглядно показывает связи родительских и дочерних причин и способствует проведению анализа полученных характеристик и величин [11].

Графическая интерпретация причинно-следственной связи производственного травматизма хозяйства пути Куйбышевской железной дороги представлена диаграммой Исикавы на рис. 1.

Из всех идентифицированных дочерних причин производственного травматизма хозяйства пути следует выявить те, которые в значительной мере оказали влияние на наступление несчастного случая, т. е. оказались ключевыми.

Для этого определим наличие или отсутствие взаимосвязи, т. е. степень влияния исследуемых причин травмирования на количество пострадавших.

Дочерние причины несчастных случаев на производстве рассмотрим, как количественный факторный признак, потенциально влияющий на статистические показатели производственного травматизма. Посредством математических расчетов установим, насколько тесны и непротиворечивы статистические связи между показателями, характеризующими влияние дочерних причин несчастных случаев на статистические показатели производственного травматизма.

Так как показатели количества причин и пострадавших в результате несчастных случаев на производстве – это случайные величины, их степень взаимосвязи характеризует корреляционная статистическая зависимость, математической мерой которой служит коэффициент корреляции Пирсона [12, 13].

Рассмотрим взаимосвязь и степень влияния причины «отсутствие утвержденного технологического процесса или его несоответствие нормативным требованиям охраны труда», определенной в классификаторе под кодом 0301 [10], на количество пострадавших в ре-

зультате несчастных случаев на производстве, допущенных в хозяйстве пути Куйбышевской железной дороги за период 2004–2016 гг.

Корреляционная зависимость предполагает, что пара переменных измерена в дискретной шкале, где  $x$  – входная переменная «причина несчастного случая» и независимая случайная величина,  $y$  – выходная переменная «количество пострадавших в результате несчастных случаев» и зависимая случайная величина. Для оценки степени зависимости между ними следует знать как величину корреляции, так и ее значимость. Для расчета коэффициента корреляции  $r_{xy}$  используем идентифицированные и ранжированные количественные значения по общему количеству пострадавших по фактору «причина несчастного случая» и подставим их в формулу

$$r_{xy} = \frac{\sum(x_i - \bar{x}) \cdot (y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum(x_i - \bar{x})^2 \cdot \sum(y_i - \bar{y})^2}}, \quad (1)$$

в которой  $x_i, y_i$  – значения, принимаемые переменной  $x$  и  $y$  соответственно [13]. Полученные данные приведены в табл. 1.

Из произведенных расчетов следует, что коэффициент корреляции  $r_{xy} = 0,831$ . Теперь следует выяснить, о чем свидетельствует такое значение. Для этого изначально выполним коррекцию коэффициента корреляции по модулю с помощью формулы

$$|\bar{r}| = 1 - \sqrt{1 - r^2} \frac{n-1}{n-2}, \quad (2)$$

где  $|\bar{r}|$  – скорректированное значение коэффициента корреляции;  $r$  – расчетное значение коэффициента корреляции, вычисленное по формуле (1) [13].

Подставив величину  $r_{xy}$  в формулу (2), получим

$$|\bar{r}| = 1 - \sqrt{1 - 0,831^2} \frac{13-1}{13-2},$$

$$|\bar{r}| = 0,868.$$



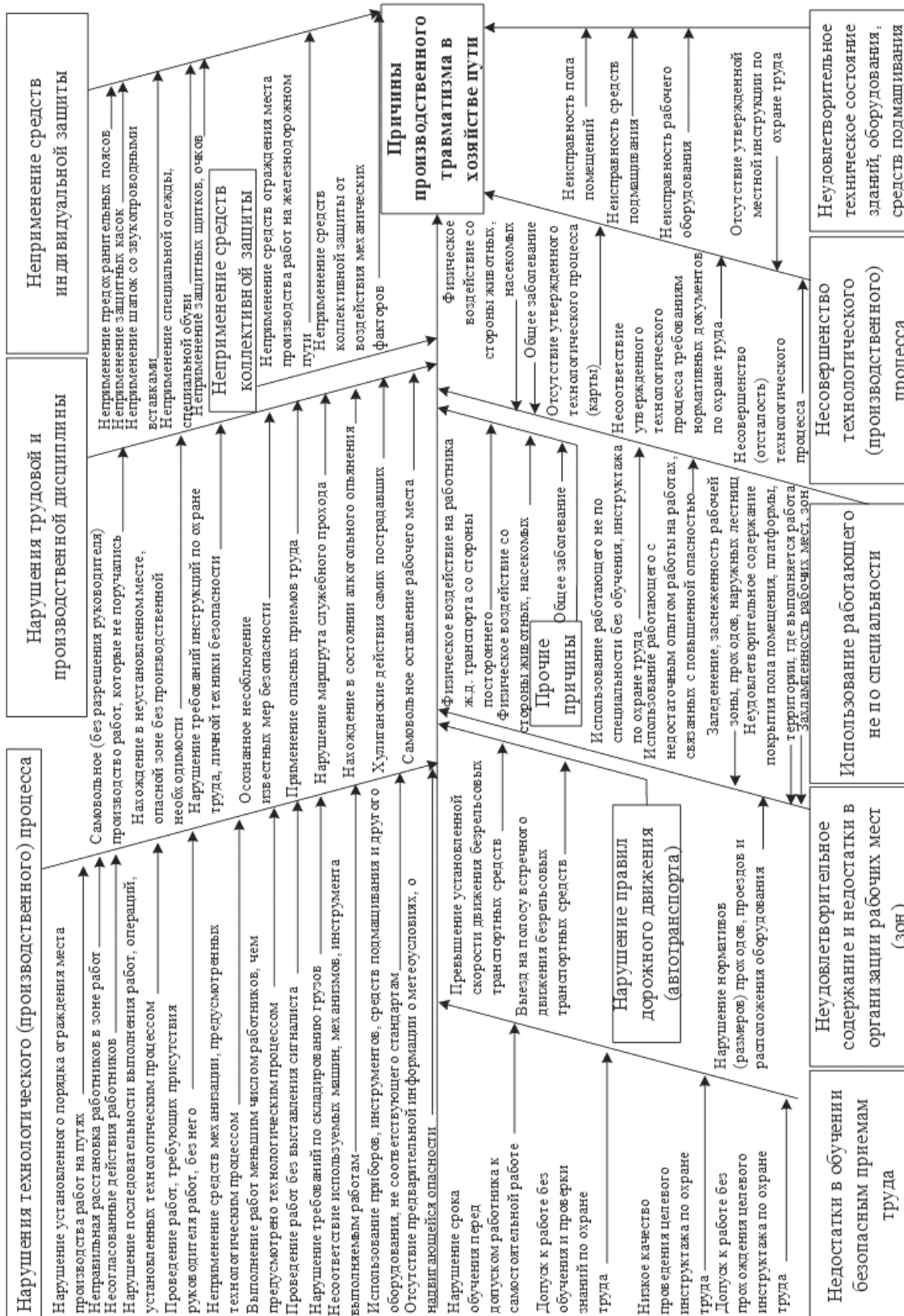


Рис. 1. Диаграмма Исикавы причинно-следственной связи производственного травматизма хозяйства в пути Куйбышевской железной дороги с 2004 по 2016 г.

ТАБЛИЦА 1. Расчеты для вычисления коэффициента корреляции

Годы	Количество причин, $x_i$	Количество пострадавших, $y$ , чел.	$x_i - \bar{x}$	$y_i - \bar{y}$	$(x_i - \bar{x})^2$	$(y_i - \bar{y})^2$	$(x_i - \bar{x}) \cdot (y_i - \bar{y})$
2004	5	22	3,615538	10,230769	13,071005	104,668639	36,988166
2005	0	9	-1,384615	-2,769231	1,917159	7,668639	3,834319
2006	0	13	-1,384615	1,230769	1,917159	1,514792	-1,704142
2007	1	14	-0,384615	2,230769	0,147928	4,976331	-0,857988
2008	4	24	2,615384	12,230769	6,840236	149,591715	31,988165
2009	2	18	0,615384	6,230769	0,378698	38,822485	3,834319
2010	1	7	-0,384615	-4,769231	0,147928	22,745562	1,834319
2011	1	11	-0,384615	-0,769231	0,147928	0,591715	0,295857
2012	1	6	-0,384615	-5,769231	0,147928	33,284023	2,218934
2013	1	8	-0,384615	-6,769231	0,147928	45,207101	1,449704
2014	0	5	-1,384615	-3,769231	1,917159	14,207101	9,372781
2015	1	9	-0,384615	-2,769231	0,147928	7,668639	1,065088
2016	1	7	-0,384615	-4,769231	0,147928	22,745562	1,834319

Примечание.  $\bar{x}$  – средняя по  $x = 1,384$ ,  $\bar{y}$  – средняя по  $y = 11,769$ .

Далее необходимо найти среднюю ошибку вычисленного коэффициента корреляции и вероятность достоверности наличия взаимосвязи между рассматриваемой причиной несчастных случаев и количеством пострадавших соответственно. При числе сопоставляемых пар (наблюдений)  $n < 100$  средняя ошибка коэффициента корреляции  $m_r$  составит

$$m_r = \sqrt{\frac{1-r^2}{n-2}}. \quad (3)$$

Подставив ее значения в формулу (3), находим

$$m_r = \sqrt{\frac{1-0,831^2}{13-2}},$$

$$m_r = 0,168.$$

Для оценки значимости коэффициента корреляции определим статистическое значение  $t_{\text{ст}}$

$$t_{\text{ст}} = \frac{|r|}{m_r}. \quad (4)$$

Подставив его в формулу (4), имеем

$$t_{\text{ст}} = \frac{0,868}{0,168} = 5,167.$$

Сравним величину  $t_{\text{ст}}$  с теоретической, используя таблицу квантили  $t$ -распределения Стьюдента для доверительной вероятности  $1 - a = 0,95$ ;  $1 - a = 0,99$ ;  $1 - a = 0,999$  в зависимости от числа степеней свободы  $\nu = n - 2$ ,  $a_1 = 0,05$  и  $a_2 = 0,01$  [12, 13].

Если  $t_{\text{ст}} \leq t_{a=0,05}$ , то принимается нулевая гипотеза, т.е.  $r = 0$ , и, следовательно, связь между изучаемыми явлениями несущественна.

Если  $t_{\text{ст}} > t_{a=0,01}$ , то нулевая гипотеза отклоняется и связь между явлениями считается установленной [12, 13].

В изучаемом случае получаем следующее:  $t_{\text{ст}0301} = 5,167$ ,  $t_{a=0,001} = 4,437$ ,  $5,167 > 4,437$ . Это значит, что  $t_{\text{ст}0301} > t_{a=0,001}$  и с вероятностью

0,999 % свидетельствует об установленной связи между рассматриваемыми переменными «причина несчастного случая» и «общее количество пострадавших в результате несчастных случаев на производстве».

Численное значение коэффициента корреляции  $r_{xy}$  варьирует от  $-1$  до  $+1$  и определяет соответственно обратную или прямую взаимосвязь между исследуемыми переменными. Тогда  $r_{xy, 0301} = 0,831 \pm 0,17$  констатирует прямую корреляционную зависимость, подтверждающую постановочную гипотезу, а именно: с увеличением количества выявленных причин несчастных случаев «отсутствие утвержденного технологического процесса или его несоответствие нормативным требованиям охраны труда» растет количество травмированных работников.

Качественно оценим тесноту связи между характеристиками и величинами на основе шкалы Чеддока [1, 4], где  $0,1 < |\bar{r}| < 0,3$  – слабая взаимосвязь,  $0,3 < |\bar{r}| < 0,5$  – умеренная,  $0,5 < |\bar{r}| < 0,7$  – заметная,  $0,7 < |\bar{r}| < 0,9$  – высокая и  $0,9 < |\bar{r}| < 1,0$  – весьма высокая. Отсюда следует, что скорректированное значение коэффициента корреляции  $|\bar{r}|_{0301} = 0,868$  говорит о высоком влиянии анализируемой причины на количество работников, пострадавших от ее воздействия, как нарушения требований охраны труда.

Таким образом, уровень риска наступления несчастного случая в хозяйстве пути Куйбышевской железной дороги в значительной степени зависит от отсутствия в организации утвержденного технологического процесса или несоответствия его нормативным требованиям охраны труда.

Посредством аналогичного способа с использованием формулы (1) произведем расчет коэффициентов корреляции по другим анализируемым причинам и сравним полученные статистические значения с теоретическими [12, 13].

Произведенные расчеты показывают наличие взаимосвязи отдельных причин несчастных случаев с вероятностью 0,95 %, когда  $t_{ct} > t_{a=0,05}$ ,  $t_{ct} > 2,201$ , с вероятностью 0,99 %,

когда  $t_{ct} > t_{a=0,01}$ ;  $t_{ct} > 3,106$ , с вероятностью 0,999 %, когда  $t_{ct} > t_{a=0,001}$  при  $t_{ct} > 4,437$ , свидетельствует об установленной связи между рассматриваемыми переменными «причина несчастных случаев» и «количество пострадавших в результате несчастных случаев на производстве».

Результаты расчетов, определяющие влияние тех или иных причин на показатели производственного травматизма, приведены в табл. 2.

Проведенные научные исследования за период с 2004 по 2016 г. в рамках хозяйства пути Куйбышевской железной дороги показывают, что среди множества причин наступления несчастных случаев установлены те, которые оказывают существенное влияние на потенциал события травмирования работников. Полученные результаты корреляционного анализа свидетельствуют о следующей зависимости: с увеличением числа определенных причин несчастных случаев растет количество пострадавших с последующей временной или стойкой утратой трудоспособности либо с их смертельным исходом. Из этого следует, что те или иные нарушения требований охраны и безопасности труда, апостериорно повлекшие за собой травмирование работников, являются причинами происшедших несчастных случаев и оказывают значительное влияние на уровень профессионального риска и возможность наступления несчастного случая в хозяйстве пути Куйбышевской железной дороги. Данные анализа позволят в последующей перспективе выполнить множественный регрессионный анализ исследованных причин несчастных случаев и получить соответствующие уравнения регрессии, как эмпирическую модельную функцию ретроспективного прогнозирования производственного травматизма.

Применение на практике результатов дает возможность работникам выявлять в их трудовой деятельности такие нарушения требований охраны и безопасности труда, воздействие которых фактически становились причинами наступления несчастных случаев на производстве. Вместе с этим работники

ТАБЛИЦА 2. Результаты расчетов значений по общему травматизму и по степени тяжести повреждения здоровья пострадавших от несчастных случаев на производстве

Код причины	Виды травматизма по степени тяжести повреждения здоровья пострадавших															
	общий				с легким исходом				с тяжелым исходом				со смертельным исходом			
	$r_{xy}$	$\bar{r}$	$m_r$	$t_{ст}$	$r_{xy}$	$\bar{r}$	$m_r$	$t_{ст}$	$r_{xy}$	$\bar{r}$	$m_r$	$t_{ст}$	$r_{xy}$	$\bar{r}$	$m_r$	$t_{ст}$
0301	0,83	0,87	0,17	5,17	0,72	0,76	0,21	3,64	0,66	0,69	0,23	3,03	0,72	0,75	0,21	3,57
0402	0,49	###	###	###	0,26	###	###	###	0,00	###	###	###	0,74	0,77	0,20	3,80
0411	0,47	###	###	###	0,00	###	###	###	0,00	###	###	###	0,63	0,66	0,23	2,80
0405	0,68	0,71	0,22	3,23	0,69	0,72	0,22	3,26	0,72	0,75	0,21	3,62	0,00	###	###	###
0406	0,77	0,80	0,19	4,13	0,71	0,77	0,21	3,45	0,68	0,71	0,22	3,21	0,00	###	###	###
1003	0,81	0,85	0,18	4,81	0,72	0,75	0,22	3,43	0,74	0,77	0,20	3,80	0,64	0,67	0,24	2,74
1006	0,69	0,73	0,22	3,37	0,62	0,64	0,24	2,71	0,65	0,68	0,23	2,98	0,00	###	###	###
1115	0,92	0,96	0,12	7,91	0,27	###	###	###	0,95	0,99	0,10	10,8	0,00	###	###	###

1301	Неприменение средств ограждения места производства работ на железнодорожных путях	0,62	0,65	0,24	2,73	0,15	###	###	0,00	###	###	###	0,73	0,77	0,22	3,58
1905	Нарушение требований инструкций по охране труда и личной техники безопасности	0,83	0,86	0,17	5,07	0,61	0,63	0,24	2,63	0,76	0,80	0,19	4,07	###	###	###
1906	Осознанное нарушение известных мер безопасности	0,85	0,89	0,16	5,59	0,73	0,76	0,21	3,65	0,79	0,83	0,18	4,49	0,71	0,22	3,19
1909	Применение в работе опасных приемов труда	0,66	0,69	0,23	3,04	0,69	0,72	0,22	3,32	0,72	0,75	0,21	3,62	###	###	###
1914	Нахождение в состоянии алкогольного опьянения	0,71	0,73	0,21	3,43	0,69	0,72	0,21	3,45	0,67	0,70	0,22	3,09	0,68	0,23	2,93

П р и м е ч а н и е. Если значения коэффициентов корреляции  $r_{xy}$  меньше по отношению к пороговому  $r_{xy} < 0,6$ , то подтверждать его значимость не имеет смысла, поэтому напротив этих значений проставлены условные знаки ###.

априорно могут представлять потенциальные последствия, т. е. степень тяжести повреждения здоровья потенциального пострадавшего от воздействия тех или иных причин.

В фокусе идеологии безопасности труда и в целях практической дееспособности корреляционных исследований влияния причин несчастных случаев на статистические показатели производственного травматизма рекомендуется введение их результатов в порядок обучения по охране труда посредством дополнения основного перечня вопросов первичного и повторного инструктажей на рабочем месте для работников хозяйства пути Куйбышевской железной дороги.

Кроме того, полученные расчетные данные имеют практическое значение в части формирования и (или) корректировки планов и программ, направленных на минимизацию уровня риска травмирования работников, занятых текущим содержанием и ремонтом пути, и повышение безопасности их труда.

### Библиографический список

1. Дементьева Ю. В. Выявление причин несчастных случаев на производстве в хозяйстве дистанции пути (на примере Куйбышевской железной дороги) / Ю. В. Дементьева, Б. А. Анфилофьев // Транспортное образование и наука : проблемы и перспективы : сб. материалов II Всерос. науч.-практич. конференции. – Самара ; Уфа : СамГУПС, 2013. – С. 114–117.
2. Дементьева Ю. В. Анализ влияния причин производственного травматизма на статистические показатели производственного травматизма / Ю. В. Дементьева, М. А. Гаранин, С. А. Вельмин // Единый Всерос. науч. вестник. – М. : Изд-во ВНС (Всерос. науч. содружество), 2016. – № 9. – С. 17–26.
3. Дементьева Ю. В. Совершенствование порядка обучения по охране труда на основе статистического анализа производственного травматизма / Ю. В. Дементьева, М. А. Гаранин, С. А. Вельмин // Наука и образование транспорту : сб. материалов XI Междунар. науч.-практич. конференции. – Самара : СамГУПС, 2016. – С. 117–119.
4. Дементьева Ю. В. Статистический анализ производственного травматизма, как механизм идентификации и управления профессиональными рисками / Ю. В. Дементьева, М. А. Гаранин // Инновации в системах обеспечения движения поездов : сб. материалов I Междунар. науч.-практич. конференции. – Самара : СамГУПС, 2016. – С. 120–123.
5. Стандарт ОАО «РЖД». СТО РЖД 15.001–2016. Система управления охраной труда в ОАО «РЖД». Общие положения. – Утв. распоряжением ОАО «РЖД» от 29.12.2016 г. № 2773р. – М. : ОАО «РЖД», 2016. – 49 с.
6. Терешин В. С. Охрана труда в путевом хозяйстве / В. С. Терешин, В. Б. Каменский. – М. : Транспорт, 1999. – 320 с.
7. Анализ состояния условий и охраны труда Куйбышевской железной дороги за период с 2004 по 2016 г. – Самара : Служба охраны труда и промышленной безопасности Куйбышевской железной дороги – Филиала ОАО «РЖД», 2016. – 52 с.
8. Анализ состояния условий и охраны труда хозяйства пути Куйбышевской железной дороги за период с 2004 по 2016 г. – Самара : Служба охраны труда и промышленной безопасности Куйбышевской железной дороги – Филиала ОАО «РЖД», 2016. – 28 с.
9. Дементьева Ю. В. Апостериорно-агрегированный анализ абсолютных и относительных показателей производственного травматизма / Ю. В. Дементьева // Инновационная наука (Уфа). – 2016. – № 2. – С. 64–67.
10. Сборник классификаторов задачи «Учет и анализ производственного травматизма в структурных подразделениях ОАО «РЖД». – М. : ОАО «РЖД», 2008. – 97 с.
11. Стандарт ОАО «РЖД». СТО РЖД 1.05.515.3–2009. Методы и инструменты улучшений. Диаграмма Исикавы. – Утв. распоряжением ОАО «РЖД» от 02.06.2009 г. № 1150р. – М. : ОАО «РЖД», 2009. – 18 с.
12. Стандарт ОАО «РЖД». СТО РЖД 1.05.515.4–2009. Методы и инструменты улучшений. Корреляционный анализ. – Утв. распоряжением ОАО «РЖД» от 02.06.2009 г. № 1150р. – М. : ОАО «РЖД», 2009. – 20 с.
13. Чернов Е. Д. Математико-статистические методы исследования причин производственного трав-

матизма / Е. Д. Чернов. – Новосибирск : НИИЖТ, 1979. – 40 с.

## References

1. Demytyeva Y.V. & Anfilofyev B.A. Vyyavleniye prychnyn neschastnykh sluchayev na proizvodstve v khozyajstve dystantsii puty (na prymere Kujbashevskoy zheleznoy dorogy) [Industrial accidents cause identification in maintenance section trackside (by the example of Kuybyshev railroad)]. *Transportnoye obrazovaniye i nauka: problemy i perspektivy: sbornyk materialov II Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Transport education and science: problems and perspectives: the IInd All-Russian research and practical conference]. Samara, Ufa, SamGUPS Publ., 2013, pp. 114–117. (In Russian)

2. Demetyeva Y.V., Garanyn M.A. & Velmyn S.A. Analiz vliyaniya prychnyn proizvodstvennogo travmatizma na statysticheskiye pokazately proizvodstvennogo travmatizma [The analysis of industrial injuries cause impact on industrial injuries' statistics]. *Yediniy Vserossiyskiy nauchniy vestnik* [Unified All-Russian academic bulletin]. Moscow, All-Russian scientific community Publ., 2016, no. 9, pp.17–26. (In Russian)

3. Demytyeva Y.V., Garanyn M.A. & Velmyn S.A. Sovershenstvovaniye poryadka obucheniya po okhrane truda na osnove statisticheskogo analiza proizvodstvennogo travmatizma [Modernization of a procedure for the instruction in labor protection based on statistical analysis of industrial injuries]. *Nauka i obrazovaniye transport: sbornyk materialov XI Mezhdunarodnoy prakticheskoy konferentsii* [Science and transport education: XI International scientific and practical conference collected papers]. Samara, SamGUPS Publ., 2016, pp. 117–119. (In Russian)

4. Demytyeva Y.V. & Garanyn M.A. Statysticheskiy analiz proizvodstvennogo travmatizma, kaka mekhanizm identifikatsii i upravleniya professionalnymi riskami [Statistical analysis of industrial injuries as a mechanism of occupational hazard identification and control]. *Innovatsii v sistemakh obespecheniya dvyzheniya poyezdov: sbornyk materialov I Mezhdunarodnoy nauchno-praktycheskoy konferentsii* [Innovations in propulsion systems of trains: the Ist International scientific and

*practical conference*]. Samara, SamGUPS Publ., 2016, pp. 120–123. (In Russian)

5. Standart OAO "RZhD". STO RZhD 15.001–2016. *Systema upravleniya okhranoy truda v OAO "RZhD"* [JSC "Russian Railways" standard. Russian Railways Company Standard 15.001–2016. JSC "Russian Railways" occupational safety and health management system]. General requirements, approved by JSC "Russian Railways" regulation dated 29.12.2016, no. 2773p. Moscow, JSC "Russian Railways" Publ., 2016, 49 p. (In Russian)

6. Tereshyn V.S. & Kamenskiy V.B. *Okhrana truda v putevom khozyajstve* [Health and safety protection on track]. Moscow, Transport Publ., 1999, 320 p. (In Russian)

7. Analiz sostoyaniya usloviy i okhrany truda Kujbashevskoy zheleznoy dorogy za period s 2004 po 2016 g. [The conditions and health and safety protection analysis at Kuybyshev railroad for the period of 2004 through 2016]. Samara, Occupational health and safety service at Kuybyshev railroad [JSC "Russian Railroads" subsidiary] Publ., 2016, 52 p. (In Russian)

8. Analiz sostoyaniya usloviy i okhrany truda khozyajstva puty Kujbashevskoy zheleznoy dorogy za period s 2004 po 2016 g. [The conditions and health and safety protection analysis of track at Kuybyshev railroad for the period of 2004 through 2016]. Samara, Occupational health and safety service at Kuybyshev railroad [JSC "Russian Railroads" subsidiary] Publ., 2016, 28 p. (In Russian)

9. Demytyeva Y.V. Aposteriorno-agregirovaniy analiz absolutnykh i odnosytnykh pokazateley proizvodstvennogo travmatizma [Posterior aggregative analysis of absolute and relative indices of industrial injuries]. *Innovative science*, 2016, no. 2, pp. 64–67. (In Russian)

10. *Sbornik klassifikatorov zadachi "Uchet i analiz proizvodstvennogo travmatizma v strukturnykh podrazdeleniyakh OAO "RZhD"* [Collected book of classifiers of a task "Record-keeping and analysis of industrial injuries in JSC "Russian Railways" subdivisions"]. Moscow, JSC "Russian Railways" Publ., 2008, 97 p. (In Russian)

11. Standart OAO "RZhD". STO RZhD 1.05.515.3–2009. *Metody i instrumenty uluchsheniya. Diagramma Isikavy* [JSC "Russian Railways" standard. Russian

*Railways Company Standard 1.05.515.3–2009. Methods and tools for improvement. Ishikawa's diagram*. Approved by JSC "Russian Railways" regulation dated 02.06.2009, no. 1150p. Moscow, JSC "Russian Railways" Publ., 2009, 18 p. (In Russian)

12. *Standart OAO "RZhD". STO RZhD 1.05.515.4–2009. Metody i instrumenty uluchsheniy. Korrelyatsionnyy analiz* [JSC "Russian Railways" standard. Russian Railways Company Standard 1.05.515.4–2009. Met-

*hods and tools for improvement. Correlation analysis*]. Approved by JSC "Russian Railways" regulation dated 02.06.2009, no. 1150p. Moscow, JSC "Russian Railways" Publ., 2009, 20 p. (In Russian)

13. Chernov Y. D. *Matematyko-statisticheskiye metody issledovaniya prychyn proizvodstvennogo travmatyzma* [Mathematico-statistical methods of studying the reasons for industrial injuries]. Novosibirsk, NII-ZhT Publ., 1979, 40 p. (In Russian)

ГАРАНИН Максим Алексеевич – канд. техн. наук, доцент, проректор по учебной работе, garanin@samgups.ru; \*ЗАВЬЯЛОВ Антон Михайлович – канд. техн. наук, доцент, zavant@gmail.com; \*ДЕМЕНТЬЕВА Юлия Васильевна – аспирант, ст. преподаватель, руководитель отдела охраны труда, yulia\_dementyeva@bk.ru (Самарский государственный университет путей сообщения).



УДК 519.2

**П. В. Герасименко, Е. А. Благовещенская, В. А. Ходаковский****МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ИЗУЧЕНИЯ  
УЧЕБНЫХ МНОГОСЕМЕСТРОВЫХ ДИСЦИПЛИН В ТЕХНИЧЕСКИХ ВУЗАХ**

Дата поступления: 24.04.2017

Решение о публикации: 10.05.2017

**Аннотация**

**Цель:** На примере изучения высшей математики предложена методика моделирования процесса оценки освоения учебных многосеместровых дисциплин в технических вузах. Актуальность цели обусловлена существенным отклонением существовавшей в России образовательной системы от ныне применяемой и в связи с введением ЕГЭ. **Методы:** Применены методы математической статистики. В основу построения математических моделей положены регрессионный анализ и статистические данные знаний студентов, которые определены путем мониторинга оценок экзаменов в течение четырехсеместрового изучения студентами математических дисциплин. **Результаты:** Получены показатели освоения математических дисциплин в зависимости от баллов ЕГЭ школьной математики. В выборку включались только те студенты, которые сдавали все экзамены по высшей математике и экзамен по экономико-математическим моделям. Из нее были исключены студенты, отчисленные за прогулы и за неуспеваемость по математике и другим дисциплинам, что вызвано целесообразностью проведения анализа знаний математических дисциплин у тех студентов, которые продолжают обучение и впоследствии смогут получить диплом о высшем образовании. **Практическая значимость:** Предлагаемые модели позволяют осуществлять прогнозирование результатов экзаменов учебных групп по специальным математическим дисциплинам. Показаны сложности и низкая результативность дополнительных занятий, направленных на устранение слабых знаний базовых школьных дисциплин. Для повышения качественной подготовки студентов в технических вузах требуются кардинально измененные формы доподготовки школьной математики.

**Ключевые слова:** Баллы ЕГЭ, оценка экзамена, частота, мониторинг, динамика успеваемости, регрессия, коэффициент детерминации.

\*Peter V. Gerasymenko, D. Eng. Sci., professor, pv39@mail.ru; Yekaterina A. Blagoveshenskaya, D. Phys. and Math. Sci., professor, head of a chair; Valentyn A. Khodakovskiy, D. Eng. Sci., professor, head of a chair (Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University) MATHEMATICAL SIMULATION OF STUDYING ACADEMIC MULTI-SEMESTRIAL DISCIPLINES IN TECHNICAL COLLEGES

**Summary**

**Objective:** Modeling technique of estimating process of grasping academic multi-semester disciplines in technical colleges was introduced, by the example of studying higher mathematics. Topicality of the objective is conditioned by significant deviation of the educational system applied in Russia in the past from the one that is used now, due to the introduction of the Unified State Examination (USE). **Methods:** The methods of mathematical statistics were applied. Mathematical models were based on the regression analysis and statistical data of students' academic performance, the latter was obtained by means of examination marks' monitoring during the four semesters of studying mathematical disciplines by students. **Results:** The indices of grasping mathematical disciplines were obtained, depending on the score of USE in school mathematics. Only those students who took all the exams in higher mathematics

and the exam in economic and mathematical models were included in the selection. The students, expelled for truancies and poor progress in mathematics and other disciplines, were not included in the selection, resulting in practicability of conducting the analysis of academic performance in mathematical disciplines of those students who were going to continue education and, subsequently, gain a diploma on higher education. **Practical importance:** The suggested models make it possible to forecast the examination results of groups in special in-depth mathematical disciplines. The difficulties and low efficiency of additional tasks, aimed at elimination of poor academic performance of basic school disciplines, was shown. In order to improve the quality of education in technical colleges it is necessary to introduce cardinally modified forms of additional training of school mathematics.

**Keywords:** USE score, examination mark, frequency, monitoring, progress dynamics, regression, coefficient of determination.

## Введение

Целью настоящей работы является построение методики моделирования результатов изучения многосеместровых дисциплин и прогнозирования результатов экзаменов математикоемких предметов. Актуальность ее обусловлена существенным отклонением советской образовательной системы от ныне существующей в связи с введением Болонского процесса [1, 2]. Сегодня существует очень сложный вопрос, который связан с определением уровня знаний студентов [3, 4]. Проблема возникает, потому что преподаватель это делает интуитивно [5], поскольку по тестам Единого государственного экзамена (ЕГЭ) качество знаний сложно определить. Иссле-

дования, которые проводились во многих университетах по оцениванию влияния ЕГЭ на результаты изучения студентами математических дисциплин, показывают, что после введения ЕГЭ уровень математической подготовки студентов существенно снизился [6–9], а следовательно, понизился уровень знания инженерных дисциплин в технических вузах.

В табл. 1 приведены частоты, а на рис. 1 – гистограмма баллов ЕГЭ по математике у студентов, поступивших в 2013 г. на экономический факультет Петербургского государственного университета путей сообщения [10].

Для построения методики осуществлялся мониторинг результатов экзаменов по высшей математике и математико-экономическим моделям одной учебной группы. Выборка сту-

ТАБЛИЦА 1. Распределения частот студентов от уровня баллов ЕГЭ

№ пп.	Баллы	Количество студентов	Частота	Частота, %
1	21–30	18	0,069	6,9
2	31–40	37	0,143	14,3
3	41–50	92	0,356	35,6
4	51–60	75	0,290	29,0
5	61–70	33	0,127	12,7
6	71–80	2	0,008	0,8
7	81–90	1	0,004	0,4
8	91–100	0	0	0
С у м м а		258	1	100

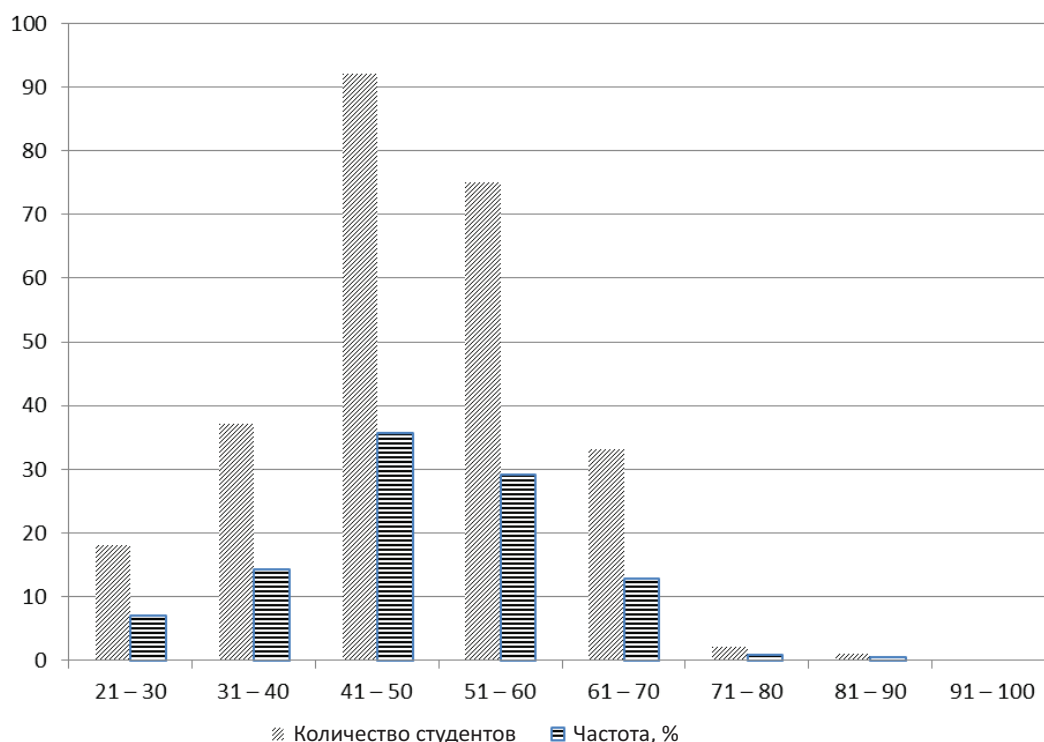


Рис. 1. Гистограмма распределения вероятностей баллов ЕГЭ по математике у поступивших, изучавших математику в период 2013–2016 гг.

дентов проводилась из числа поступивших в 2013 г., из которых 80% имели число баллов ЕГЭ менее 60.

Из анализа табл. 1 и гистограммы (рис. 1) можно сделать вывод, что знания по школьной математике (даже оцененные по упрощенным тестам, которыми являются тесты ЕГЭ) у подавляющего большинства поступивших в основном не превышают уровня «удовлетворительно» (число баллов менее 60) и их доля составляет 80%.

### Результаты мониторинга показателей изучения высшей математики и экономико-математических моделей

Из приведенных статистических данных следует, что на учебный процесс в вузе сильное влияние оказывает введение ЕГЭ. Известно, что учебный процесс в средней школе можно сравнить с конвейерным производством, которое не настроено на приобретение основ знаний и умений логически мыслить.

Этот факт подтверждается статистикой поступающих в вуз абитуриентов, поскольку система тестового экзамена по математике в школе, служащая основой контроля знаний учеников, включает ограниченный набор несложных заданий. Следовательно, школьник не настроен изучать то, что не будут оценивать, и изучает элементарные действия, такие, какие выполняют на конвейере.

Как отмечалось, цель настоящей работы – оценивание влияния знаний школьной математики на изучение математических дисциплин в вузе по выборке результатов экзаменов студентов в семестрах.

В выборку включались только те студенты, которые сдавали все экзамены по высшей математике и экзамен по экономико-математическим моделям. Из нее были исключены студенты, которые были отчислены за прогулы и за неуспеваемость по математике и другим дисциплинам. Это было вызвано целесообразностью проведения анализа знаний математических дисциплин у тех студентов, которые продолжают обучение и впо-

следствия могут получить диплом о высшем образовании.

В табл. 2 приведены интервалы баллов ЕГЭ и им эквивалентные оценки группы студентов, результаты которых подлежали мониторингу, а также количество студентов, у

которых число баллов соответствует конкретному интервалу. В таблице также указывается число студентов (в%).

В табл. 3 представлены результаты мониторинга, проведенного при изучении студентами высшей математики и экономико-

ТАБЛИЦА 2. Интервалы баллов ЕГЭ и соответствующие им оценки

Интервалы баллов	0–40	41–60	61–80	81–100
Оценка	2	3	4	5
Количество поступивших	10	14	2	0
Количество поступивших, %	38	54	8	0

ТАБЛИЦА 3. Результаты мониторинга

№ студента	ЕГЭ	Экзамены							
		ЛА 1 с. 2014 г.		МА 2 с. 2015 г.		ТВиМС 3 с. 2015 г.		ЭММ 4 с. 2016 г.	
		1Эк	2Эк	1Эк	2Эк	1Эк	2Эк	1Эк	2Эк
1–3	28	3		2	3	3		2	3
		3		3		3		3	
		2	3	3		5		2	3
4–5	32	4		3		3		2	2
		3		2	3	2	3	3	
		2	3	2	2	2	3	2	2
6–8	36	2	3	3		2	3	3	
		3		2	3	2	3	2	3
		3		3		3		2	3
9–11	40	2	3	3		2	3	2	3
		2	3	3		2	3	3	
		4		2	3	3		2	3
12–14	43	2	3	2	3	3		2	3
		2	3	2	3	2	3	2	3
		2	3	2	3	2	3	2	3
15–17	49	4		3		2	3	2	3
		2	3	2	3	2	3	2	3
		4		2	3	2	3	3	
18–21	54	2	3	2	3	2	3	2	2
		4		4		3		4	
		3		2	3	3		3	
		2	3	2	3	2	3	2	2
22–25	64	2	3	2	3	2	3	2	2
		4		3		3		3	
		4		3		5		2	3
		5		4		3		5	

математических моделей, а в табл. 4 – обобщенные. Мониторинг осуществлялся в ПГУПС с 2013 по 2016 г. Были приняты следующие обозначения экзаменов:

ЛА 1 с. – в первом семестре по линейной алгебре;

МА 2 с. – во втором семестре по математическому анализу;

ТВ и МС 3 с. – в третьем семестре по теории вероятности и математической статистике;

ЭММ 4 с. – в четвертом семестре по экономико-математическим моделям;

1Эк – плановый; 2Эк – окончательный повторный (число их не учитывалось).

#### **Анализ динамики изменения успеваемости по математическим дисциплинам студентов экономических специальностей ПГУПС**

Данные мониторинга даны в табл. 5. Они сгруппированы по баллам ЕГЭ и ранжирова-

ны в порядке их возрастания. В каждой группе для каждого результата освоения четырех дисциплин в четырех последовательных семестрах учебного плана подсчитаны средние баллы.

На рис. 2, а эти средние баллы приведены в виде маркированных точек. На рис. 2, б представлена динамика среднего балла экзамена по семестрам при разных ЕГЭ. Полученные точки использовались для оценки линейной регрессии результатов освоения дисциплин по семестрам учебного плана. Линии регрессии построены для четырех групп студентов, которые сформированы по числу баллов ЕГЭ.

Анализ рис. 2, а показывает, что поступившие абитуриенты, имевшие по ЕГЭ более 54 баллов по математике, получают в среднем оценку «хорошо» по разделам «Линейная алгебра» и «Математический анализ» (1-й и 2-й семестры), однако разделы «Теория вероятностей и математическая статистика» и «Экономико-математические модели» осваиваются хуже со средней оценкой «удовлетво-

ТАБЛИЦА 4. Обобщенные результаты мониторинга

№ пп.	Количество оценок	Экзамены							
		ЛА 1 с. 2014 г.		МА 2 с. 2015 г.		ТВ и МС 3 с. 2015 г.		ЭММ 4 с. 2016 г.	
		1Эк	2Эк	1Эк	2Эк	1Эк	2Эк	1Эк	2Эк
1	Неудовлетворительных	12	–	12	–	14	–	17	5
2	Удовлетворительных	6	18	12	24	10	24	7	19
3	Хороших	7	7	2	2	–	–	1	1
4	Отличных	1	1	–	–	2	2	1	1
5	Средний балл	2,88	3,34	2,61	3,07	2,61	3,15	2,19	2,92

ТАБЛИЦА 5. Средние оценки первых и повторных экзаменов по семестрам

№ студента	ЕГЭ	Экзамены							
		ЛА 1 с. 2014 г.		МА 2 с. 2015 г.		ТВ и МС 3 с. 2015 г.		ЭММ 4 с. 2016 г.	
		1Эк	2Эк	1Эк	2Эк	1Эк	2Эк	1Эк	2Эк
1–5	30	2,83	3,16	2,5	2,83	3	3,33	2,33	2,66
6–17	42	2,66	3,25	2,41	3	2,16	3	2,33	3
18–21	54	2,75	3,25	2,5	3,25	2,5	3	2,75	2,75
22–25	64	3,75	4	3	3,25	3,25	3,5	3	3,25

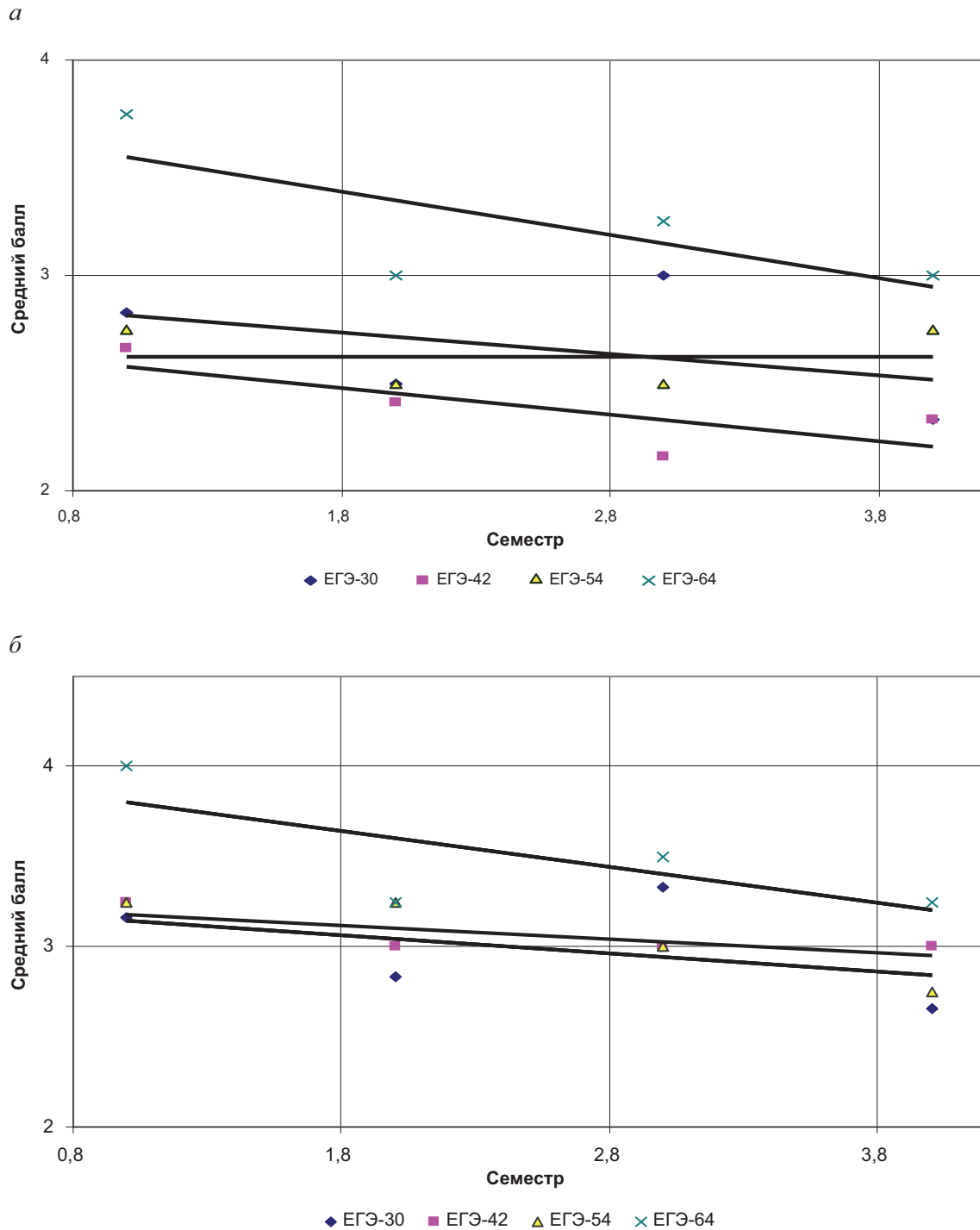


Рис. 2. Динамика среднего балла первого (*a*) и повторных (*б*) экзаменов по семестрам при разных ЕГЭ

рительно». Студенты с числом баллов ЕГЭ от 30 до 54 показывают устойчиво удовлетворительные результаты по разделам высшей математики. Студентам с числом баллов ЕГЭ

ниже 30 явно не хватает базовых знаний, и они в среднем оказываются не способны освоить дисциплину «Экономико-математические модели».

### **Сравнительный анализ динамики изменения успеваемости по математическим дисциплинам студентов набора 2010 и 2013 гг.**

В 2010 г. на кафедре «Математика и моделирование» ПГУПС был проведен учебный эксперимент, для чего были разработаны учебные пособия и контрольные тесты, направленные на проведение дополнительных занятий по элементарной математике в первом семестре [11–14]. Все дополнительные занятия проводились параллельно с изучением высшей математики четвертыми парами в течение первых двух месяцев первого семестра. В этот период по высшей математике изучались темы линейной алгебры, которые относительно в меньшей степени зависят от элементарной математики по сравнению с математическим анализом. Занятия планировались исходя из объема 18–20 ч учебного времени. Все занятия проводили преподаватели и профессора, ведущие практические занятия в учебных группах.

На первом практическом занятии проводилось тестирование остаточных знаний школьной математики. В число тестов включалось 20 задач, решение которых выявляло уровни знаний студентов по всем основным темам элементарной математики. На основании анализа первичного тестирования преподавателями определялись уровни остаточных знаний школьной математики. Такой анализ позволил им применить индивидуально-ориентированную технологию по повторению основных тем, а для некоторых студентов и их изучение. Заключительное занятие отводилось на повторное тестирование с усложнением отдельных задач. Анализ повторного тестирования дает возможность продолжать работу со слабо подготовленными студентами, а также в течение семестра постоянно обращать внимание на связь пройденного материала по элементарной математике с теми или иными положениями высшей математики. На основании проведенного эксперимента установлено, что студенты получали хорошие и отличные

оценки по элементарной математике. Такие студенты способны осваивать 100% нового материала по математическим дисциплинам в вузе. Студенты с низким уровнем знаний математики, проверенной при предыдущем испытании, способны освоить не выше 40% от предлагаемого объема материала.

### **Заключение**

Из анализа результатов проведенных занятий по элементарной математике и математических дисциплин вуза, обработки их алгоритма [15] можно прийти к выводу, что проведенные дополнительные занятия не могут компенсировать потери обучения в школе, когда выпускной контроль осуществляется с помощью ЕГЭ. Следовательно, невозможно обеспечить качественное изучение математических дисциплин в вузе и решить задачу качественного изучения математикоемких специальных дисциплин.

### **Библиографический список**

1. Болонский процесс. Европейские и национальные структуры квалификаций (Книга-приложение 2) / под науч. ред. проф. В.И. Байденко. – М. : Исслед. центр проблем качества подготовки специалистов, 2009. – 220 с.
2. Николаев Д. Россия в Болонском процессе / Д. Николаев, Д. Сулова // Вопросы образования. – 2010. – № 1. – С. 1–17.
3. Баранников А.В. Компетентностный подход и качество образования / А.В. Баранников. – М. : Моск. центр качества образования, 2008. – 144 с.
4. Коротков Э.М. Управление качеством образования : учеб. пособие для вузов / Э.М. Коротков. – М. : Мир, 2006. – 278 с.
5. Мартишина Н.И. Базовый уровень знаний как объект нормирования в системе образования / Н.И. Мартишина // Высшее образование в России. – 2015. – № 3. – С. 98–104.
6. Герасименко П.В. Исследование динамики изменения успеваемости по математическим дис-

циплинам студентов экономических специальностей ПГУПС / П. В. Герасименко, Р. С. Кударов // Изв. Петерб. ун-та путей сообщения. – СПб. : ПГУПС, 2013. – Вып. 1 (34). – С. 215–221.

7. Герасименко П. В. Основные причины снижения качества инженерного образования / П. В. Герасименко // Сб. докл. участников XVII Академ. чтений Междунар. академии наук высшей школы «Инженерное образование в России и государствах – участников СНГ: проблемы и перспективы решения». Звенигород Московской обл. 21–23 сентября 2011 г. – Звенигород, 2011. – С. 27–32.

8. Герасименко П. В. О негативном влиянии результатов ЕГЭ по математике на подготовку специалистов в вузе и пути их устранения / П. В. Герасименко // Проблемы математической и естественнонаучной подготовки в инженерном образовании : тез. докл. 2-й Междунар. науч.-метод. конференции. – СПб. : ПГУПС, 2012. – С. 172–173.

9. Герасименко П. В. Результаты ЕГЭ по математике и успеваемость: цели, статистика, анализ, предложения / П. В. Герасименко, В. А. Ходаковский // Проблемы математической и естественнонаучной подготовки в инженерном образовании. Исторический опыт, современные вызовы : сб. тр. Междунар. науч.-метод. конференции, 11–12 ноября 2010 г. / под общ. ред. В. А. Ходаковского. – СПб. : ПГУПС, 2011. – С. 38–51.

10. Герасименко П. В. О совершенствовании учебных программ экономико-математических дисциплин / П. В. Герасименко // Университетское образование: опыт, проблемы, перспективы развития : тез. докл. VII Междунар. конгресса : в 2 ч. – Минск, 2013. – С. 118–119.

11. Герасименко П. В. О целесообразности разрешения в вузе сформировавшегося на современном этапе противоречия методик преподавания элементарной и высшей математик / П. В. Герасименко // Совершенствование математического образования в общеобразовательных школах, начальных средних и высших профессиональных учебных заведениях : Материалы VI Междунар. науч.-метод. конференции, 29–30 сентября 2010 г. – Тирасполь : ПФ «Литера», 2010. – С. 26–31.

12. Герасименко П. В. О возможности дообучения школьной математике студентов первого курса / П. В. Герасименко // Математика в вузе : тр.

XXII Междунар. науч.-метод. конференции. – СПб. : ПГУПС, 2010. – С. 38–42.

13. Герасименко П. В. О необходимости введения в вузе для студентов первого курса индивидуально ориентированной подготовки по элементарной математике / П. В. Герасименко // Материалы Междунар. науч. конференции «Образование, наука и экономика в вузах. Интеграция в международное образовательное пространство». – г. Плоцк, Польша. – Plock, Poland, 2010. – С. 74–80.

14. Герасименко П. В. Об одном подходе к оценке качества успеваемости учебных групп студентов / П. В. Герасименко // Учен. зап. Междунар. банковск. ин-та (СПб.). – 2013. – № 6. – С. 179–186.

15. Герасименко П. В. Алгоритм и программа построения корреляционной матрицы оценок по многосеместровым дисциплинам / П. В. Герасименко, В. А. Ходаковский // Проблемы математической и естественнонаучной подготовки в инженерном образовании // Сб. тр. Междунар. науч.-метод. конференции – СПб. : ПГУПС, 2014. – С. 84–88.

## References

1. *Bolonskiy protsess. Yevropeyskiye i natsionalniye struktury kvalifikatsiy [Bologna process. European and National Qualification Networks]* (Kniga-prylozheniye 2 [Book-application 2]). Ed. by V.I. Baydenko. Moscow, Research center of specialist training quality control Publ., 2009, 220 p. (In Russian)
2. Nikolayev D. & Suslova D. *Rossiya v Bolonskom protsesse. Voprosy obrazovaniya [Russia in Bologna process. Issues of education]*, 2010, no. 1, pp. 1–17. (In Russian)
3. Barannykov A. V. *Kompetentnostniy podkhod i kachestvo obrazovaniya [Competency-based approach and quality of education]*. Moscow, Moscow center of quality of education Publ., 2008, 144 p. (In Russian)
4. Korotkov E. M. *Upravleniye kachestvom obrazovaniya [Quality of education control]*. Moscow, Mir Publ., 2006, 278 p. (In Russian)
5. Martyshyna N. I. *Bazoviy uroven znaniy kak obyekt normirovaniya v systeme obrazovaniya [Basic level of academic performance as the subject of rate setting]. Vyssheye obrazovaniye v Rossii [Higher education in Russia]*, 2015, no. 3, pp. 98–104. (In Russian)



6. Gerasymenko P. V. & Kudarov R. S. Issledovaniye dynamiky izmeneniya uspevayemosti po matematycheskym distsyplynam studentov ekonomycheskykh spetsialnostey PGUPS [The study of academic performance time history in mathematical disciplines of students studying at PGUPS economical departments]. *Proceedings of Transport University*, 2013, issue 1 (34), pp. 215–221. (In Russian)

7. Gerasymenko P. V. Osnovniye prychiny snyzheniya kachestva inzhenerogo obrazovaniya [The main reasons for quality deviation of engineering education]. *Sbornyk dokladov uchastnykov XVII Akademicheskikh chteniy Mezhdunarodnoy akademii nauk vysshey shkoly "Inzhenernoye obrazovaniye v Rossii i gosudarstvakh – uchastnykov SNG: problem i perspektivy resheniya"* [Book of reports of the 17<sup>th</sup> Academic readings of the participants of the International Higher Education Academy of Sciences "Engineering education in Russia and member states of the CIS: challenges and perspectives"]. Zvenigorod, 2011, pp. 27–32. (In Russian)

8. Gerasymenko P. V. O negatyvnom vliyaniy rezultatov YGE po matematyke na podgotovku spetsialystov v vuze I puty ikh ustraneniya. Problemy matematycheskoy i yestestvenno-nauchnoy podgotovki v inzhenernom obrazovanii [On the negative influence of the USE in mathematics results on training of specialists in college and the ways of its elimination. The problems of mathematical and scientific training in engineering education]. *Tezisy dokladov 2-oy Mezhdunarodnoy nauchno-metodycheskoy konferentsii* [The 2<sup>nd</sup> International research and methodological conference abstracts]. Saint Petersburg, PGUPS Publ., 2012, pp. 172–173. (In Russian)

9. Gerasymenko P. V. & Khodakovskiy V. A. Rezultaty YGE po matematyke i uspevayemost: tsely, statystyka, analiz, predlozheniya. Problemy matematycheskoy i yestestvenno-nauchnoy podgotovki v inzhenernom obrazovanii. Istorycheskiy opyt, sovremenniye vyzovy [USE in mathematics results and academic performance: objectives, statistics, analysis, suggestions. The problems of mathematical and scientific training in engineering education. Historical experience, modern challenges]. *Sbornyk trudov Mezhdunarodnoy nauchno-metodycheskoy konferentsii* [Collected papers of the International research and methodological conference], November 11–12<sup>th</sup> 2010.

Saint Petersburg, PGUPS Publ., 2011, pp. 38–51. (In Russian)

10. Gerasymenko P. V. O sovershenstvovanii uchebnykh program ekonomiko-matematycheskykh distsiplin [On education programs refinement of economical and mathematical disciplines]. *Universytetskoye obrazovaniye: opyt, problem, perspektivy razvitiya* [University education" experience, problems, development prospects]. *Tezisy dokladov VII Mezhdunarodnogo kongressa v 2 ch.* [The 7<sup>th</sup> International congress abstracts in 2 parts]. Minsk, 2013, pp. 118–119. (In Russian)

11. Gerasymenko P. V. O tselesoobraznosti razresheniya v vuze sformirovavshegosya na sovremenom etape prtyvorechiya metodyk prepodavaniya elementarnoy i vysshey matematyk [On worth whiling of permission in higher educational institution on present stage contradiction of methodic teaching elementary and higher mathematics]. *Sovershenstvovaniye matematycheskogo obrazovaniya v obsheobrazovatelnykh shkolakh, nachalnykh, srednykh i vysshykh professionalnykh uchebnykh zavedeniyakh* [On advisability of conflict resolution of elementary and advanced mathematics teaching methods, formed at the present stage. The refinement of mathematical education in secondary general schools, colleges and higher education institutions]. *Materialy VI Mezhdunarodnoy nauchno-metodycheskoy konferentsii, 29–30 sentyabrya 2010 g.* [Proceedings of the 6<sup>th</sup> International research and methodological conference, September 29–30 2010]. Tiraspol, PF "Litera" Publ., 2010, pp. 26–31. (In Russian)

12. Gerasymenko P. V. O vozmozhnosti doobucheniya shkolnoy matematyke studentov pervogo kursa. *Matematyka v vuze* [On the possibility of additional training in school mathematics of the first year students]. *Trudy XXII Mezhdunarodnoy nauchno-metodycheskoy konferentsii* [Proceedings of the 22<sup>nd</sup> International research and methodological conference]. Saint Petersburg, PGUPS Publ., 2010, pp. 38–42. (In Russian)

13. Gerasymenko P. V. O neobkhodymosti vvedeniya v vuze dlya studentov pervogo kursa individualno-oriyentirovannoy podgotovki po elementarnoy matematyke [On the necessity of introducing individually oriented training in elementary mathematics for the first year students]. *Mezhdunarodnaya nauchnaya*

*konferentsiya "Obrazovaniye, nauka i ekonomika v vuzakh. Integratsiya v mezhdunarodnoye obrazovatelnoye prostranstvo" [Conference "Education, science and economics in colleges. Integration into international educational system"]*. Poland, Plock, 2010, pp. 74–80. (In Russian)

14. Gerasymenko P. V. Ob odnom podkhode k otsenke kachestva uspevayemosti uchebnykh grupp studentov [On an approach to quality assessment of academic performance of students' learning circles]. *Ucheniye zapyski Mezhdunarodnogo bankovskogo instituta [Proceedings of International banking institute]*. Saint Petersburg, MBI – International bank-

ing institute Publ., 2013, no. 6, pp. 179–186. (In Russian)

15. Gerasymenko P. V. & Khodakovskiy V. A. Algoritm i programma postroyeniya korrelyatsionnoy matritsy otsenok po mnogosemestrovym distsiplinam [Construction program and algorithm complete correlation matrix of multi-semester disciplines' grades]. *Problemy matematicheskoy i yestestvenno-nauchnoy podgotovki v inzhenernom obrazovanii [The problems of mathematical and scientific training in engineering education. Collected papers of The International research and methodological conference]*. Saint Petersburg, PGUPS Publ., 2014, pp. 84–88. (In Russian)

\*ГЕРАСИМЕНКО Петр Васильевич – доктор техн. наук, профессор, pv39@mail.ru; БЛАГОВЕЩЕНСКАЯ Екатерина Анатольевна – доктор физ.-мат. наук, профессор, заведующая кафедрой; ХОДАКОВСКИЙ Валентин Аветикович – доктор техн. наук, профессор, заведующий кафедрой (Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I).

УДК 694

**В. Н. Глухих, С. Е. Кирютина, А. С. Богданова****ВЛИЯНИЕ НАЧАЛЬНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В ДРЕВЕСИНЕ НА ПРОЧНОСТЬ И ФОРМОУСТОЙЧИВОСТЬ ДЕРЕВЯННЫХ КОНСТРУКЦИЙ**

Дата поступления: 13.04.2017

Решение о публикации: 10.05.2017

**Аннотация**

**Цель:** Разработка объективного метода определения начальных напряжений в лесоматериалах для прогнозирования качества конструкционных материалов в процессе их производства. Проведение теоретических исследований для выявления взаимосвязи природных физико-механических свойств древесины – начальных напряжений, сформированных в период роста дерева – и качественных характеристик строительных конструкционных элементов и изделий в результате производственной переработки. **Методы:** Применялись численные методы для обработки исходных данных, полученных методом системного анализа. **Результаты:** Используя найденные функции изгибающих моментов по пласти и кромке доски от выходящих на торце начальных напряжений, можно проанализировать изменение формы конструкционных пиломатериалов и напряженно-деформированное состояние изготавливаемых из них строительных деревянных конструкций. **Практическая значимость:** Выполненные исследования позволяют сделать вывод, что по размеру ядровой зоны сечения лесоматериала можно определить не только величину начальных напряжений в древесине, но и соотношение пределов прочности древесины при статическом изгибе и сжатии вдоль волокон.

**Ключевые слова:** Деревянные конструкции, предел прочности древесины, сжатие вдоль волокон, напряженно-деформированное состояние.

**Vladimir N. Glukhikh**, D. Eng. Sci., professor, svetlana\_sodr@mail.ru; **\*Svetlana Y. Kyryutyna**, post-graduate student, sekir@lan.spbgasu.ru; **Alena A. Bogdanova**, undergraduate, svetlana\_sodr@mail.ru (Saint Petersburg State University of architecture and civil engineering) THE INFLUENCE OF PRIMARY STRESS IN WOOD ON STIFFNESS AND SHAPE RETENTION OF TIMBER CONSTRUCTIONS

**Summary**

**Objective:** To develop an objective method for determining primary stresses in wood products for the purpose of predicting the quality of structural materials in the process of their production. To conduct theoretical research in order to detect wood coupling properties, that is primary stresses, formed in the period of tree growth, as well as quality characteristics of structural elements and items obtained as a result of milling. **Methods:** Numerical methods were applied for initial data handling, obtained by means of systems analysis method. **Results:** By using the obtained functions of bending moments on the sawn wood face and board edge from primary stresses' output at the grain end, the change of shape of structural lumber as well as the deflected mode of building timber constructions made from it may be analyzed. **Practical importance:** The conducted research made it possible to conclude that by means of the heartwood section zone size not only the magnitude of primary stress in timber, but also the correlation of ultimate static bending strength of wood and compression parallel to grain may be determined.

**Keywords:** timber constructions, ultimate strength of wood, compression parallel to grain, deflected mode.

Специфические особенности древесины делают ее наиболее пригодным материалом для использования в строительстве по стандартам «Зеленое строительство», которые формируют требования к процессам с точки зрения возможности обеспечения устойчивости среды обитания человека. К таким требованиям относятся сокращение потребления энергетических ресурсов, использование нетрадиционных, возобновляемых и вторичных энергетических ресурсов, рациональное водопользование, снижение вредных воздействий на окружающую среду в процессе строительства и эксплуатации зданий.

Обеспечение вышеперечисленных условий связано в том числе с высокими требованиями к качеству деревянных конструкций в домостроении. Это возможно только в случае понимания древесины как природного композиционного материала с особенными физико-механическими свойствами в соответствующих структурных направлениях, обеспечивающими сохранение жизнестойкости деревьев в процессе их роста с учетом внешних воздействий, к которым можно отнести ветровой напор и собственный вес ствола дерева, кроны и атмосферных осадков. Древесина в процессе роста дерева является «реагирующим» материалом, отвечающим на внешние воздействия изменением своей структуры, плотности, прочности, жесткости. В наиболее напряженные части ствола возрастает приток питательных веществ, что приводит к увеличению толщины стенок клеток и повышению их сопротивления растяжению и сжатию в соответствующих направлениях [1–3]. Внешние воздействия влияют на формирование напряженно-деформированного состояния (НДС) дерева в процессе его роста.

Согласно бионическому принципу траекторного строения [4, 5], наиболее прочные волокна древесины размещаются в соответствии с геометрией поля перемещений. Наиболее прочные волокна ориентированы по направлению главных напряжений, которые зависят, в свою очередь, от внешних воздействий [6–9].

При росте деревьев в периферийной зоне ствола в продольном направлении формируются напряжения растяжения, в центральной зоне – напряжения сжатия. У многих пород эти зоны отличаются по цвету: сжатая зона (ядровая) имеет более темный цвет по сравнению с растянутой (заболонной).

НДС в процессе роста дерева оказывает влияние на качество и прочность пиломатериалов, получаемых при последующей распиловке круглых сортиментов. В пиломатериалах сохраняется соответствующее НДС, способствующее появлению в них изменения формы – различного вида поперечной и продольной покоробленности [10, 11], являющейся основной причиной понижения их сортности и перехода в технический брак.

По разным оценкам от 25 до 40% пиломатериалов в процессе их производства из-за покоробленности понижают свою сортность. Следует отметить, что из-за начальных напряжений в деталях и заготовках происходит уменьшение несущей способности деревянных конструкций.

Принимая в первом приближении форму ствола дерева в виде правильного конуса для наиболее распространенных размеров ядра и заболони, можно представить изменение начального напряжения в стволе по закону параболоида 4-й степени (рис. 1):

$$\sigma_{\text{н}} = \frac{\sigma_R - \sigma_0}{R^4} (y^2 + z^2)^2 + \sigma_0, \quad (1)$$

где  $\sigma_R, \sigma_0$  – начальные напряжения в точках на контуре сечения и в его центре соответственно, МПа;  $R$  – радиус сечения ствола, мм.

Размер ядровой зоны можно найти из (1), приравняв к нулю начальные напряжения в точках на границе ядра и заболони (рис. 2):

$$R_0 = 0,766R.$$

Суммарное напряжение в волокнах дерева с учетом ветровой нагрузки составляет

$$\sigma = \frac{\sigma_R - \sigma_0}{R^4} r^4 + \sigma_0 - \frac{2\sigma_0}{R} z, \quad (2)$$

где  $\sigma_R = -2\sigma_0$ .

Тогда в плоскости ветрового напора из (2) получим (рис. 2)

$$1) z = 0; \sigma = \sigma_0;$$

$$2) z = -R; \sigma = 0;$$

$$3) z = R; \sigma = -4\sigma_0.$$

Исследование функции суммарного напряжения (2) на экстремум показывает, что максимальное напряжение в сжатой зоне численно равно

$$\sigma_{\max} = 1,826\sigma_0.$$

Соотношение максимального напряжения растяжения и сжатия составляет

$$n = \frac{4}{1,826} = 2,2.$$

Учитывая характер изменения напряжений в зонах растяжения и сжатия, можно предположить, что отношение пределов прочности при статическом изгибе и сжатии вдоль волокон у древесины с относительным размером

ядровой зоны  $R_0 = 0,766R$  составляет 2,2, что согласуется с имеющимися в литературе [12] экспериментальными данными для большин-

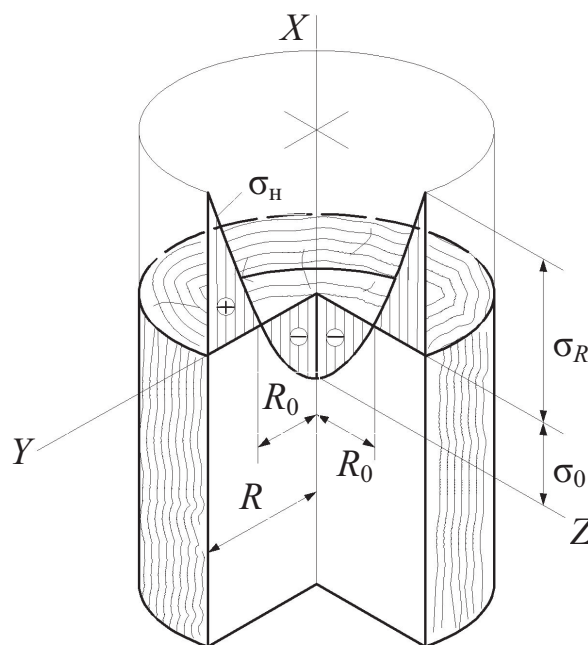


Рис. 1. Распределение начальных напряжений по сечению ствола дерева

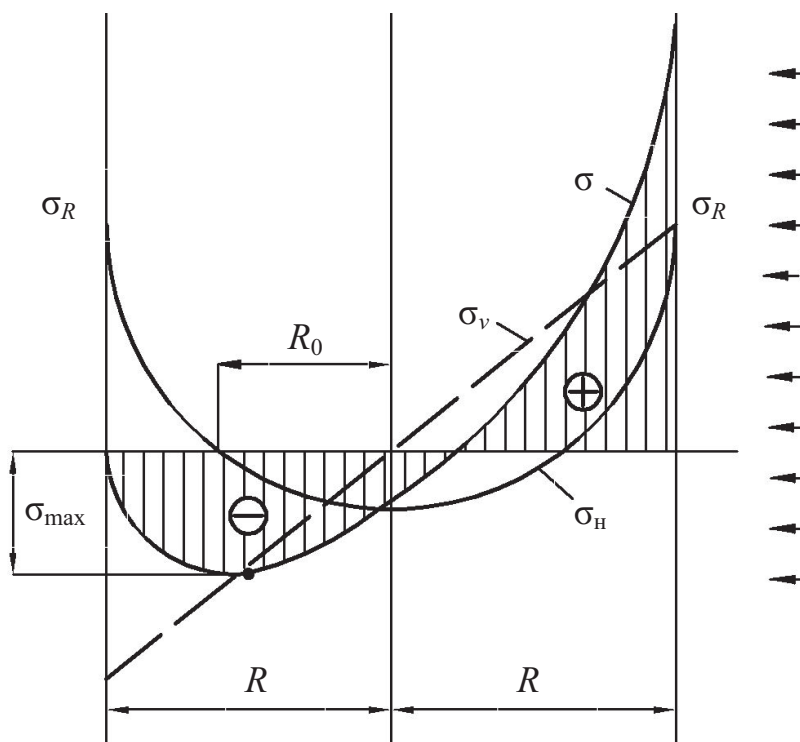


Рис. 2. Схема распределения начальных, от ветровой нагрузки, суммарного напряжений в плоскости действия ветровой нагрузки (предположение авторов)

ства известных пород деревьев в России, Европе, Северной и Южной Америке, Азии.

В таблице приведены экспериментальные и расчетные данные для североамериканских

Значения пределов прочности при сжатии вдоль волокон и при статическом изгибе для различных пород древесины при влажности выше 30%

Порода	Предел прочности, МПа		Отношение пределов прочности при статическом изгибе и сжатии вдоль волокон
	Сжатие вдоль волокон	Статический изгиб	
Сосна обыкновенная	21,2	49,5	2,335
Сосна кедровая	18,5	42,3	2,286
Орех грецкий	23,8	60,7	2,55
Осина	19,2	45,4	2,36
Пихта белая	19,4	44,7	2,30
Пихта белокорая	18,4	45,2	2,45
Пихта кавказская	19,9	48,4	2,43
Пихта сибирская	17,5	40,4	2,31
Пихта цельнолистная	16,6	42,0	2,53
Тополь	17,8	40,3	2,26
Ясень маньчжурский	29,3	67,2	2,29
Ясень обыкновенный	32,5	74,3	2,28
Ясень остроплодный	40,2	88,8	2,21
Ясень пенсильванский	33,3	71,6	2,15
Акация белая	41,6	97,5	2,34
Береза бородавчатая	22,4	59,7	2,66
Береза даурская	21,0	66,2	3,15
Береза железная	37,3	82,7	2,217
Береза ребристая	25,6	66,9	2,61
Бук	25,9	64,6	2,49
Вяз	25,2	59,1	2,34
Граб	26,5	73,3	2,76
Груша	26,7	63,4	2,37
Дуб араксинский	29,7	56,2	1,89
Дуб восточный	28,7	54,4	1,89
Дуб грузинский	30,9	58,8	1,90
Дуб каштановый	33,9	82,9	2,44
Дуб черешчатый	31,3	67,8	2,18
Ель	19,6	43,9	2,24
Ива	16,8	41,6	2,47
Клен	28,2	77,7	2,75
Липа	24,2	54,2	2,24
Лиственник	25,3	61,7	2,44
Ольха	23,6	49,4	2,09

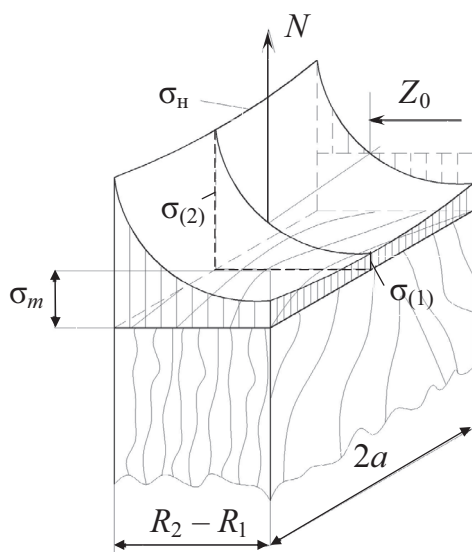


Рис. 3. Распределение начальных напряжений вдоль волокон доски до выпилки ее из бревна

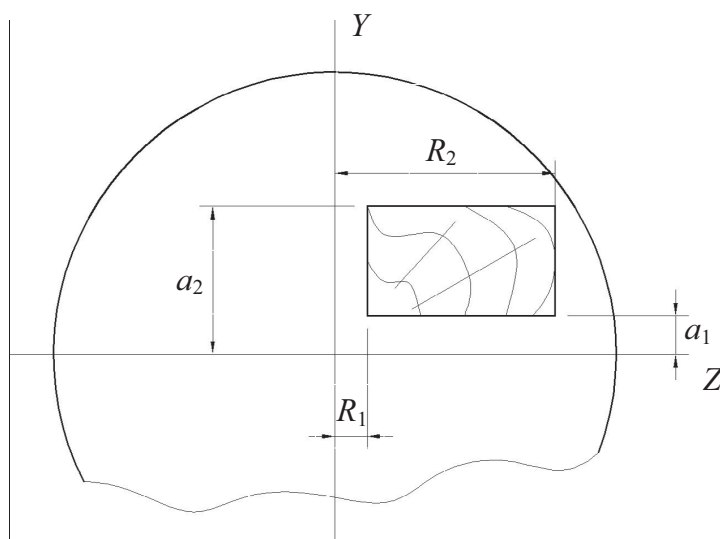


Рис. 4. Схема расположения доски в бревне

пород деревьев, подтверждающие полученные нами выводы.

Из них следует, что, рассматривая ствол дерева как равнопрочный стержень при изгибе ветровой нагрузкой [12, 13], можно прийти к выводу, что прочность древесины при сжатии вдоль волокон несколько возрастает к вершине. Об этом свидетельствует и уменьшение относительного размера ядровой зоны в данном направлении.

Отсутствие объективного метода определения начальных напряжений в стволах деревьев значительно затрудняло и делало практически невозможным прогнозирование качества конструкционных материалов в процессе их производства. Связь размера ядровой зоны с начальными напряжениями – это серьезное препятствие, которое можно устранить, поскольку современные компьютерные технологии дают возможность отсканировать сортимент перед распиловкой, в том числе и для того, чтобы измерить размер ядровой зоны и составить индивидуальную схему раскроя каждого сортимента.

Принятая функция распределения начального напряжения по объему ствола с учетом размера ядровой зоны позволяет вычислить

не только начальные напряжения, но и изгибающие моменты, вызывающие в пиломатериалах (рис. 3) деформации изгиба по пласти и кромке.

С этой целью необходимо решить следующие интегралы для определения изгибающих моментов по пласти [10]:

$$M_{y0} = \int_{a_1}^{a_2} dy \int_{R_1}^{R_2} (\sigma_n - \sigma_m) z dz, \quad (3)$$

по кромке доски:

$$M_{z0} = \int_{R_1}^{R_2} dz \int_{a_1}^{a_2} (\sigma_n - \sigma_m) y dy, \quad (4)$$

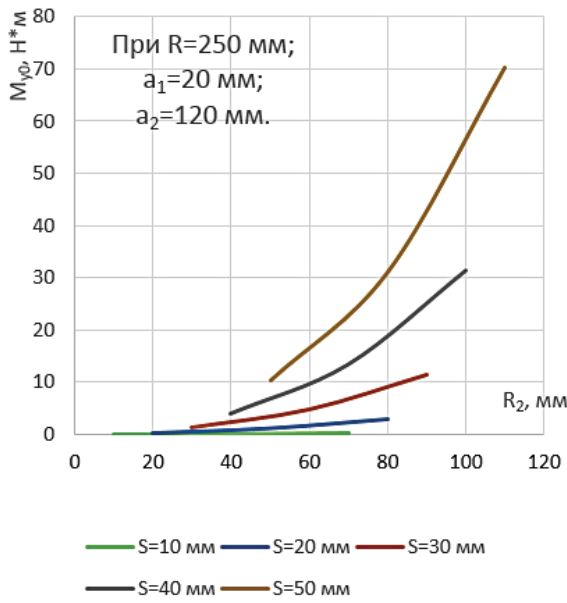
где  $\sigma_m$  – средняя величина начального напряжения в исследуемом прямоугольном сортименте (рис. 4), определяемая решением

$$\sigma_m = \frac{N}{(a_2 - a_1)(R_2 - R_1)}, \quad (5)$$

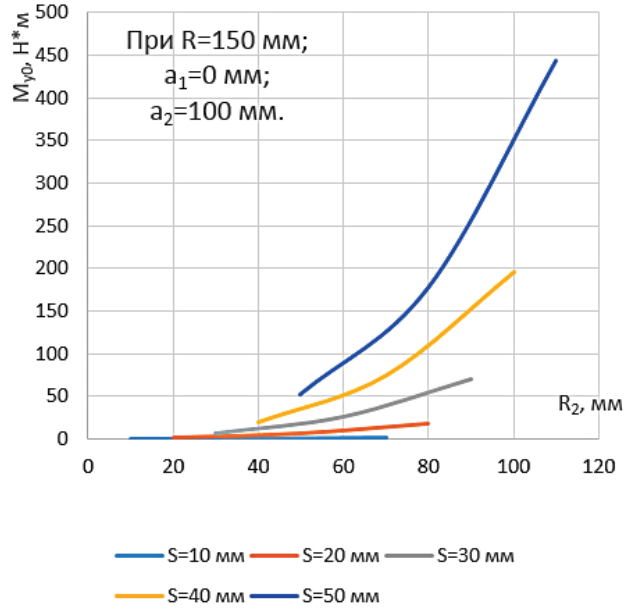
в котором  $N$  – равнодействующая внутренняя сила на торце выпиливаемой доски от выходящих на этот торец начальных напряжений:

$$N = \int_{a_1}^{a_2} dy \times \int_{R_1}^{R_2} [k_4(y^2 + z^2)^2 - b_0] dz = (a_2 - a_1)(R_2 - R_1) \times \left[ \frac{k_4}{5}(a_2^4 + a_2^3 a_1 + a_2^2 a_1^2 + a_2 a_1^3 + a_1^4) + \frac{2k_4}{9}(a_2^2 + a_2 a_1 + a_1^2)(R_2^2 + R_2 R_1 + R_1^2) + \frac{k_4}{5}(R_2^4 + R_2^3 R_1 + R_2^2 R_1^2 + R_2 R_1^3 + R_1^4) - b_0 \right], \quad (6)$$

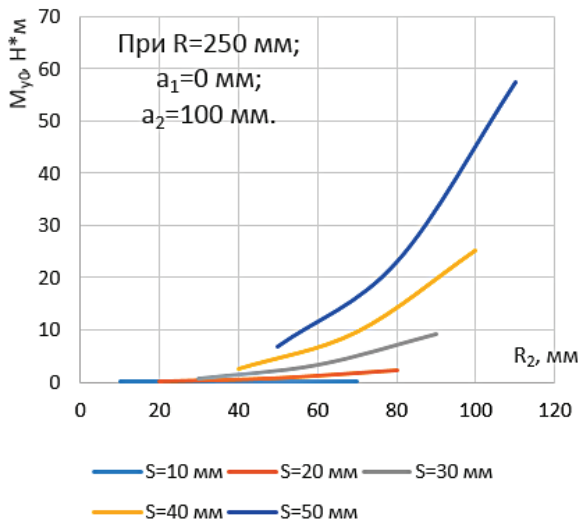
*a*



*б*



*в*



*г*

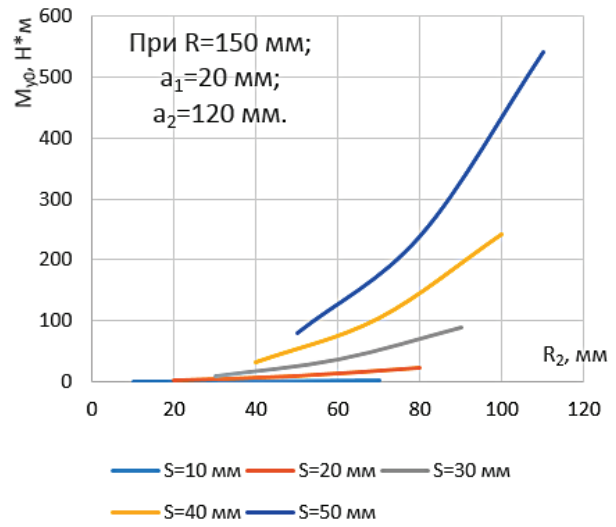


Рис. 5. Изменение изгибающего момента по кромке, появляющегося от выходящих на торцы доски начальных напряжений:  
а, в – на комлевом торце; б, г – на вершинном торце; R<sub>2</sub>, R<sub>1</sub> – координаты пластей доски в сечении бревна; a<sub>2</sub>, a<sub>1</sub> – координаты кромок доски в сечении бревна; R – радиус комлевой и вершинной частей бревна



$$k_4 = \frac{\sigma_R - \sigma_0}{R^4}, \quad b_0 = \sigma_0.$$

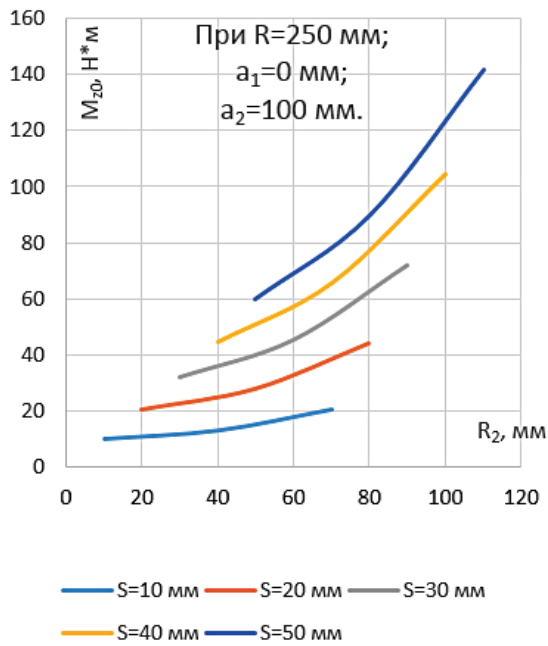
Тогда

$$\sigma_m = \frac{k_4}{5} (a_2^4 + a_2^3 a_1 + a_2^2 a_1^2 + a_2 a_1^3 + a_1^4) +$$

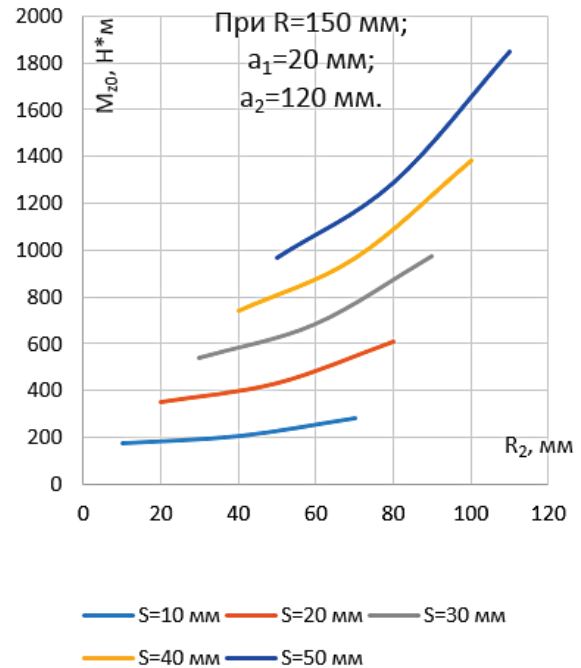
$$+ \frac{2k_4}{9} (a_2^2 + a_2 a_1 + a_1^2) (R_2^2 + R_2 R_1 + R_1^2) +$$

$$+ \frac{k_4}{5} (R_2^4 + R_2^3 R_1 + R_2^2 R_1^2 + R_2 R_1^3 + R_1^4) - b_0. \quad (7)$$

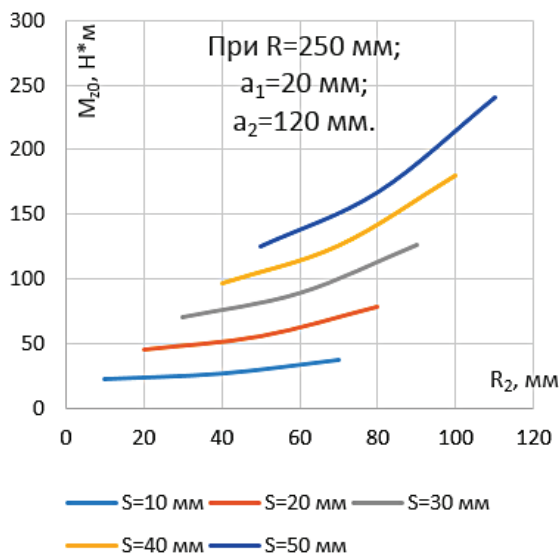
*a*



*б*



*в*



*г*

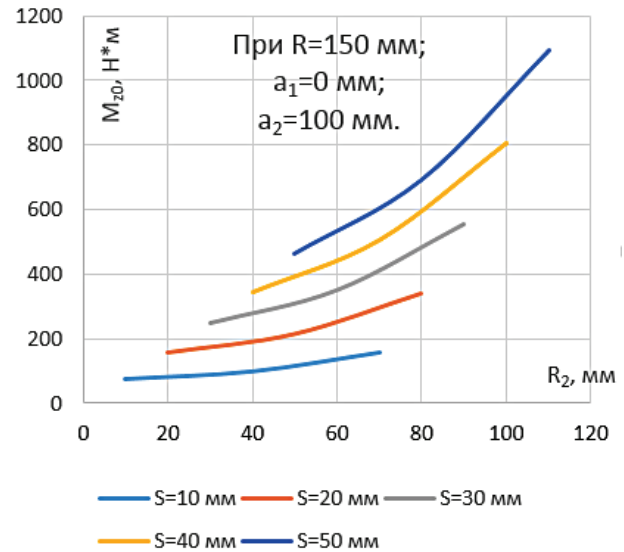


Рис. 6. Изменение изгибающего момента по пласти, появляющегося от выходящих на торцы доски начальных напряжений (объяснение см. на рис. 5)

Функции изгибающих моментов с учетом (3)–(7) в результате преобразований могут быть представлены в следующем виде:

$$M_{y0} = k_4(a_2 - a_1)(R_2 - R_1) \times \\ \times \left[ \frac{(R_2 + R_1)(R_2 - R_1)^2}{18} (a_2^2 + a_2 a_1 + a_1^2) + \right. \\ \left. + \frac{R_2^2 - R_1^2}{30} (2R_2^3 + R_1^2 R_2 - R_2^2 R_1 - 2R_1^3) \right], \quad (9)$$

$$M_{z0} = k_4(a_2 - a_1)(R_2 - R_1) \times \\ \times \left[ \frac{(a_2 + a_1)(a_2 - a_1)^2}{18} (R_2^2 + R_2 R_1 + R_1^2) + \right. \\ \left. + \frac{a_2^2 - a_1^2}{30} (2a_2^3 + a_1^2 a_2 - a_2^2 a_1 - 2a_1^3) \right]. \quad (8)$$

Результаты расчетов изгибающих моментов по полученным формулам проиллюстрированы на примере древесины сосны на рис. 5, 6. Они свидетельствуют о значительном влиянии начальных напряжений, сформировавшихся в процессе роста дерева, на изменение формы и напряженность материалов конструкционного назначения, что не учитывалось в предыдущих исследованиях и в практике проектирования строительных конструкций.

На основании вышеизложенного можно сделать выводы, что по размеру ядровой зоны сечения ствола можно определить не только величину начальных напряжений в дереве, но и соотношение пределов прочности древесины при статическом изгибе и сжатии вдоль волокон. Используя полученные функции изгибающих моментов по пласти и кромке доски от выходящих на торце начальных напряжений, можно проанализировать изменение формы конструкционных пиломатериалов и НДС изготавливаемых из них строительных деревянных конструкций.

## Библиографический список

1. Белов С. В. Ветер – главный фактор, определяющий форму стволов деревьев и их устойчи-

вость / С. В. Белов // Лесоводство, лесные культуры и почвоведение. Вып. III. – Ред. кол. : С. В. Белов (отв. ред.) и др. – Л. : ЛТА, 1974. – С. 3–24.

2. Иванов Л. А. О влиянии ветра на рост дерева / Л. А. Иванов // Бот. журн. СССР. – 1934. – Т. 19, № 3. – С. 211–224.

3. Кузнецов А. И. Внутренние напряжения в древесине / А. И. Кузнецов. – М. : ГЛБИ, 1950. – 60 с.

4. Темнов В. Г. Бионический принцип регулирования параметров напряженно-деформированного состояния конструктивных систем при их проектировании и эксплуатации / В. Г. Темнов // Материалы 53-й науч. конференции. – СПб. : СПбГАСУ, 1996. – С. 9–12.

5. Темнов В. Г. Конструктивные системы в природе и строительной технике / В. Г. Темнов. – СПб. : Компьютербург, 2001. – 61 с.

6. Григорович В. К. О наивыгоднейшем направлении волокон в изделиях из анизотропных материалов / В. К. Григорович // Докл. АН СССР. – 1952. – Т. 86, № 4. – С. 152–160.

7. Jlinen A. Über die mechanische Schaftformtheorie der Bäume / A. Jlinen // Technische Hochschule in Finland. Wissenschaftliche Forschungen. – 1956. – Vol. 6. – P. 33–38.

8. Jlinen A. Über den Einfluss des Spatholzteilens und der Rohwichte auf die Elastizitätsmoduln die Pousonschen Konstanten und die Schubmoduln bei Holz mit ausgeprägten Jahrringbau / A. Jlinen // Technische Hochschule in Finland. Wissenschaftliche Forschungen. – 1956. – N 9. – P. 13–19.

9. Kübler H. Die Ursache der Wachstumsspannungen und die Spannungen quer zur Faserrichtung / H. Kübler // Holz als Roh- und Werkstoff. – 1959. – Vol. 17, issue 1. – P. 1–9.

10. Глухих В. Н. Начальные напряжения в древесине : монография / В. Н. Глухих, А. Л. Акопян. – СПб. : СПбГАСУ, 2016. – 118 с.

11. Глухих В. Н. К вопросу о напряжениях роста в дереве / В. Н. Глухих, А. Л. Акопян // Современные проблемы переработки древесины : материалы междунар. науч.-практич. конференции. – СПб. : Изд-во Политехн. ун-та, 2013. – 185 с.

12. Волинский В. Н. Взаимосвязь и изменчивость физико-механических свойств древесины / В. Н. Волинский. – Архангельск : АГТУ, 2006. – 196 с.

13. Раздорский В. Ф. Принципы строения скелета растений / В. Ф. Раздорский // Природа. – 1934. – № 8. – С. 21–23.

## References

1. Belov S. V. Veter – glavniy factor, opredelyayushiy formu stvolov dereviyev i ikh ustoychivost [Wind as the main factor which determines the form of boles and shape retention]. *Lesovodstvo, lesniye kulturny i pochvovedeniye* [Silviculture, artificial stands and soil sciences]. Leningrad, LTA Publ., 1974, vol. III, pp. 3–24. (In Russian)

2. Ivanov L. A. O vliyaniy vetra na rost dereva [On the influence of wind on tree growth]. *Botanycheskiy zhurnal SSSR* [USSR botanical journal], 1934, vol. 19, no. 3, pp. 211–224. (In Russian)

3. Kuznetsov A. I. *Vnutrenniye napryazheniya v drevesyne* [Internal stresses of wood]. Moscow, GLBI Publ., 1950, 60 p. (In Russian)

4. Temnov V. G. Bionicheskiy printsip regulirovaniya parametrov napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya konstruktivnykh sistem pry ikh proyektirovaniy i ekspluatatsii [Bionic control mechanism of deflected mode parameters of structural systems in the process of their engineering and maintenance]. *Materialy 53-ey nauchnoy konferentsii* [Proceedings of the 53d academic conference]. Saint Petersburg, SPSUACE Publ., 1996, pp. 9–12. (In Russian)

5. Temnov V. G. *Konstruktivniye systemy v pryrode i stroytelnoy tekhnike* [Structural systems in nature and structural engineering]. Saint Petersburg, Computerburg Publ., 2001, 61 p. (In Russian)

6. Grygorovich V. K. O naivygodneyshem napravlenii volokon v izdeliyakh iz anizotropnykh materia-

lov [On the optimal grain flow in the articles made of anisotropic materials]. *DAN SSSR. Doklady* [Academy of Science Proceedings], 1952, vol. 86, no. 4, pp. 152–160. (In Russian)

7. Jlinen A. Über die mechanische Schaftformtheorie der Bäume. *Technische Hochschule in Finland. Wissenschaftliche Forschungen*, 1956, no. 6, pp. 33–38.

8. Jlinen A. Über den Einfluss des Spaltholzteilens und der Rohwichte auf die Elastizitätsmoduln die Poussonschen Konstanten und die Schubmoduln bei Holz mit ausgeprägten Jahrringbau. *Technische Hochschule in Finland. Wissenschaftliche Forschungen*, 1956, no. 9, pp. 13–19.

9. Kübler H. Die Ursache der Wachstumspannungen und die Spannungen quer zur Faserrichtung. *Holz als Roh- und Werkstoff*, 1959, vol. 17, issue 1, pp. 1–9.

10. Glukhykh V. N. & Akopyan A. L. *Nachalniye napryazheniya v drevesyne* [Primary stresses in wood]. Saint Petersburg, SPSUACE Publ., 2016, 118 p. (In Russian)

11. Glukhykh V. N. & Akopyan A. L. K voprosu o napryazheniyakh rosta v dereve [On the stress of tree growth. Modern issues of milling]. *Sovremenniye problemy pererabotki drevesyny. Materialy mezhdunarodnoy nauchno-praktycheskoy konferentsii* [Proceedings of the international research and training conference]. Saint Petersburg, Polytechnic University Publ., 2013, 185 p. (In Russian)

12. Volynskiy V. N. *Vzaimosvyaz i izmenchivost phisiko-matematicheskikh svoystv drevesyny* [Coupling and variability of properties of the wood]. Arkhangel'sk, Arkhangel'sk State Technical University Publ., 2006, 196 p. (In Russian)

13. Razdorskiy V. F. Printsipy stroeniya skeleta rasteniy [Organization principles of a plant skeleton]. *Nature*, 1934, no. 8, pp. 21–23. (In Russian)

ГЛУХИХ Владимир Николаевич – доктор техн. наук, профессор, svetlana\_sodr@mail.ru; \*КИРЮТИНА Светлана Евгеньевна – аспирант, sekir@lan.spbgasu.ru; БОГДАНОВА Алена Алексеевна – магистрант, svetlana\_sodr@mail.ru (Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет).

УДК 681.518:656.2–027.45

**К. П. Голоскоков, М. Ю. Чиркова, Э. В. Логин****РАСЧЕТ ВРЕМЕННЫХ ЗАТРАТ НА ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ И ДОСТОВЕРНОСТИ ИНФОРМАЦИИ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ**

Дата поступления: 11.05.2017

Решение о публикации: 17.07.2017

**Аннотация**

**Цель:** Раскрыть основные структурные схемы организации контроля и коррекции данных в информационных системах (ИС), направленные на достоверность процедур преобразования информации. Показать основные существующие методики контроля и коррекции ошибок в процессе преобразования данных, а также возможность при проектировании ИС оценить затраты времени на преобразование информации с учетом реализации тех или иных методов повышения достоверности. **Методы:** Показано, что такие затраты зависят от места выполнения контроля, а также от применяемой процедуры контроля. Представлена типовая структура организации контроля и коррекции данных в ИС. Таким образом, оценки значений временных затрат могут быть получены исходя из известных параметров производительности работы технических средств и персонала ИС или на основе контрольного хронометража соответствующих преобразований информации. Эти значения зависят от специфики используемой процедуры преобразования информации. Величины временных затрат могут быть получены на основе соответствующих статистических данных или с помощью метода экспертной оценки. В качестве экспертов в таком случае должны выступать работники соответствующих служб информатизации, имеющие практический опыт решения задач рассматриваемого класса. В том случае, если задержка задана значением времени ожидания, обусловленного возникновением очереди на обслуживание техническим средством на каждом этапе, ее величина может быть оценена методами теории массового обслуживания. **Результаты:** Предложенные расчетные формулы позволяют на этапе проектирования системы преобразования информации в ИС проводить оценку затрат времени на повышение достоверности преобразования данных и с учетом этого осуществлять выбор наиболее рациональных вариантов обеспечения достоверности данных в процессе их преобразования. **Практическая значимость:** Расчет временных затрат дает возможность повысить надежность и достоверность информации при проектировании ИС.

**Ключевые слова:** Информационная система, достоверность, методы контроля, методы обнаружения ошибок, затраты, схемы контроля, коррекция информации.

**Konstantin P. Goloskokov**, D. Eng. Sci., professor, kpg777@rambler.ru (Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping); **Marina U. Chirkova**, Cand. Econ. Sci., associate professor, mu.tch@mail.ru (Saint Petersburg State University of Economics); **Elina V. Login**, assistant, elinabeneta@yandex.ru (Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University) THE CALCULATION OF TIME SPENT ON IMPROVING THE RELIABILITY AND ACCURACY OF THE INFORMATION IN THE DESIGN OF INFORMATION SYSTEMS

**Summary**

**Objective:** To reveal the main structural schemes of control organization and data correction in information systems (IS) focused on the accuracy of data conversion routine. To show the basic existing methods of control and error correction in the process of data conversion, and the possibility for information

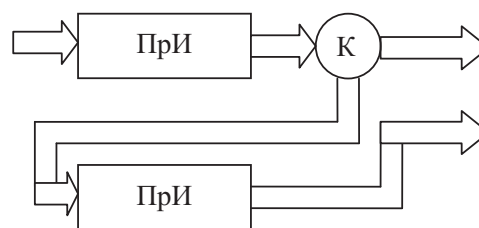
systems' engineering to evaluate data conversion time expenditure, taking into account the realization of methods for increasing reliability. **Methods:** It was shown that such time expenditure depends on the place of control performance, as well as the applied control procedures. A standard structure of control organization and data correction in information systems was presented. Thus, the values of time expenditure may be obtained based on the given operation performance parameters of technical equipment and IS staff personnel, or may be determined on the basis of retiming of the corresponding data conversion. These values depend on the specificity of the applied procedure of data conversion. The values of time expenditure may be obtained on the basis of relevant statistical data or the method of expert evaluation. In this case, the employees of the relevant IT development departments, possessing practical knowledge in the solution of the tasks in question, are to act as experts. In case the delay is set by the value of queue time, conditioned by queue occurrence on facility maintenance at each stage, its value may be assessed by queueing techniques. **Results:** The evaluation formulas, introduced in the given study, make it possible, at the design stage of the data conversion system in IS, to assess the time required for accuracy improvement of data conversion and, on the basis of it, make a selection of the most efficient data adequacy options in the process of data transformation. **Practical importance:** The calculation of time expenditure makes it possible to improve the reliability and accuracy of information in the process of IS design.

**Keywords:** Information system, reliability, control methods, methods for error detection, expenditures, checking circuits, data correction.

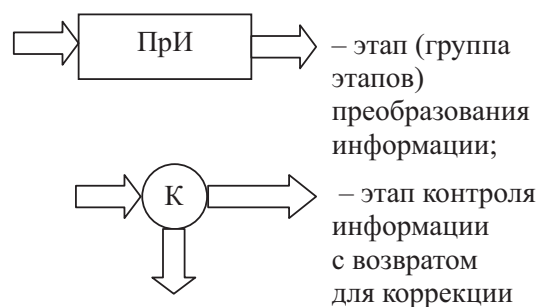
В современных информационных системах (ИС) предъявляются высокие требования к достоверности преобразования (сбора, передачи, хранения, обработки и представления) информации. В связи с этим в ИС реализуются различные методы контроля и коррекции ошибок в процессе преобразования данных. При проектировании ИС необходимо иметь возможность оценивать затраты времени на преобразование информации с учетом реализации тех или иных методов повышения достоверности. Анализ функционирования ИС показывает, что эти затраты зависят от места выполнения контроля, а также от применяемой процедуры контроля. В работах [1–4] уделяется основное внимание преобразованию информации, но не предлагаются методики расчета времени, необходимого для преобразования информации. Расчеты надежности и достоверности преобразования информации описаны в [5–9], а определение временных затрат почти не затронуто. В [10–20] раскрыты методы обеспечения надежности программного обеспечения с позиций теории вероятностей, но нет методики оценки временных затрат.

В работах [11–16, 20] рассматриваются методы оценки надежности цифровых релейных устройств без расчетов временных характеристик, в [19, 21] – программное обеспечение,

дается оценка надежности, но не приводится методика, позволяющая на практике производить расчеты затрат времени. В статьях [23, 24] излагаются методы повышения достоверности информации для антивирусного программного обеспечения, но не обсуждаются вопросы, связанные с контролем и коррекцией информации.



### Преобразование информации с контролем и коррекцией ошибок без повторного анализа



На рисунке схематически представлена типовая структура организации контроля и коррекции информации в ИС.

### Расчет временных затрат на преобразование информации без реализации контроля

Время преобразования единицы информации (символа, реквизита, сообщения и т. д.)  $T_e$  без учета реализации контроля определяется реализуемой в ИС процедурой преобразования информации, а также производительностью применяемых технических средств и персонала на каждом этапе:

$$T_e = \sum_{i=1}^m (\tau_{ei} + t_{ei}),$$

где  $T_{ei}$ ,  $t_{ei}$  – время ожидания начала выполнения и время выполнения  $i$ -го преобразования единицы информации;  $m_e$  – число последовательных этапов преобразования единицы информации.

Без учета процедуры коррекции время выполнения единичного ( $i$ -го) этапа преобразования и контроля единицы информации  $t_{kei}$  равно

$$T'_{ei} = (\tau_{ei} + t_{ei} + t_{kei}).$$

Для группы из  $m_e$  последовательных этапов преобразования, охватываемых единым контролем:

$$T'_{ei} = t_{ke} + \sum_{i=1}^{m_e} (\tau_{ei} + t_{ei}) = t_{ke} + T_e,$$

здесь  $t_{ke}$  – время контроля единицы информации.

Значения  $t_{ei}$  в общем виде определяются из соотношений

а) для  $n$ -го реквизита  $t_{ni} = \frac{L_n}{V_{ei}}$ ;

б) для  $z$ -го сообщения  $t_{ni} = \sum_{n=1}^{m_{pz}} t_{ni}$ ;

в) для партии  $z$ -х сообщений  $t_{nzi} = n_{\text{парт}} \cdot t_{zi}$ ,

в которых  $V_{ei}$  – скорость преобразования на  $i$ -м этапе (сим в/с);  $M_{pz}$  – число разных реквизитов в  $z$ -м сообщении;  $n_{\text{парт}}$  – число сообщений в партии;  $L_n$  – длина (число символов) в  $n$ -м реквизите.

Таким образом, оценки значений  $t_{ei}$  могут быть получены исходя из известных параметров производительности работы технических средств и персонала ИС или получены на основе контрольного хронометража соответствующих преобразований информации.

Значения  $T_{ei}$  зависят от специфики применяемой процедуры преобразования информации и может быть определена на основе соответствующих статистических данных или с помощью метода экспертной оценкой. В качестве экспертов в этом случае должны выступать работники соответствующих служб предприятия, имеющие практический опыт решения задач рассматриваемого класса. В том случае, если задержка  $T_{ei}$  определяется временем ожидания, обусловленным возникновением очереди на обслуживание техническим средством на  $i$ -м этапе, ее величина может быть оценена методами теории массового обслуживания.

Реализация коррекции выявленных контролем искажений может вносить дополнительные задержки, зависящие от характера применяемой процедуры. Рассмотрим оценки для этих задержек.

### Коррекция информации без повторного контроля

Для  $i$ -го этапа преобразования к затратам времени на сбор и контроль  $T'_{ei}$  добавятся затраты на коррекцию (т. е. повторное преобразование) части единиц информации, в которых при контроле будут выявлены искажения. Время сбора единицы информации на  $i$ -м этапе с учетом контроля и коррекции  $T_{ei}^*$  может быть в этом случае оценено в виде

$$T_{ei}^* = \begin{cases} \tau_{ei} + t_{ei} + t_{kei} & \text{— при отсутствии возврата,} \\ \tau_{ei} + t_{ei} + t_{kei} + \tau'_{ei} + t'_{ei} & \text{— при возврате информации,} \end{cases}$$

а среднее время выполнения  $i$ -го этапа  $[T_{ei}^*]_{\text{cp}}$  равно

$$[T_{ei}^*]_{\text{cp}} = T_{ei} + t_{ei} + t_{kei} + (T'_{ei} + t'_{ei}).$$

Параметры в режиме выполнения коррекции и коэффициент, учитывающий относительную частоту (вероятность) возврата единиц информации контролем, определяются по выражению

$$\sigma_{ei} = [P_{ei}(1 - K_{Ri}) + P_{ko}(1 - P_{ei})],$$

где  $P_{ei}$  – вероятность не выявленного искажения единицы информации на  $i$ -м этапе преобразования;  $P_{ko}$  – вероятность ложного срабатывания контрольного органа (схемы, программы, человека) на  $i$ -м этапе;  $K_{Ri}$  – коэффициент редукиции, характеризующий обнаруживающую способность методов контроля на  $i$ -м этапе:

$$K_{Ri} = \frac{P_{ei}^*}{P_{ei}}.$$

В случае неизменности процедуры ожидания и выполнения для  $i$ -го этапа при обычном режиме сбора и заполнении коррекции, т. е. при  $T'_{ei} = T_{ei}$  и  $t'_{ei} = t_{ei}$ , получим

$$[T_{ei}^*]_{\text{cp}} = t_{kei} + (T_{ei} + t_{ei}) \cdot (1 + \sigma_{ei}).$$

Для обоих случаев среднее приращение времени выполнения  $i$ -го этапа (за счет реализации контроля и коррекции)  $[\Delta T_{ei}]_{\text{cp}}$  составит

$$[\Delta T_{ei}]_{\text{cp}} = t_{kei} + (T'_{ei} + t'_{ei}) \cdot \sigma_{ei}.$$

Если контролем охватывается группа последовательных преобразований, расчетные соотношения примут вид

$$T_{ei}^* = \begin{cases} \tau_{ei} + t_{ei} & \text{при отсутствии возврата,} \\ \tau_{ei} + t_{ei} + \tau'_{ei} + t'_{ei} & \text{при возврате,} \end{cases}$$

$$[T_e^*]_{\text{cp}} = t_{ke} + \sum_{i=1}^{m_e} (\tau_{ei} + t_{ei}) + \sigma_e \sum_{i=1}^{m_e} (\tau'_{ei} + t'_{ei}),$$

$$[\Delta T_e]_{\text{cp}} = t_{ke} + \sigma_e \sum_{i=1}^{m_e} (\tau'_{ei} + t'_{ei}).$$

Предложенные в данной работе расчетные формулы позволяют на этапе проектирования системы преобразования информации в ИС проводить оценку затрат времени на повышение достоверности преобразования информации и с учетом этого осуществлять выбор наиболее рациональных вариантов обеспечения достоверности данных в процессе их преобразования в ИС.

### Библиографический список

1. Marvin K. S. Digital Communication over Fading Channels / K. S. Marvin, M.-S. Alouini. – New York : A John Wiley & Sons, 2000. – 544 p.
2. Simson M. K. Digital Communication over Fading Channels. – 2-е изд. / M. K. Simson, M.-S. Alouini. – New York : A John Wiley & Sons, 2005. – 936 p.
3. Борисов В. И. Помехозащищенность систем радиосвязи с расширением спектра сигналов методом псевдослучайной перестройки рабочей частоты / В. И. Борисов, В. М. Зинчук, А. Е. Лимарев, Н. П. Мухин, Г. С. Нахмасон. – М. : Радио и связь, 2000. – 384 с.
4. Борисов В. И. Помехозащищенность систем радиосвязи с расширением спектра сигналов модуляцией несущей псевдослучайной последовательностью / В. И. Борисов, В. М. Зинчук, А. Е. Лимарев, Н. П. Мухин, Г. С. Нахмасон. – М. : Радио и связь, 2003. – 640 с.
5. Брусакова И. А. Математическая модель функциональной надежности автоматизированных систем управления / И. А. Брусакова, К. П. Голоскоков // Вестн. ИНЖЭКОН. – Сер. Технические науки. – 2010. – № 8. – С. 48–51.
6. Голоскоков К. П. Автоматизированная система испытаний в структуре системы управления качеством / К. П. Голоскоков // Науч.-технич. ведомости С.-Петербур. гос. политех. ун-та. Информатика. Телекоммуникации. Управление. – 2008. – Т. 6, № 69. – С. 116–120.
7. Голоскоков К. П. Прогнозирование и оценка технического состояния сложных систем / К. П. Голоскоков // Науч.-технич. ведомости С.-Петербур.

гос. политех. ун-та. – 2008. – Т. 1, вып. № 1 (53). – С. 164–168.

8. Голоскоков К. П. Формирование информационной базы для прогнозирования качества продукции / К. П. Голоскоков // *Инновации*. – 2009. – № S1. – С. 91–94.

9. Голоскоков К. П. Прогнозирование с применением теории распознавания образов / К. П. Голоскоков, М. В. Железняк // *Вестн. ИНЖЭКОН. – Сер. Технические науки*. – 2011. – № 8. – С. 114–118.

10. Григорьев В. А. Сети и системы радиодоступа / В. А. Григорьев, О. И. Лагутенко, Ю. А. Распаев. – М. : Эко-Трендз, 2005. – 384 с.

11. Типикина А. П. Оценка программной надежности микропроцессорных релейных защит / А. П. Типикина, Л. С. Певцова // *Интернет-журн. «Науковедение»*. – 2015. – Т. 7, № 2 (27). – С. 121 (см.: URL: [naukovedenie.ru/PDF/74TVN215.pdf](http://naukovedenie.ru/PDF/74TVN215.pdf) ; дата обращения: 05.06.2017).

12. Трофимов А. С. Метод оценки надежности цифровой релейной защиты энергосистем / А. С. Трофимов // *Релейщик*. – 2016. – № 3. – С. 29.

13. Захаров О. Г. О показателях надежности, связанных с «требуемостью на срабатывание» / О. Г. Захаров // *Релейная защита и автоматизация*. – 2013. – № 4. – С. 44–47.

14. Захаров О. Г. Контрольные испытания блоков питания на надежность / О. Г. Захаров // *Релейная защита и автоматизация*. – 2015. – № 1 (18). – С. 56–61.

15. Захаров О. Г. Надежность цифровых устройств релейной защиты. Показатели. Требования. Оценки / О. Г. Захаров. – М. : Инфра-Инженерия, 2014. – 128 с.

16. Захаров О. Г. О надежности комбинированных блоков питания БПК-3 (4) / О. Г. Захаров // *Энергетик*. – 2015. – № 9. – С. 47–50.

17. Захаров О. Г. Аппаратная надежность устройств релейной защиты / О. Г. Захаров // *Библиотечка электротехника*. – 2016. – № 7 (217). – С. 1–88.

18. Борисов В. И. Вероятностные аналитические модели сетевой атаки с внедрением вредоносного программного обеспечения / В. И. Борисов, Н. М. Радько, А. А. Голозубов, И. Л. Батаронов, Е. В. Ермилов // *Информация и безопасность*. – 2013. – Т. 16, № 1. – С. 5–30.

19. Лаврищева Е. М. Сборочное программирование. Основы индустрии программных продуктов / Е. М. Лаврищева, В. Н. Грищенко. – Киев : Наукова думка, 2009. – 372 с.

20. Дроботун Е. Б. Вероятностные характеристики процессов обеспечения безопасности функционирования автоматизированных систем в условиях компьютерных атак / Е. Б. Дроботун, Д. В. Козлов // *Перспективы развития информационных технологий*. – 2016. – № 29. – С. 185–193.

21. Бойченко О. В. Способы защиты операционных систем / О. В. Бойченко, А. С. Трофимов // *Проблемы информационной безопасности : сб. тр. II Междунар. науч.-практич. конференции*. – Симферополь ; Гурзуф, 2016. – С. 135–136.

22. Дроботун Е. Б. Программный комплекс расследования инцидентов информационной безопасности / Е. Б. Дроботун, Д. В. Козлов, А. С. Марковский // *Программные продукты, системы и алгоритмы*. – 2016. – № 2. – С. 8.

23. Шабуров А. С. Разработка модели защиты информации корпоративной сети на основе внедрения SIEM-системы / А. С. Шабуров, В. И. Борисов // *Вестн. Пермск. нац. исслед. политех. ун-та. Электротехника, информационные технологии, системы управления*. – 2016. – № 19. – С. 111–124.

24. Дроботун Е. Б. Построение модели угроз безопасности информации в автоматизированной системе управления критически важными объектами на основе сценариев действий нарушителя / Е. Б. Дроботун, О. В. Цветков // *Программные продукты и системы*. – 2016. – № 3–1. – С. 42–50.

## References

1. Marvin K. S. & Alouini M.-S. *Digital Communication over Fading Channels*. New York, John Wiley & Sons Publ., 2000, 544 p.

2. Simson M. K. & Alouini M.-S. *Digital Communication over Fading Channels*. 2-oy izd. New York, John Wiley & Sons Publ., 2005, 936 p.

3. Borisov V. I., Zynchuk V. M., Lymarev A. Y., Mukhyn N. P. & Nakhmason G. S. *Pomekhozashy-shennost system radiosvyazy s rasshyreniyem spectra signalov metodom psevdosluchainoy perestroyky rabochey chastoty* [Anti-interference capacity of radio communications systems with signal spectrum broa-



dening by means of frequency hopping method]. Moscow, Radio and communication Publ., 2000, 384 p. (In Russian)

4. Borysov V. I., Zynchuk V. M., Lymarev A. Y., Mukhyn N. P. & Nakhmason G. S. *Pomekhozashyshennost system radiosvyazy s rasshyreniyem spectra sygnalov modulyatsiyey nesushey psevdosluchaynoy posledovatel'nostyu* [Anti-interference capacity of radio communications systems with signal spectrum broadening by means of pseudo-random sequence of carrier modulation]. Moscow, Radio and communications Publ., 2003, 640 p. (In Russian)

5. Brusakova I. A. & Goloskokov K. P. *Matematycheskaya model funktsionalnoy nadezhnosti avtomatizirovannykh system upravleniya* [Mathematical model of functional reliability of automated control systems]. *Vestnyk INZhEKON. Seriya Inzhenernye nauky* [UNECON (Saint Petersburg State University of Economics) Bulletin. Engineering sciences series], 2010, no. 8, pp. 48–51. (In Russian)

6. Goloskokov K. P. *Avtomatizirovannaya sistema ispytaniy v structure systemy upravleniya kachestvom* [Automated test system within quality management system]. *Nauchno-tekhnicheskiye vedomosti Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo polytekhnicheskogo univesiteta. Informatyka. Telekomunikatsii. Upravleniye* [Research and engineering bulletin of Saint Petersburg Polytechnical University. Information technologies. Telecommunications. Management], 2008, vol. 6, no. 69, pp. 116–120. (In Russian)

7. Goloskokov K. P. *Prognozirovaniye i otsenka tekhnicheskogo sostoyaniya slozhnykh system* [Forecasting and assessment of complicated systems' technical state]. *Nauchno-tekhnicheskiye vedomosti Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo polytekhnicheskogo univesiteta* [Research and engineering bulletin of Saint Petersburg Polytechnical University], 2008, vol. 1, no. 1 (53), pp. 164–168. (In Russian)

8. Goloskokov K. P. *Formirovaniye informatsionnoy bazy dlya prognozirovaniya kachestva produkt-sii* [Information database formation for the production quality prognosis]. *Innovations*, 2009, no. S1, pp. 91–94. (In Russian)

9. Goloskokov K. P. & Zheleznyak M. V. *Prognozirovaniye s primeneniyyem teorii raspoznavaniya obrazov* [Forecasting with application of the theory

of pattern recognition]. *Vestnyk INZhEKON. Seriya Inzhenernye nauky* [UNECON (Saint Petersburg State University of Economics) Bulletin. Technical sciences series], 2011, no. 8, pp. 114–118. (In Russian)

10. Grygoriyev V. A., Lagutenko O. I. & Raspayev Y. A. *Sety i systemy radiodostupa* [Systems and networks of radio access]. Moscow, Eco-Trends Publ., 2005, 384 p. (In Russian)

11. Typykyna A. P. & Pevtsova L. S. *Otsenka programnoy nadezhnosti mikroprotseessornykh releynykh zashyt* [Program reliability assessment of microprocessor-based relay protection]. *Naukovedeniye* [Science studies], 2015, vol. 7, no. 2 (27), pp. 121.– URL: [naukovedenie.ru/PDF/74TVN215.pdf](http://naukovedenie.ru/PDF/74TVN215.pdf) (accessed: 05.06.2017) (In Russian)

12. Trofymov A. S. *Metod otsenki nadezhnosti tsyfrovoy releynoy zashyty energosystem* [Reliability evaluation method for digital relay protection of electric power systems]. *Releyshyk* [Protection engineer], 2016, no. 3, pp. 29. (In Russian)

13. Zakharov O. G. *O pokazatelyakh nadezhnosti, svyazannykh s "trebovaniyem na srabatyvaniye"* [On reliability figures, related to "operation demand"]. *Releynaya zashyta i avtomatizatsiya* [Relay protection and automation], 2013, no. 4, pp. 44–47. (In Russian)

14. Zakharov O. G. *Kontrolniye ispytaniya blokov pytaniya na nadezhnost* [Check tests on reliability of power supply modules]. *Releynaya zashyta i avtomatizatsiya* [Relay protection and automation], 2015, no. 1 (18), pp. 56–61. (In Russian)

15. Zakharov O. G. *Nadezhnost tsyfrovyykh ustroystv releynoy zashyty. Pokazately. Trebovaniya. Otsenki* [Reliability of relay protection digital units. Indices. Requirements. Definitions]. Moscow, Infra-Inzheneriya [Infra-Engineering] Publ., 2014, 128 p. (In Russian)

16. Zakharov O. G. *O nadezhnosti kombinyrovannykh blokov pytaniya BPK-3 (4)* [On reliability of combined power supply modules BPK-3 (4)]. *Power engineer*, 2015, no. 9, pp. 47–50. (In Russian)

17. Zakharov O. G. *Apparatnaya nadezhnost ustroystv releynoy zashyty* [Hardware reliability of relay protection units]. *Bibliotekha elektrotekhnika* [Small library of electrical engineer], 2016, no. 7 (217), pp. 1–88. (In Russian)

18. Borysov V. I., Radko N. M., Golozubov A. A., Bataronov I. L. & Yermilov Y. V. *Veroyatnostniye analyticheskiye modeli setevoy ataky s vnedreniyem vre-*

donosnogo programmnoho obespecheniya [Probabilistic analytical models of network attack with malicious software infiltration]. *Informatsiya i bezopasnost* [*Information and safety*], 2013, vol. 16, no. 1, pp. 5–30. (In Russian)

19. Lavrysheva Y.M. & Gryshenko V.N. *Sborochnoye programirovaniye. Osnovy industrii programnykh produktov* [*Assembly software development. Industry basics of software products*]. Kiev, Naukova Dumka Publ., 2009, 372 p. (In Russian)

20. Drobotun Y.B. & Kozlov D.V. Veroyatnostnyye kharakteristyky protsessov obespecheniya bezopasnosti funktsionirovaniya avtomatizirovannykh system v usloviyakh kompyuternykh atak [Probabilistic characteristics of security processes of automated systems' functioning in case of computer attacks]. *Perspektyvy razvitiya informatsionnykh tekhnologiy* [*Prospects for the development of information technologies*], 2016, no. 29, pp. 185–193. (In Russian)

21. Boychenko O.V. & Trofymov A.S. Sposoby zashyty operatsionnykh system. Problemy informatsonnoy bezopasnosti [Operating systems' protection methods. The issues of information security]. *Sbornyk trudov II Mezhdunarodnoy nauchno-praktycheskoy konferentsii* [*The 2<sup>nd</sup> International research and training conference*]. Simferopol, Gurzuf Publ., 2016, pp. 135–136. (In Russian)

22. Drobotun Y.B. & Kozlov D.V. & Markovskiy A.S. Programmniy kompleks rassledovaniya incidentsionnoy bezopasnosti [Program complex of investigation of information security incidents]. *Programmniye produkty, systemy i algoritmy* [*Software products, systems and algorithms*], 2016, no. 2, p. 8. (In Russian)

23. Shaburov A.S. & Borisov V.I. Razrabotka modeli zashyty informatsii korporativnoy seti na osnove vnedreniya SIEM-systemy. [Model development of corporate network information security on the basis of SIEM-system implementation]. *Vestnyk Permskogo natsionalnogo issledovatel'skogopolytekhnikeskogo universiteta. Elektrotekhnika, informatsionniye tekhnologii, systemy upravleniya* [*Perm National Research Polytechnic University Bulletin. Electrical engineering, information technologies, control systems*], 2016, no. 19, pp. 111–124. (In Russian)

24. Drobotun Y.B. & Tsvetkov O.V. Postroyeniye modeli bezopasnosti informatsii v avtomatizirovannoy systeme upravleniya krytychesky vazhnymy objektamy na osnove stseneriyev deystviy narushytelya [Model construction of information security threat in automated control system of essential objects on the basis of attacker's scenario]. *Programmniye produkty i systemy* [*Software products and systems*], 2016, no. 3–1, pp. 42–50. (In Russian)

ГОЛОСКОКОВ Константин Петрович – доктор техн. наук, профессор, доцент, kpg777@rambler.ru (Государственный университет морского и речного флота им. Адмирала С.О. Макарова); ЧИРКОВА Марина Юрьевна – канд. экон. наук, доцент, mu.tch@mail.ru (Санкт-Петербургский государственный экономический университет); ЛОГИН Элина Валерьевна – ассистент, elinabeneta@yandex.ru (Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I).

УДК 519.876.5:519.6:004.357

**М. В. Гофман, А. А. Корниенко, А. Г. Котенко, В. Н. Кустов, Е. Т. Мирончиков****МОДЕЛЬ ЦИФРОВОГО МАРКИРОВАНИЯ АУДИОСИГНАЛОВ,  
УСТОЙЧИВОГО К ПЕРЕДАЧЕ ЧЕРЕЗ ВОЗДУШНЫЙ АУДИОКАНАЛ**

Дата поступления: 10.05.2017

Решение о публикации: 29.06.2017

**Аннотация**

**Цель:** Решение задачи скрытой передачи информации в слышимой области частотного спектра воздушной среды. **Методы:** Описываемые методы относятся к области теории информации и стеганографии. **Результаты:** Предлагается модель скрытой передачи информации в слышимой области частотного спектра воздушной среды. А именно, модель построения, внедрения, выделения и восстановления скрываемого сигнала, когда передача осуществляется через воздушный аудиоканал. Скрываемый сигнал состоит из двух частей. Одна используется для синхронизации, а другая – информационная. В основе синхронизационной части лежит последовательность Касами, тогда как в основе информационной – кодовое слово кода БЧХ. Обе части скрываемого сигнала получают путем специального кодирования своих двоичных элементов. При выполнении этого кодирования используются последовательности Голда и RZ коды. В качестве скрывающего или несущего сигнала применяется аудиосигнал, который может представлять собой как речь, так и музыку. Построение стегоаудиосигнала выполняется путем внедрения скрываемого сигнала в частотную область скрывающего сигнала. Внедрение представляет собой амплитудную модуляцию отдельных спектральных составляющих скрывающего сигнала. Аналитически рассматривается вопрос возможности восстановления цифрового маркера после передачи стегоаудиосигнала через воздушный аудиоканал. **Практическая значимость:** Предложенную модель скрытой передачи данных можно использовать для неслышимой человеческому уху передачи информации через воздушный аудиоканал.

**Ключевые слова:** Аудиосигнал, стеганография, воздушный аудиоканал, цифровой маркер, последовательность Касами, последовательность Голда, БЧХ код, RZ код.

\***Maksim V. Gofman**, Cand. Eng. Sci., associate professor, maxgof@gmail.com; **Anatoliy A. Korniyenko**, D. Eng. Sci., professor, head of a chair; **Aleksey G. Kotenko**, D. Eng. Sci., associate professor, head of a chair; **Vladimir N. Kustov**, D. Eng. Sci., professor; **Yevgeniy T. Myronchikov**, D. Eng. Sci., professor (Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University) THE MODEL OF AUDIO SIGNALS DIGITAL CODING, TOLERANT TO TRANSMISSION VIA AIR AUDIO CHANNEL

**Summary**

**Objective:** To solve the task of hidden data transmission in audible area of air frequency spectrum. **Methods:** The described methods are related to the sphere of information theory and steganography. **Results:** The model of hidden data transmission in audible area of air frequency spectrum was introduced, that is, the model of construction, implementation, extraction and recovery of hidden signal, when the transmission is carried out via air audio signal. The hidden signal consists of two parts. One of them is used for synchronization, while the other is informative. Kasami sequence forms the basis of synchronization part, while BCH code word underlies the informative part. Both parts of a hidden signal were obtained by means of special coding of its binary elements. Gold sequence and RZ codes were used in the process of the codification in question. An audio signal, which may represent speech or music, was applied as a hidden or carrier signal. The construction of steganographic audio signal was fulfilled by

means of implementing a hidden signal in the frequency-domain of a hiding signal. represents amplitude modulation of certain spectral components of a hiding signal. The issue of digital marker recovery after steganographic audio signal transmission via audio channel was considered from an analytical viewpoint. **Practical importance:** The introduced model of hidden data transmission may be applied for inaudible by a human ear data transmission via air audio channel.

**Keywords:** Audio signal, steganography, air audio channel, digital marker, Kasami sequence, Gold sequence, BCH code, RZ code.

## Введение

Важной задачей обеспечения высокого качества транспортных процессов и требуемого уровня безопасности движения являются регистрация речевой ответственной информации и идентификация участников переговоров. В частности, ОАО «РЖД» использует систему автоматизированной записи, хранения и воспроизведения звуковых файлов с локомотивных регистраторов переговоров. С ее помощью контролируются выполнение установленных регламентов переговоров при поездной и маневровой работе на инфраструктуре ОАО «РЖД», улучшение качества расследования причин событий, связанных с нарушением безопасности движения, а также повышение уровня подготовки локомотивных бригад. С локомотивных регистраторов служебные переговоры между членами локомотивной бригады и переговоры по поездной радиосвязи в процессе поездки передаются и затем хранятся на серверах информационно-вычислительных центров. Прослушивание звуковых файлов локомотивных регистраторов переговоров производится в автоматизированной системе управления локомотивным хозяйством.

Решение задачи обеспечения конфиденциальности ответственной речевой информации и определения участников переговоров целесообразно осуществлять с помощью цифрового маркирования аудиосигналов. Однако пока такие аудиозаписи ни в момент формирования самих передаваемых аудиосигналов, ни после записи итоговых звуковых файлов переговоров не снабжаются дополнительной информацией, которая была бы не слышна человеческому уху, но могла бы быть использована для разрешения различных конфликтов и идентификации участников переговоров. Применение цифрового маркирования, устойчивого к передаче через воздушный аудиоканал, в процессе формирования передаваемого аудиосигнала, например, переговоров между диспетчером и членами локомотивной бригады, позволит внедрить в такой аудиосигнал дополнительную информацию. Так, если злоумышленник выполнит перехват переговоров на свой мобильный микрофон, а затем попытается использовать эту запись в своих целях, то в случае, если вещаемый аудиосигнал был специальным образом промаркирован, то из сделанной таким образом записи можно будет выделить маркеры, несущие внедренную информацию.

Классификацию методов сокрытия информации можно найти в статье [1]. Более подробное изложение вопросов методов цифрового маркирования аудиосигналов и скрытой передачи информации в аудиосигналах имеется в работах [2–9].

В этой статье предлагается модель внедрения информации в аудиосигнал и восстановления этой информации после передачи стегоаудиосигнала через воздушный аудиоканал, позволяющая выполнять скрытую передачу данных через такой канал. Особенностью рассматриваемой модели является то, что информация не будет воспринята человеческим ухом в процессе передачи такого стегоаудиосигнала, тогда как само внедрение информации может быть выполнено в любую частотную область слышимого диапазона. При этом восстановле-

ние внедренной информации из принятого стегоаудиосигнала возможно даже при незнании приемником аудиосигнала, в который производилось встраивание.

### Модель построения, внедрения, выделения и восстановления цифрового маркера

В предлагаемой модели выполняется построение цифрового маркерного сигнала, который состоит из двух частей. Каждая из этих частей выполняет свою функцию. Одна используется для установления синхронизации; в ее основе лежит последовательность Касами (Kasami) [10]. Другая часть защищает передаваемую информацию от ошибок; для этого применяется код, исправляющий ошибки. При этом элементы частей получаются в результате преобразования, в основе которого лежат последовательности Голда (Gold) и RZ коды [8].

Далее для удобства описания предлагаемой модели и как подхода для передачи информации применяются терминология и понятия систем передачи данных. Так, кодер и декодер канала используются для построения и восстановления дополнительной информации соответственно, тогда как модулятор и демодулятор – для процедур внедрения дополнительной информации в аудиосигнал и выделения ее из принятого сигнала соответственно.

### Передающая сторона

В кодер канала поступает информационная последовательность

$$\mathbf{x} = (x(1) \ x(2) \ \dots \ x(N_x)), \quad x(i) \in \{0,1\}.$$

Кодер канала преобразует информационную последовательность в кодовое слово  $(N_c, N_x)$  БЧХ кода [11, 12]:

$$\mathbf{c}_{\text{БЧХ}} = (c_{\text{БЧХ}}(1) \ c_{\text{БЧХ}}(2) \ \dots \ c_{\text{БЧХ}}(N_c)),$$

где  $c_{\text{БЧХ}}(i) \in \{0,1\}$ ; количество исправляемых кодом ошибок обозначим символом  $N_t$ . Кодер канала, используя вектор  $\mathbf{c}_{\text{БЧХ}}$ , строит кодовое слово следующего вида:

$$\mathbf{y} = (y(1) \ y(2) \ \dots \ y(N_y)) = (\mathbf{y}_{\text{сх}} \ \mathbf{y}_{\text{иф}}),$$

которое можно разделить на две части: часть  $\mathbf{y}_{\text{сх}}$ , используемую для установления синхронизации, и часть  $\mathbf{y}_{\text{иф}}$ , кодирующую вектор  $\mathbf{c}_{\text{БЧХ}}$ . Каждая из этих частей представляет собой вектор, элементы которого – это числа из множества  $\{-1,1\}$ .

Синхронизационная часть  $\mathbf{y}_{\text{сх}}$  получается в результате кодирования последовательностями Голда элементов последовательности Касами с последующим кодированием RZ кодом. Так, вектор

$$\mathbf{y}_{\text{сх}} = (y_{\text{сх}}(1) \ y_{\text{сх}}(2) \ \dots \ y_{\text{сх}}(N_K N_\Gamma N_{\text{RZ}})),$$

где  $N_K$  – это длина используемой последовательности Касами;  $N_\Gamma$  – длина последовательностей Голда;  $N_{RZ}$  – длина кодовых слов RZ кода. Пусть задана последовательность Касами

$$\beta = (\beta(1) \ \beta(2) \ \dots \ \beta(N_K)),$$

в которой  $\beta(i) \in \{-1, 1\}$ ; заданы последовательности Голда

$$\mathbf{g}_1 = (g(1,1) \ g(1,2) \ \dots \ g(1, N_\Gamma)),$$

$$\mathbf{g}_2 = (g(2,1) \ g(2,2) \ \dots \ g(2, N_\Gamma)),$$

где  $g(i, j) \in \{-1, 1\}$ ; а также пусть задан RZ код из двух кодовых слов:

$$\mathbf{c}_{RZ}(1) = (c_{RZ}(1,1) \ c_{RZ}(1,1) \ \dots \ c_{RZ}(1, N_{RZ})),$$

$$\mathbf{c}_{RZ}(2) = (c_{RZ}(2,1) \ c_{RZ}(2,1) \ \dots \ c_{RZ}(2, N_{RZ})),$$

где  $N_{RZ}$  – четное число,

$$c_{RZ}(1,1) = c_{RZ}(1,2) = \dots = c_{RZ}\left(1, \frac{N_{RZ}}{2}\right) = -1,$$

$$c_{RZ}\left(1, \frac{N_{RZ}}{2} + 1\right) = c_{RZ}\left(1, \frac{N_{RZ}}{2} + 2\right) = \dots = c_{RZ}(1, N_{RZ}) = 1,$$

$$c_{RZ}(2, j) = (-1) \cdot c_{RZ}(1, j).$$

В этом случае, если  $-1$  кодируется вектором  $\mathbf{g}_1$ , а  $1$  кодируется  $\mathbf{g}_2$ , то элементы синхронизационной части удовлетворяют следующему равенству:

$$y_{cx}(N_\Gamma N_{RZ}(i-1) + N_{RZ}(j-1) + k) = c_{RZ}\left(\frac{g\left(\frac{\beta(i)+1}{2} + 1, j\right) + 1}{2} + 1, k\right),$$

здесь  $i \in \{1, 2, \dots, N_K\}$ ,  $j \in \{1, 2, \dots, N_\Gamma\}$ ,  $k \in \{1, 2, \dots, N_{RZ}\}$ . Таким образом, вначале элементы последовательности Касами подвергаются кодированию последовательностями Голда, элементы которых, далее, в свою очередь, подвергаются кодированию RZ кодом.

Информационная часть

$$\mathbf{y}_{иф} = (y_{иф}(1) \ y_{иф}(2) \ \dots \ y_{иф}(N_c N_\Gamma N_{RZ}))$$

получается таким же образом, как и синхронизационная часть, но путем кодирования элементов вектора  $\mathbf{c}_{\text{БЧХ}}$ . Так,

$$y_{\text{иф}}(N_{\Gamma}N_{\text{RZ}}(i-1) + N_{\text{RZ}}(j-1) + k) = c_{\text{RZ}} \left( \frac{g(c_{\text{БЧХ}}(i) + 1, j) + 1}{2} + 1, k \right),$$

где  $i \in \{1, 2, \dots, N_{\text{c}}\}$ ;  $j \in \{1, 2, \dots, N_{\Gamma}\}$ ;  $k \in \{1, 2, \dots, N_{\text{RZ}}\}$ .

По длинам векторов  $\mathbf{y}_{\text{сх}}$  и  $\mathbf{y}_{\text{иф}}$  видно, что длина итогового вектора  $\mathbf{y}$  будет удовлетворять равенству

$$N_{\text{Y}} = (N_{\text{c}} + N_{\text{K}})N_{\Gamma}N_{\text{RZ}}.$$

Модулятор выполняет встраивание кодового слова  $\mathbf{y}$ , далее называемого *скрываемым сигналом*, в частотную область *скрывающего сигнала* путем модификации амплитуд спектральных линий скрывающего сигнала. Пусть скрывающий сигнал представляет собой цифровой аудиосигнал

$$\mathbf{z} = (z(1) \quad z(2) \quad \dots \quad z(k_{\text{Z}}N_{\text{Z}})),$$

где  $z(i)$  – отсчеты цифрового аудиосигнала, принимающие значения из диапазона  $[-1, 1]$ ;  $k_{\text{Z}} = (N_{\text{c}} + N_{\text{K}})N_{\text{RZ}}$ ;  $N_{\text{Z}}$  – четное число, для которого выполняется неравенство  $N_{\text{Z}} \geq 2(N_{\Gamma} + 1)$ .

Смежные блоки элементов вектора  $\mathbf{z}$  длинами  $N_{\text{Z}}$  подвергаются дискретным преобразованиям Фурье, что в итоге дает вместо вещественного вектора  $\mathbf{z}$  комплексный вектор такой же длины, каждый элемент которого называется спектральной линией. Таким образом,  $j$ -я спектральная линия  $i$ -го блока равна комплексному числу

$$Z(i, j) = \sum_{k=1}^{N_{\text{Z}}} z((i-1)N_{\text{Z}} + k) \cdot \exp\left(-\frac{\imath 2\pi(k-1)(j-1)}{N_{\text{Z}}}\right),$$

где  $i \in \{1, 2, \dots, k_{\text{Z}}\}$ ;  $j \in \{1, 2, \dots, N_{\text{Z}}\}$ ;  $\imath = \sqrt{-1}$  – мнимая единица.

Встраивание скрываемого сигнала выполняется путем изменения некоторого подмножества спектральных линий  $Z(i, j)$  с номерами  $j$  из диапазона от 1 до  $N_{\text{Z}}/2$ ; при этом мощность модифицируемого подмножества равна  $N_{\Gamma}$ . Так, если  $\{B(i, 1), B(i, 2), \dots, B(i, N_{\Gamma})\}$  – это множество номеров спектральных линий  $i$ -го блока, выбранных для встраивания, при этом  $1 < B(i, k) \leq N_{\text{Z}}/2$ , а  $\{A(i, 1), A(i, 2), \dots, A(i, N_{\Gamma})\}$  – это множество коэффициентов, определяющих силу встраивания (обычно  $A(i, k) \ll 1$ ), то, обозначив результат модификации спектральной линии  $Z(i, j)$  как  $Z'(i, j)$ , само встраивание выполняется по следующему правилу:

$$Z'(i, j) = \begin{cases} Z(i, B(i, k))(1 + A(i, k)y(m)), & \text{если } j = B(i, k), \\ Z(i, j), & \text{иначе,} \end{cases}$$

где  $i \in \{1, 2, \dots, k_Z\}$ ;  $j \in \{1, 2, \dots, N_Z/2\}$ ;  $k \in \{1, 2, \dots, N_\Gamma\}$ ;  $m$  – номер встраиваемого элемента вектора  $\mathbf{y}$ . Значение  $m$  зависит и от номера блока  $i$ , и от числа  $k$  по правилу

$$m = ((i-1) \bmod N_{RZ}) + 1 + (k-1)N_{RZ} + \left\lfloor \frac{i-1}{N_{RZ}} \right\rfloor N_{RZ}N_\Gamma,$$

в котором  $[a]$  – целая часть вещественного числа  $a$ . По правилу зависимости  $m$  от  $i$  и  $k$  видно, что в каждый блок спектральных линий внедряется лишь один элемент каждого кодового слова RZ кода, полученный при кодировании отдельной последовательности Голда. Спектральные линии  $Z(i, j)$  с номерами  $j$  из диапазона от  $(N_Z/2)+1$  до  $N_Z$  для сохранения свойства сопряженной симметричности также подвергаются изменениям в соответствии со следующим равенством:

$$Z'(i, j) = \begin{cases} (Z'(i, N_Z - j + 2))^*, & \text{если } j \neq (N_Z/2) + 1, \\ Z(i, j), & \text{иначе,} \end{cases}$$

где  $i \in \{1, 2, \dots, k_Z\}$ ;  $j \in \{(N_Z/2)+1, (N_Z/2)+2, \dots, N_Z\}$ ;  $(a)^*$  – число, комплексно сопряженное числу  $a$ . Выполняя обратные дискретные преобразования Фурье над модифицированными блоками спектральных линий, будет получен вещественный цифровой аудиосигнал

$$\mathbf{z}' = (z'(1) \quad z'(2) \quad \dots \quad z'(k_Z N_Z)),$$

где

$$z'((i-1)N_Z + k) = \frac{1}{N_Z} \sum_{j=1}^{N_Z} Z'(i, j) \exp\left(\frac{j2\pi(j-1)(k-1)}{N_Z}\right),$$

$i \in \{1, 2, \dots, k_Z\}$ ,  $k \in \{1, 2, \dots, N_Z\}$ ,  $\imath = \sqrt{-1}$  – мнимая единица.

Значения элементов вектора  $\mathbf{z}'$  в результате встраивания вектора  $\mathbf{y}$  могут оказаться вне диапазона  $[-1, 1]$ . Поэтому перед отправкой в канал элементы вектора  $\mathbf{z}'$  умножаются на нормирующий коэффициент

$$\theta = \frac{1}{\max\{|z'(1)|, |z'(2)|, \dots, |z'(k_Z N_Z)|\}},$$

где  $|a|$  – абсолютное значение числа  $a$ .

Так как при построении скрываемого сигнала  $\mathbf{y}$  RZ кодирование выполнялось в последнюю очередь, то ясно, что смежные блоки элементов вектора  $\mathbf{y}$  длинами  $N_{RZ}$  представляют собой кодовые слова RZ кода. А процесс встраивания приведет к тому, что эти кодовые слова последовательно пополам будут встроены в смежные блоки вектора  $\mathbf{z}$  длинами  $N_Z$ . Выбор величин коэффициентов  $A(i, k)$  можно осуществлять, опираясь на значения сигнал-маска, получаемые при помощи психоакустической модели, приведенной в [13, 14].



## Принимающая сторона

Аудиосигнал  $z'$  передается через воздушный аудиоканал. Пусть на выходе канала выполняется дискретизация с частотой  $F_s$ , равной частоте отправки отсчетов сигнала  $z'$  в аудиоканал. Таким образом, на выходе канала получается последовательность отсчетов

$$r = r(1), r(2), \dots, r(k_z N_z), r(k_z N_z + 1), \dots$$

Приемник разбивает последовательность  $r$  на перекрывающиеся блоки длиной  $k_z N_z$  отсчетов. Для вынесения решения о наличии скрытого сигнала в некотором блоке или, иными словами, для вынесения решения об установлении синхронизации на некотором блоке приемнику требуется обработать еще  $W - 1$  такого же размера блоков справа от исследуемого, т. е. требуется сделать еще  $W - 1$  шагов. Шаг составляет один отсчет, поэтому смежные блоки перекрываются настолько, что отличаются лишь в одном элементе. Обозначим блок отсчетов, обрабатываемый на некотором шаге  $i_{\text{шаг}} \in \{1, 2, \dots\}$ , вектором

$$r(i_{\text{шаг}}) = (r(i_{\text{шаг}}) \ r(i_{\text{шаг}} + 1) \ \dots \ r(i_{\text{шаг}} + k_z N_z - 1)).$$

Вектор  $r(i_{\text{шаг}})$  передается в демодулятор. Помимо него, в демодулятор поступают множества  $\{B(i, 1), B(i, 2), \dots, B(i, N_\Gamma)\}$  номеров спектральных линий, в которые производилось встраивание скрываемого сигнала передатчиком, для всех  $i \in \{1, 2, \dots, k_z\}$ . Кроме этого, в демодулятор может поступать сам скрывающий сигнал  $z$ , если он известен, что обычно повышает точность синхронизации и уменьшает вероятность ошибок восстановления символов информационной части. Однако, даже, когда скрывающий сигнал  $z$  неизвестен приемнику, описываемые в этой работе схемы кодирования и декодирования позволяют выделять скрываемый сигнал  $y$  из принятого сигнала; но следует учитывать, что в таком случае сам скрывающий сигнал станет шумом для приемника и будет влиять на качество восстановления скрытого сигнала.

Демодулятор выполняет действия, некоторые из которых обратны, выполненным модулятором. Так, он выполняет дискретные преобразования Фурье над смежными блоками элементов вектора  $r(i_{\text{шаг}})$ , при этом длина блока также равна  $N_z$ ; например, первый блок можно описать вектором

$$(r(i_{\text{шаг}}) \ r(i_{\text{шаг}} + 1) \ \dots \ r(i_{\text{шаг}} + N_z - 1)), \quad (1)$$

а второй блок – вектором

$$(r(i_{\text{шаг}} + N_z) \ r(i_{\text{шаг}} + N_z + 1) \ \dots \ r(i_{\text{шаг}} + 2N_z - 1)), \quad (2)$$

и т. д. В результате этих преобразований каждый блок преобразуется в такой же размерности комплексный вектор – вектор спектральных линий. Обозначим  $j$ -ю спектральную линию  $i$ -го блока через

$$R(i, j, i_{\text{шаг}}) = \sum_{k=0}^{N_z-1} r(i_{\text{шаг}} + (i-1)N_z + k) \exp\left(-\frac{\imath 2\pi k (j-1)}{N_z}\right),$$

где  $i \in \{1, 2, \dots, k_z\}$ ;  $j \in \{1, 2, \dots, N_z\}$ ;  $\imath = \sqrt{-1}$  – мнимая единица.

Далее вычисляется натуральный логарифм от абсолютных значений тех спектральных линий  $R(i, j, i_{\text{шаг}})$ , номера которых входят в соответствующее множество  $\{B(i, 1), B(i, 2), \dots, B(i, N_{\Gamma})\}$ . Если предположить, что  $\mathbf{r}(i_{\text{шаг}})$  представляет собой переданный сигнал  $\mathbf{z}'$ , искаженный шумом канала, то

$$R(i, B(i, k), i_{\text{шаг}}) = \frac{1}{\theta} n(i, B(i, k), i_{\text{шаг}}) Z(i, B(i, k)) (1 + A(i, k) y(m)),$$

где  $i \in \{1, 2, \dots, k_Z\}$ ;  $k \in \{1, 2, \dots, N_{\Gamma}\}$ ;  $n(i, B(i, k), i_{\text{шаг}})$  – коэффициент, появившийся из-за шума в канале связи, и, наконец,

$$m = ((i-1) \bmod N_{\text{RZ}}) + 1 + (k-1) N_{\text{RZ}} + \left\lfloor \frac{i-1}{N_{\text{RZ}}} \right\rfloor N_{\text{RZ}} N_{\Gamma}.$$

В таком случае натуральный логарифм абсолютной величины  $|R(i, B(i, k), i_{\text{шаг}})|$  равен сумме

$$\ln \frac{1}{\theta} + \ln |n(i, B(i, k), i_{\text{шаг}})| + \ln |Z(i, B(i, k))| + \ln |1 + A(i, k) y(m)|.$$

Чтобы удалить влияние спектральной линии скрывающего сигнала  $\mathbf{z}$ , демодулятор вычитает величину  $\ln |Z(i, B(i, k))|$  из этой суммы в том случае, когда ему известен скрывающий сигнал  $\mathbf{z}$ . Если  $A(i, k) \ll 1$ , то последнее слагаемое будет удовлетворять следующему приближенному равенству:

$$\ln |1 + A(i, k) y(m)| \approx A(i, k) y(m),$$

т. е. приближенно будет пропорционально отсчету скрытого сигнала. При выполнении этих условий можно записать, что выполняется приближенное равенство

$$\ln |R(i, B(i, k), i_{\text{шаг}})| - \ln |Z(i, B(i, k))| \approx \ln \frac{1}{\theta} + \ln |n(i, B(i, k), i_{\text{шаг}})| + A(i, k) y(m).$$

Как бы то ни было, когда на вход демодулятора поступает вектор отсчетов  $\mathbf{r}(i_{\text{шаг}})$ , тогда на его выходе при известном скрывающем сигнале  $\mathbf{z}$  будет вектор

$$\mathbf{R}_{\text{B}}(i_{\text{шаг}}) = (R_{\text{B}}(1, i_{\text{шаг}}) \ R_{\text{B}}(2, i_{\text{шаг}}) \ \dots \ R_{\text{B}}(k_Z N_{\Gamma}, i_{\text{шаг}})),$$

где

$$R_{\text{B}}(j, i_{\text{шаг}}) = \ln |R(m, B(m, k), i_{\text{шаг}})| - \ln |Z(m, B(m, k))|.$$

и при неизвестном скрывающем сигнале  $\mathbf{z}$  будет выполняться равенство

$$R_{\text{B}}(j, i_{\text{шаг}}) = \ln |R(m, B(m, k), i_{\text{шаг}})|,$$

где  $j \in \{1, 2, \dots, k_Z N_{\Gamma}\}$ , а зависимость между целыми числами  $m, k, j$  определяется следующими равенствами:

$$m = \left[ \frac{j-1}{N_\Gamma} \right] + 1,$$

$$k = ((j-1) \bmod N_\Gamma) + 1.$$

Однако на этом работа демодулятора не оканчивается: он таким же образом обрабатывает следующие  $W-1$  блоков отсчетов. В итоге он обрабатывает множество  $\{r(i_{\text{шаг}}), r(i_{\text{шаг}} + 1), \dots, r(i_{\text{шаг}} + W - 1))\}$  блоков отсчетов и формирует множество

$$\Psi(i_{\text{шаг}}) = \{R_B(i_{\text{шаг}}), \dots, R_B(i_{\text{шаг}} + W - 1)\},$$

которое передается декодеру канала.

Декодер канала, получив множество  $\Psi(i_{\text{шаг}})$ , каждый из его элементов обрабатывает одинаковым образом. Поэтому для примера далее показана обработка вектора  $R_B(i_{\text{шаг}})$  декодером канала.

Вектор  $R_B(i_{\text{шаг}})$  форматируется в матрицу  $D(i_{\text{шаг}})$  размером  $N_{RZ} \times (N_c + N_K)N_\Gamma$ :

$$D(i_{\text{шаг}}) = \begin{pmatrix} D(1,1,i_{\text{шаг}}) & D(1,2,i_{\text{шаг}}) & \dots & D(1,(N_c + N_K)N_\Gamma,i_{\text{шаг}}) \\ D(2,1,i_{\text{шаг}}) & D(2,2,i_{\text{шаг}}) & \dots & D(2,(N_c + N_K)N_\Gamma,i_{\text{шаг}}) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ D(N_{RZ},1,i_{\text{шаг}}) & D(N_{RZ},2,i_{\text{шаг}}) & \dots & D(N_{RZ},(N_c + N_K)N_\Gamma,i_{\text{шаг}}) \end{pmatrix},$$

$$D(i,j,i_{\text{шаг}}) = R_B(k,i_{\text{шаг}}),$$

где  $k \in \{1, 2, \dots, k_Z N_\Gamma\}$ , а зависимость между целыми числами  $i, j, k$  выглядит так:

$$i = \left( \left[ \frac{k-1}{N_\Gamma} \right] \bmod N_{RZ} \right) + 1,$$

$$j = \left[ \frac{k-1}{N_\Gamma N_{RZ}} \right] N_\Gamma + ((k-1) \bmod N_\Gamma) + 1.$$

Далее вычисляются суммы отдельно верхней половины строк матрицы  $D(i_{\text{шаг}})$  и нижней ее половины, в результате получаются два вектора-строки, представляющих собой соответствующие суммы, для удобства назовем их соответственно верхней и нижней. А после этого из верхней суммы вычитается нижняя, что дает вещественный вектор  $\delta(i_{\text{шаг}})$  длиной  $(N_c + N_K)N_\Gamma$ :

$$\delta(i_{\text{шаг}}) = (\delta(1,i_{\text{шаг}}) \delta(2,i_{\text{шаг}}) \dots \delta((N_c + N_K)N_\Gamma,i_{\text{шаг}})),$$

где

$$\delta(j,i_{\text{шаг}}) = \sum_{i=1}^{N_{RZ}/2} D(i,j,i_{\text{шаг}}) - \sum_{i=(N_{RZ}/2)+1}^{N_{RZ}} D(i,j,i_{\text{шаг}}).$$

Если  $\mathbf{R}_B(i_{\text{шаг}})$  содержит скрытый сигнал, то, выполняя такое вычитание, будет нивелировано влияние слагаемого  $\ln \theta^{-1}$ , которое в некотором роде является шумовым, так как приемнику оно неизвестно.

Оставшаяся шумовая составляющая, входящая в  $\delta(j, i_{\text{шаг}})$ , может быть представлена в виде следующей разности случайных величин:

$$\sum_{i=1}^{N_{\text{RZ}}/2} \ln |n(i+m, B(i+m, k), i_{\text{шаг}})| - \sum_{i=(N_{\text{RZ}}/2)+1}^{N_{\text{RZ}}} \ln |n(i+m, B(i+m, k), i_{\text{шаг}})|,$$

где  $m = \left\lfloor \frac{j-1}{N_{\Gamma}} \right\rfloor N_{\text{RZ}}$ ;  $k = ((j-1) \bmod N_{\Gamma}) + 1$ ;  $j \in \{1, 2, \dots, (N_c + N_k)N_{\Gamma}\}$ .

В обычных условиях можно ожидать, что амплитудные спектры шума для смежных блоков отсчетов аудиосигнала, принимаемого микрофоном, будут приближенно одинаковыми; например, можно ожидать приближенное равенство амплитудных спектров, полученных в результате дискретного преобразования Фурье векторов (1) и (2). Зачастую время, в течение которого состояние канала не меняется, называют временем когерентности канала. Если предположить, что оно не меньше времени передачи последовательности из  $N_{\text{RZ}}N_z$  отсчетов сигнала  $\mathbf{z}'$ , то шумовая составляющая в  $\delta(j, i_{\text{шаг}})$  будет близка к нулю; канал с такими свойствами еще называют каналом с блоковыми замираниями [15, 16]. При выполнении этого условия будет выполняться такое приближенное равенство:

$$\delta(j, i_{\text{шаг}}) \approx \sum_{i=1}^{N_{\text{RZ}}/2} A(i+m, k)y(u) - \sum_{i=(N_{\text{RZ}}/2)+1}^{N_{\text{RZ}}} A(i+m, k)y(u),$$

в котором  $j \in \{1, 2, \dots, (N_c + N_k)N_{\Gamma}\}$ , зависимость между целыми числами  $m, k, u, j$  определяется равенствами

$$m = \left\lfloor \frac{j-1}{N_{\Gamma}} \right\rfloor N_{\text{RZ}},$$

$$k = ((j-1) \bmod N_{\Gamma}) + 1,$$

$$u = ((i+m-1) \bmod N_{\text{RZ}}) + 1 + (k-1)N_{\text{RZ}} + \left\lfloor \frac{i+m-1}{N_{\text{RZ}}} \right\rfloor N_{\text{RZ}}N_{\Gamma}.$$

К каждому элементу вектора  $\delta(i_{\text{шаг}})$  применяется функция

$$\text{sign}(a) = \begin{cases} 1, & \text{если } a \geq 0, \\ -1, & \text{если } a < 0, \end{cases}$$

что дает вектор  $\mathbf{s}(i_{\text{шаг}})$  длиной  $(N_c + N_k)N_{\Gamma}$ :

$$\mathbf{s}(i_{\text{шаг}}) = (s(1, i_{\text{шаг}}) \quad s(2, i_{\text{шаг}}) \quad \dots \quad s((N_c + N_k)N_{\Gamma}, i_{\text{шаг}})),$$

где  $s(i, i_{\text{шаг}}) \in \{1, -1\}$ .

Для выполнения дальнейших действий вектор  $\mathbf{S}(i_{\text{шаг}})$  выгодно представить в виде матрицы

$$\mathbf{S}(i_{\text{шаг}}) = \begin{pmatrix} S(1,1,i_{\text{шаг}}) & S(1,2,i_{\text{шаг}}) & \cdots & S(1,N_{\Gamma},i_{\text{шаг}}) \\ S(2,1,i_{\text{шаг}}) & S(2,2,i_{\text{шаг}}) & \cdots & S(2,N_{\Gamma},i_{\text{шаг}}) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ S(N_{\text{с}} + N_{\text{к}},1,i_{\text{шаг}}) & S(N_{\text{с}} + N_{\text{к}},2,i_{\text{шаг}}) & \cdots & S(N_{\text{с}} + N_{\text{к}},N_{\Gamma},i_{\text{шаг}}) \end{pmatrix},$$

в которой

$$S(i,j,i_{\text{шаг}}) = s(k,i_{\text{шаг}}),$$

где  $k \in \{1, 2, \dots, (N_{\text{с}} + N_{\text{к}})N_{\Gamma}\}$ , а зависимость между  $i, j, k$  определяется следующими равенствами:

$$i = \left[ \frac{k-1}{N_{\Gamma}} \right] + 1,$$

$$j = ((k-1) \bmod N_{\Gamma}) + 1.$$

Теперь вычислим значение взаимно корреляционной функции, между последовательностью Голда и теми последовательностями, которые извлечены из  $\mathbf{R}_{\text{В}}(i_{\text{шаг}})$  – строками матрицы  $\mathbf{S}(i_{\text{шаг}})$ . Для этого используем матрицу  $\mathbf{G}$  размером  $N_{\Gamma} \times 2$ , составленную из использованных передатчиком последовательностей Голда  $\mathbf{g}_1, \mathbf{g}_2$ :

$$\mathbf{G} = \begin{pmatrix} G(1,1) & G(1,2) \\ G(2,1) & G(2,2) \\ \vdots & \vdots \\ G(N_{\Gamma},1) & G(N_{\Gamma},2) \end{pmatrix},$$

где  $G(i,j) = g(j,i)$ . Матрица  $\mathbf{G}$  слева умножается на матрицу  $\mathbf{S}(i_{\text{шаг}})$ , что дает матрицу  $\mathbf{Y}(i_{\text{шаг}})$  размером  $(N_{\text{с}} + N_{\text{к}}) \times 2$

$$\mathbf{Y}(i_{\text{шаг}}) = \begin{pmatrix} Y(1,1,i_{\text{шаг}}) & Y(1,2,i_{\text{шаг}}) \\ Y(2,1,i_{\text{шаг}}) & Y(2,2,i_{\text{шаг}}) \\ \vdots & \vdots \\ Y(N_{\text{с}} + N_{\text{к}},1,i_{\text{шаг}}) & Y(N_{\text{с}} + N_{\text{к}},2,i_{\text{шаг}}) \end{pmatrix} = \mathbf{S}(i_{\text{шаг}})\mathbf{G}.$$

Далее вычисляется вектор

$$\boldsymbol{\gamma}(i_{\text{шаг}}) = (\gamma(1,i_{\text{шаг}}) \quad \gamma(2,i_{\text{шаг}}) \quad \cdots \quad \gamma(N_{\text{с}} + N_{\text{к}},i_{\text{шаг}})),$$

где

$$\gamma(i, i_{\text{шаг}}) = \begin{cases} 1, & \text{если } Y(i, 1, i_{\text{шаг}}) < Y(i, 2, i_{\text{шаг}}), \\ -1, & \text{если } Y(i, 1, i_{\text{шаг}}) \geq Y(i, 2, i_{\text{шаг}}). \end{cases}$$

Каждая из  $Y(i, 1, i_{\text{шаг}})$ ,  $Y(i, 2, i_{\text{шаг}})$  – это есть величина взаимно корреляционной функции, потому правило вычисления элементов вектора  $\gamma(i_{\text{шаг}})$  опирается на то, что большее из значений  $Y(i, 1, i_{\text{шаг}})$ ,  $Y(i, 2, i_{\text{шаг}})$  указывает на большее количество совпадений между принятыми последовательностями и последовательностями Голда  $\mathbf{g}_1$ ,  $\mathbf{g}_2$  соответственно.

Решение об установлении синхронизации будет положительным, если будут выполняться следующие условия, алгебраически зависящие от величины  $i_{\text{шаг}}$  номера шага. Во-первых, должно выполняться неравенство

$$\rho(i_{\text{шаг}}) \geq \rho_K,$$

где  $\rho_K$  – пороговое значение, удовлетворяющее неравенству  $\rho_K \leq N_K$ ;  $\rho(i_{\text{шаг}})$  – скалярное произведение вектора  $\beta$ , определяющего использованную при передаче последовательность Касами, и первых  $N_K$  элементов вектора  $\gamma(i_{\text{шаг}})$ :

$$\rho(i_{\text{шаг}}) = \sum_{i=1}^{N_K} \gamma(i, i_{\text{шаг}}) \beta(i).$$

Во-вторых, значение  $\rho(i_{\text{шаг}})$  должно быть наибольшим среди всех полученных из остальных элементов множества  $\Psi(i_{\text{шаг}})$ , т. е. должно выполняться равенство

$$\rho(i_{\text{шаг}}) = \max \{ \rho(i_{\text{шаг}}), \rho(i_{\text{шаг}} + 1), \dots, \rho(i_{\text{шаг}} + W - 1) \},$$

где величины  $\rho(i_{\text{шаг}} + j)$  при  $j \in \{0, 1, \dots, W - 1\}$  получены после обработки соответствующих остальных векторов  $\mathbf{R}_B(i_{\text{шаг}} + j) \in \Psi(i_{\text{шаг}})$ .

В-третьих, сумма

$$\sum_{i=1}^{N_K} \left( N_{\Gamma} - Y \left( i, \frac{\gamma(i, i_{\text{шаг}}) + 1}{2} + 1, i_{\text{шаг}} \right) \right)^2$$

должна быть наименьшей, в сравнении с такими же суммами, но полученными для всех остальных элементов множества  $\{ \rho(i_{\text{шаг}}), \rho(i_{\text{шаг}} + 1), \dots, \rho(i_{\text{шаг}} + W - 1) \}$ . В таком варианте третье условие является независимым от результатов применения двух предыдущих условий, что может приводить к увеличению времени установления синхронизации. Поэтому для уменьшения времени установления синхронизации может быть выгоден другой вариант третьего условия: выполнять сравнение не со всеми остальными элементами множества  $\{ \rho(i_{\text{шаг}}), \rho(i_{\text{шаг}} + 1), \dots, \rho(i_{\text{шаг}} + W - 1) \}$ , а только с равными  $\rho(i_{\text{шаг}})$  элементами. Второй вариант третьего условия делает его зависимым от результатов использования предыдущих условий: если в результате их применения среди остальных элементов не окажется равных  $\rho(i_{\text{шаг}})$ , то применение этого условия никак не отразится на принятии решения об установлении синхронизации.

Конечно, даже при выполнении всех условий не исключается ситуация наличия нескольких элементов в множестве  $\{ i_{\text{шаг}}, \dots, i_{\text{шаг}} + W - 1 \}$ , которые будут удовлетворять сразу этим условиям; тем не менее выбор будет сделан в пользу  $i_{\text{шаг}}$ . Если же величина  $i_{\text{шаг}}$  не удовлетворяет

данным условиям, то декодер канала запрашивает от демодулятора множество  $\Psi(i_{\text{шаг}} + 1)$  и такая же проверка выполняется уже для множества  $\{i_{\text{шаг}} + 1, \dots, i_{\text{шаг}} + W\}$  и т. д.

Когда для величины  $i_{\text{шаг}}$  все перечисленные условия выполняются, тогда считается, что синхронизация установлена на блоке отсчетов  $r(i_{\text{шаг}})$ , т. е. приемник будет считать, что этот блок отсчетов содержит переданный сигнал. В таком случае выполняется декодирование последних  $N_c$  элементов вектора  $\gamma(i_{\text{шаг}})$ . Для проведения процесса декодирования вычисляется вектор

$$\mu(i_{\text{шаг}}) = (\mu(1, i_{\text{шаг}}) \quad \mu(2, i_{\text{шаг}}) \quad \dots \quad \mu(N_c, i_{\text{шаг}})),$$

составленный из 0 и 1 по следующему правилу:

$$\mu(i, i_{\text{шаг}}) = \frac{\gamma(N_K + i, i_{\text{шаг}}) + 1}{2}.$$

Вектор  $\mu(i_{\text{шаг}})$  рассматривается декодером канала как искаженное шумом кодовое слово  $(N_c, N_x)$  БЧХ кода. Этот вектор подвергается БЧХ декодированию, что даст битовый вектор

$$x'(i_{\text{шаг}}) = (x'(1, i_{\text{шаг}}) \quad x'(2, i_{\text{шаг}}) \quad \dots \quad x'(N_x, i_{\text{шаг}})),$$

где  $x'(i, i_{\text{шаг}}) \in \{0, 1\}$ . Когда синхронизация установлена, а количество произошедших ошибок меньше  $N_t$ , тогда вектор  $x'(i_{\text{шаг}})$  совпадает с переданным информационным вектором  $x$ .

## Заключение

Предложена модель построения, внедрения и восстановления цифрового маркера при передаче через воздушный аудиоканал. Исследована устойчивость цифрового маркирования при передаче стегоаудиосигнала в условиях шумов и информационно-технических воздействий. Модель имеет следующие характерные черты. Во-первых, ее можно использовать даже при передаче стегоаудиосигнала через воздушный аудиоканал. Во-вторых, внедрение и восстановление цифрового маркерного сигнала возможно и в том случае, когда скрывающий сигнал является речевым. В-третьих, синхронизационная часть скрываемого сигнала во времени передается отдельно. В-четвертых, внедрение скрываемого сигнала выполняется в неперекрывающиеся блоки отсчетов скрывающего сигнала. В-пятых, применяется правило вынесения решения об установлении синхронизации, основанное на проверке трех условий, которые обычно ликвидируют ситуации неоднозначного выбора.

## Библиографический список

1. Petitcolas F.A.P. Information hiding – a survey / F.A.P. Petitcolas, R.J. Anderson, M.G. Kuhn // Proceedings of the IEEE. – 1999. – Vol. 87, N 7. – P. 1062–1078.
2. Hanspach M. On covert acoustical mesh networks in air / M. Hanspach, M. Goetz // Journal of Communications. – 2013. – Vol. 8, N 11. – P. 758–767.
3. Мирончиков Е. Т. Методика построения цифровых водяных знаков, устойчивых к сбоям синхронизации / Е. Т. Мирончиков, М. В. Гофман, С. О. Вихарев // Изв. Петерб. ун-та путей сообщения. – 2016. – Т. 13, вып. 1 (46). – С. 60–67.

4. Wu S. Efficiently self-synchronized audio watermarking for assured audio data transmission / S. Wu, J. Huang, D. Huang, Y. Q. Shi // *IEEE Transactions on Broadcasting*. – 2005. – Vol. 51, N 1. – P. 69–76.
5. Hua G. Twenty years of digital audio watermarking – a comprehensive review / G. Hua, J. Huang, Y. Q. Shi, J. Goh, V. L. Thing // *Signal Processing*. – 2016. – Vol. 128. – P. 222–242.
6. Roy S. An efficient and blind audio watermarking technique in DCT domain / S. Roy, N. Sarkar, A. K. Chowdhury, S. M. A. Iqbal // 18th Intern. Conference on Computer and Information Technology (ICCIT). – IEEE. – 2015. – P. 362–367.
7. Cui D. Design and Performance Evaluation of Robust Digital Audio Watermarking under Low Bits Rates / D. Cui, Y. Gong, M. Liu // 2nd Intern. Conference on Information Science and Control Engineering (ICISCE). – IEEE. – 2015. – P. 194–197.
8. Zhang Z. An Audio Covert Communication System for Analog Channels / Z. Zhang, X. Wu // Intern. Conference on Electrical and Control Engineering (ICECE). – IEEE. – 2010. – P. 3279–3282.
9. Гофман М. В. Методика скрытой передачи данных при связи через воздушный аудиоканал / М. В. Гофман // Труды СПИИРАН. – 2017. – Вып. 2 (51). – С. 97–122.
10. Torrieri D. Principles of spread-spectrum communication systems / D. Torrieri. – New York et al. : Springer, 2015. – 641 p.
11. Питерсон У. Коды, исправляющие ошибки : монография / У. Питерсон. – М. : Мир, 1976. – 594 с.
12. Кудряшов Б. Д. Основы теории кодирования : учеб. пособие / Б. Д. Кудряшов. – СПб. : БХВ-Петербург, 2016. – 400 с.
13. ГОСТ Р 54711–2011. Звуковое вещание цифровое. Кодирование сигналов звукового вещания с сокращением избыточности для передачи по цифровым каналам связи. MPEG-1 ч. III (MPEG-1 audio). – М. : Стандартинформ, 2011.
14. Spanias A. Audio signal processing and coding / A. Spanias, T. Painter, V. Atti. – New Jersey (USA) : John Wiley & Sons, 2007. – 464 p.
15. Collins A. Dispersion of the coherent MIMO block-fading channel / A. Collins, Y. Polyanskiy // IEEE Intern. Symposium on Information Theory (ISIT). – IEEE. – 2016. – P. 1068–1072.
16. Гофман М. В. Помехоустойчивое пространственное блочное кодирование / М. В. Гофман. – Saarbrücken (Germany) : LAP Lambert Academic Publishing, 2013. – 176 с.

## References

1. Petitcolas F. A. P., Anderson R. J. & Kuhn M. G. Information hiding – a survey. *Proceedings of the IEEE*, 1999, vol. 87, no. 7, pp. 1062–1078.
2. Hanspach M. & Goetz M. On covert acoustical mesh networks in air. *Journal of Communications*, 2013, vol. 8, no. 11, pp. 758–767.
3. Myronchikov Y. T., Gofman M. V. & Vykhrev S. O. Metodyka postroyeniya tsifrovyykh vodyanykh znakov, ustoychivyykh k sboyam synkhronizatsii [The construction method of digital watermarks, tolerant to synchronization failure]. *Proceeding of Petersburg Transport University*, 2016, vol. 13, issue 1 (46), pp. 60–67. (In Russian)
4. Wu S., Huang J., Huang D. & Shi Y. Q. Efficiently self-synchronized audio watermarking for assured audio data transmission. *IEEE Transactions on Broadcasting*, 2005, vol. 51, no. 1, pp. 69–76.
5. Hua G., Huang J., Shi Y. Q., Goh J. & Thing V. L. Twenty years of digital audio watermarking – a comprehensive review. *Signal Processing*, 2016, vol. 128, pp. 222–242.
6. Roy S., Sarkar N., Chowdhury A. K. & Iqbal S. M. A. An efficient and blind audio watermarking technique in DCT domain. *18th International Conference on Computer and Information Technology (ICCIT)*, IEEE, 2015, pp. 362–367.



7. Cui D., Gong Y. & Liu M. Design and Performance Evaluation of Robust Digital Audio Watermarking under Low Bits Rates. *2nd International Conference on Information Science and Control Engineering (ICISCE)*, IEEE, 2015, pp. 194–197.
8. Zhang Z. & Wu X. An Audio Covert Communication System for Analog Channels. *International Conference on Electrical and Control Engineering (ICECE)*, IEEE, 2010, pp. 3279–3282.
9. Gofman M. V. Metodyka skrytoy peredachy dannykh pry svyazy cherez vozdushniy audiokanal [The method of hidden data transmission via air audio communication channel]. *Trudy SPIIRAN [SPIIRAS Proceedings]*, 2017, vol. 2 (51), pp. 97–122. (In Russian)
10. Torrieri D. *Principles of spread-spectrum communication systems*. New York et al., Springer, 2015, 641 p.
11. Peterson W. & Weldon E. *Kody, ispravlyayushiyeh oshybykh [Error-correcting codes]*. Moscow, Mir Publ., 1976, 594 p. (In Russian)
12. Kudryashov B. D. *Osnovy teorii kodyrovaniya [The foundations of coding theory]*. Saint Petersburg, BHV-Petersburg Publ., 2016, 400 p. (In Russian)
13. *GOST R 54711–2011: Zvukovoye veshaniye tsifrovoye. Kodyrovaniye sygnalov zvukovogo veshaniya s sokrasheniyem izbytochnosti dlya peredachy po tsifrovym kanalam svyazy. MPEG-1 chast III (MPEG-1 audio)*. [State Standard R 54711–2011. Digital sound broadcasting. Redundancy-reduction coding of sound broadcasting signals for digital communication channels. MPEG-1 part 3 (MPEG-1 audio)]. Moscow, Standartinform Publ., 2011. (In Russian)
14. Spanias A., Painter T. & Atti V. *Audio signal processing and coding*. New Jersey (USA), John Wiley & Sons Publ., 2007, 464 p.
15. Collins A. & Polyanskiy Y. Dispersion of the coherent MIMO block-fading channel. *IEEE International Symposium on Information Theory (ISIT)*. – IEEE, 2016, pp. 1068–1072.
16. Gofman M. V. Pomekhoustoychyvoye prostranstvennoye blokoye kodyrovaniye [Protective space block coding]. Saarbrücken (Germany), LAP Lambert Academic Publishing, 2013, 176 p. (In Russian)

\*ГОФМАН Максим Викторович – канд. техн. наук, доцент, maxgof@gmail.com; КОРНИЕНКО Анатолий Адамович – доктор техн. наук, профессор, заведующий кафедрой; КОТЕНКО Алексей Геннадьевич – доктор техн. наук, доцент, заведующий кафедрой; КУСТОВ Владимир Николаевич – доктор техн. наук, профессор; МИРОНЧИКОВ Евгений Тимофеевич – доктор техн. наук, профессор (Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I).

УДК 625.80

**Ю. А. Канцибер, А. Б. Пономарев****ВОДНО-БАЛАНСОВЫЕ РАСЧЕТЫ ХАРАКТЕРИСТИК ДРЕНАЖА  
НА ОСУШАЕМЫХ ТЕРРИТОРИЯХ**

Дата поступления: 30.05.2017

Решение о публикации: 10.06.2017

**Аннотация**

**Цель:** Вывод расчетных зависимостей для определения продолжительности осушения грунтов и расстояний между несовершенными дренами. **Методы:** Применен метод водного баланса, решены уравнения водного баланса грунтовых вод в осушаемых грунтах, учитывающие приток воды к ним. **Результаты:** Полученные зависимости позволяют с большей точностью оценивать характеристики неглубокого дренажа (до 3 м) в зоне избыточного увлажнения грунтов: продолжительность осушения и объемы дренажного стока в период как «стабилизации» режима грунтовых вод, так и в эксплуатационный. **Практическая значимость:** Предложенные зависимости рекомендуется использовать для расчетов параметров очистных сооружений дренажного стока.

**Ключевые слова:** Осушение, зона избыточного увлажнения, несовершенная дрена, режим грунтовых вод.

**Yuriy A. Kantsyber**, Cand. Eng. Sci., senior research assistant, associate professor, kanziber3@yandex.ru; \***Andrey B. Ponomarev**, Cand. Eng. Sci., associate professor, pol1nom@yandex.ru (Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University) WATER BALANCE LAND DRAINAGE PERFORMANCE CALCULATION IN DRAINAGE TERRITORIES

**Summary**

**Objective:** To derive estimated dependencies in order to determine the duration of ground drainage and the intervals between incomplete drains. **Methods:** The method of water balance was applied; the equations of ground water hydrological balance in drainage territories were solved, taking into account the inflow of the latter. **Results:** The obtained dependencies make it possible to evaluate the characteristics of shallow drainage (up to 3 m) more accurately in the zone of excessive moistening of ground: drainage duration and the volume of drainage water both in the period of “stabilization” of groundwater regime and operational period. **Practical importance:** It is recommended to use the obtained dependencies for parameters’ determination of drainage water purification plants.

**Keywords:** Drainage, excessive moistening zone, incomplete drain, groundwater regime.

**Введение**

На «закрытых» площадях селитебных и производственных территорий (здания, сооружения, дороги с твердым покрытием и др.) выполняется сопутствующий дренаж, который прокладывается одновременно в траншеях кабельных и водонесущих коммуникаций. При их общей плотности 400–500 м/га

[1] степень дренирования «закрытых» территорий с ограниченным притоком воды к дренажу, как правило, достаточна для своевременного их осушения. На других площадях применяются другие типы дренажей (систематический, кольцевой и др.) [2].

При проектировании дренажа различного назначения, а также систем очистки дренажного стока необходима оценка его характери-

стик [3]. Одной из них является продолжительность понижения уровня грунтовых вод (УГВ) до нормы осушения. Ей соответствует время «стабилизации» ( $\tau$ ) неустановившегося режима грунтовых вод до стационарного, наблюдаемого в эксплуатационный период.

По С. Ф. Аверьянову [4],

$$\tau \approx \frac{\delta \cdot L^2}{K \cdot h_c \cdot \alpha_0}, \quad (1)$$

где  $\delta$  – коэффициент водоотдачи грунтов;  $L$  – дальность действия дрен, м;  $K$  – коэффициент фильтрации грунтов, м/сут;  $\alpha_0$  – коэффициент несовершенства дренажа по степени вскрытия водоносного пласта (висячести);  $h_c = 0,5 \times (H_c + 2S) = 0,5H_c + S$  – средняя мощность потока грунтовых вод в период «стабилизации», м;  $S$  – расстояние от дрены до водоупорных грунтов, м.

Средний напор воды над дреной равен

$$H_c = 0,5 (H_1 + H_2),$$

здесь  $H_1$  – начальный напор воды над дреной, м;  $H_2 = (t - h_n)$  – конечный напор воды над дреной ( $t$  – глубина дренажа,  $h_n$  – норма осушения), м.

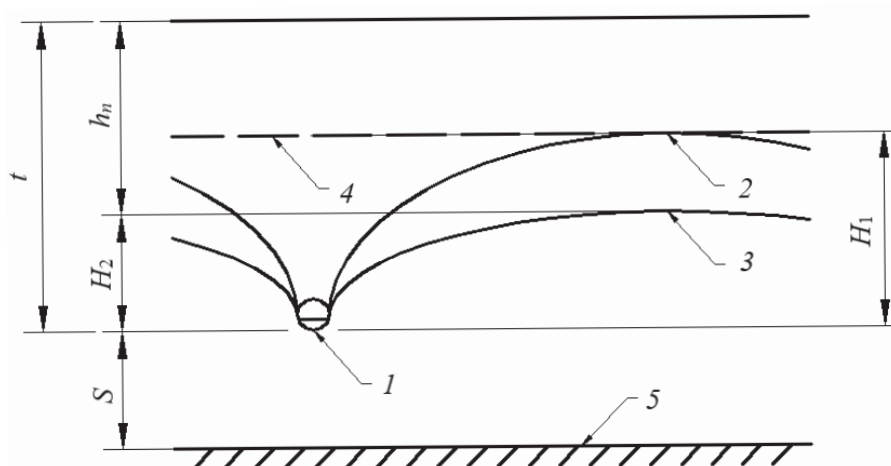
Геометрические размеры  $H_1, H_2, h_n, t, S$  показаны на рисунке.

### Расчетные зависимости

В формуле (1) не учитывается приток воды к грунтовым водам, что не отвечает реальным условиям, характерным для зоны избыточного увлажнения, и в ряде случаев приводит к значительным погрешностям (до 50–100 % и более). Она применима, как полагал С. Ф. Аверьянов [4], прежде всего для расчетов глубокого дренажа (более 3 м) в аридной зоне с минимальным инфильтрационным притоком воды.

Поэтому для оценки продолжительности осушения в зоне избыточного увлажнения предлагается использовать приведенные ниже зависимости, полученные в результате решения уравнения водного баланса грунтовых вод в осушаемых грунтах для двух фаз периода «стабилизации».

В первую фазу неустановившегося режима осушения продолжительностью  $t_1$ , т. е. до момента окончания формирования кривой депрессии между несовершенными дренами, **максимальный** удельный приток воды в траншею из так называемых зон «высачивания»



Расчетная схема несовершенного систематического дренажа:

- 1 – трубчатая дрена; 2 – положение кривой депрессии после завершения первой фазы осушения; 3 – положение кривой депрессии после завершения второй фазы осушения; 4 – уровень грунтовых вод до строительства дренажа; 5 – водоупор

(выклинивания) на ее стенках и дне, который будет наблюдаться в процессе строительства, примерно составит ( $\text{м}^2/\text{сут}$  на 1 погонный метр (1 п. м) при градиенте напора  $I \approx 1$ )

$$q_m = 2K(H_1 + S)\alpha \cdot I \approx 2K(H_1 + S)\alpha. \quad (2)$$

Как показали расчеты и опыт строительства дренажа, максимальный приток воды в траншею (см. (2)) наблюдается в начале первой фазы, но не более чем в течение одних суток. Продолжительность строительства дренажа, как правило, значительно превышает продолжительность первой фазы, а в легких грунтах – всего периода «стабилизации».

Из преобразованной формулы С. Ф. Авьянова, которая используется в практических расчетах дренажа [5], следует, что **к концу** первой фазы двухсторонний приток воды к несовершенным горизонтальным дренам составит ( $\text{м}^2/\text{сут}$  на 1 п. м)

$$q = \frac{4K \cdot H_1^2 \left(1 + \frac{2S}{H_1}\right) \alpha}{B},$$

$$\alpha = \frac{1}{1 + \frac{2S}{B} \cdot 2,94 \cdot \log \frac{1}{\sin\left(\frac{\pi D}{2S}\right)}},$$

где  $B$  – расстояние между дренами, м;  $D$  – диаметр дрена с обсыпкой (ЗФМ), м.

Необходимо отметить, что целесообразность использования в расчетах дренажа более адекватных моделей процесса фильтрации воды в грунтах и теоретически обоснованных формул вызывает сомнение, так как ошибки определения их параметров, в том числе фильтрационных характеристик грунтов, достигают 200–300 % и более (в том числе из-за их неоднородности) [1, 4–7].

**Средний** двухсторонний приток воды к несовершенной дрене, учитывая нелинейный характер изменения притока воды в первую фазу, будет примерно равен

$$q_c \approx (1 - \varphi)(q_m + q) = 2K\alpha(1 - \varphi) \times \left[ H_1 + S + \frac{2H_1^2 \left(1 + \frac{2S}{H_1}\right)}{B} \right], \quad (3)$$

здесь  $\varphi$  – коэффициент формы кривой депрессии; для эллипса  $\varphi = \pi/4 = 0,78$ , для параболы  $\varphi \approx 0,6–0,7$  [8].

Уравнение водного баланса грунтовых вод в эту фазу приведем в виде

$$q_c \cdot t_1 = 0,5 \cdot B \cdot \omega \cdot t_1 + \delta \cdot B \cdot (1 - \varphi) \cdot H_1, \quad (4)$$

в котором  $\omega$  – расчетная интенсивность притока к грунтовым водам, м/сут;  $t_1$  – продолжительность первой фазы, сут.

Из формул (3), (4) вытекает, что продолжительность первой фазы составит (в сут)

$$t_1 = \frac{\delta B(1 - \varphi)H_1}{q_c - 0,5\omega B}. \quad (5)$$

Для второй фазы «стабилизации» при понижении УГВ в середине между дренами имеем

$$t_2 = \frac{\delta B^2 M}{4K \cdot H_c^2 \left(1 + \frac{2S}{H_c}\right) \alpha - \omega B^2}, \quad (6)$$

где  $t_2$  – продолжительность второй фазы, сут;  $M = \varphi(H_1 - H_2)$ , м.

Таким образом, продолжительность периода «стабилизации» до перехода к установившемуся режиму грунтовых вод с конечным положением УГВ ( $H_2$ ) будет равна (сут)

$$T = t_1 + t_2. \quad (7)$$

При выводе расчетных формул приняты следующие допущения:

– форма кривой депрессии УГВ в период «стабилизации», т. е. на спаде цикла действия дренажа (цикла осушения), в основном близка

к эллипсу, реже – к параболе четвертой степени [4, 7];

– водопропускная способность дрен и траншейной засыпки принимается с «запасом» больше расчетного притока воды к ним. Из-за откачки воды из траншей уровень воды в дрене (на дне траншеи) будет невысоким (до 5–10 см), и в расчетах его можно не принимать во внимание;

– не учитываются дополнительные сопротивления поступлению воды в дрены через защитно-фильтрующие материалы (в том числе их обсыпку), так как они значительно меньше, чем фильтрационные сопротивления на степень вскрытия водоносного пласта.

Для определения расстояния между горизонтальными дренами применяются, как правило, различные формулы для установившегося режима грунтовых вод, который будет наблюдаться в **эксплуатационный период** после «стабилизации» УГВ (С. К. Абрамов, В. М. Шестаков, А. Я. Олейник, С. Ф. Аверьянов и др.). Однако более точные результаты расчетов параметров дренажа могут быть получены исходя из учета допустимых сроков осушения при неустановившемся режиме грунтовых вод. Для этого можно использовать, например, уравнение (6), решая его методом подбора относительно параметра  $B$ . В отличие от применяемых формул в нем учитываются инфильтрация осадков, выпадающих в процессе понижения УГВ в допустимый срок осушения, а также испарение и дополнительный приток воды.

### Оценка расчетного притока и дренажного стока воды

Расчетную интенсивность притока воды к грунтовым водам на осушаемой территории в соответствии с водно-балансовым методом [9] можно представить в виде суммы интенсивностей инфильтрационного ( $\omega_{\phi}$ ), бокового ( $\omega_{\sigma}$ ), восходящего ( $\omega_{\text{в}}$ ) и дополнительного ( $\omega_{\text{д}}$ ) притоков воды (м/сут), т. е.

$$\omega = \omega_{\phi} + \omega_{\sigma} + \omega_{\text{в}} + \omega_{\text{д}}. \quad (8)$$

Интенсивность **инфильтрационного притока** воды зависит от продолжительности периода осушения, интенсивности выпадения осадков расчетной обеспеченности и испарения в этот период, а также УГВ и предшествующей влажности грунтов зоны аэрации. При отрицательных значениях  $\omega$  наблюдается превышение испарения из зоны аэрации над осадками и другими составляющими уравнения (8). Период осушения (допустимый срок осушения), в течение которого на дренируемых площадях при выпадении интенсивных (расчетных) осадков необходимо понизить УГВ до нормы осушения, изменяется в зависимости от характера использования территории от 3 до 10 сут и более.

Для «открытых» застраиваемых территорий (ЗТ) норма осушения составляет 1,5–2 м [1]. Для сельскохозяйственных земель, парков, лесопарков, скверов, газонов она изменяется в пределах от 0,4 (весна, осень) до 1,1 м (вегетационный период) [10]. Под зданиями и сооружениями норма осушения принимается не менее чем на 0,5 м ниже отметки заложения подошвы фундамента, достигая 10–15 м.

Следует отметить, что величина инфильтрационного притока воды 10%-ной обеспеченности в Северо-Западной зоне РФ (повторяемость 1 раз в 10 лет) изменяется от 0,002–0,004 м/сут (пастбища, парки, сады и т. д.) до 0,01–0,02 м/сут (пашня, земляное полотно железных дорог) [9, 11].

На «закрытых» площадях ЗТ с существенно ограниченной инфильтрацией осадков можно приближенно принять  $\omega_{\phi} = \beta \cdot \omega_{\phi(0)}$  (где  $\omega_{\phi(0)}$  – интенсивность инфильтрационного притока на «открытых» площадях;  $\beta$  – доля «водопроницаемой» (открытой) поверхности, всегда имеющейся на «закрытой» площади; принимается по исполнительной документации, планам застройки и др.). Для «старых» городских районов и производственных площадок ориентировочно  $\beta = 0,1–0,2$ , для жилых районов (новостроек) – 0,4–0,6.

**Боковой** приток грунтовых вод в основном перехватывается на границе территории нагорными каналами, ловчими дренами и 1–3 бли-

жайшими к границе дренами. Таким образом, его, очевидно, следует учитывать только для периферийной части осушаемой площади.

Интенсивность **восходящего притока** грунтово-напорных вод из водоносного пласта, перекрытого слабоводопроницаемыми грунтами, можно приближенно определить, например, в соответствии с указаниями [8].

Интенсивность **дополнительного притока воды**, обусловленного неизбежными потерями воды из водонесущих коммуникаций, проложенных на осушаемых площадях, зависит от протяженности или плотности водонесущих коммуникаций и удельных утечек воды [1].

**Объем дренажного стока** с осушаемого участка площадью  $F$  ( $\text{м}^2$ ) в период «стабилизации» можно определить в виде суммы объемов (в  $\text{м}^3$ ) уменьшения запаса грунтовых вод при понижении их уровня (напора над дренаем) и притока воды к грунтовым водам за этот же период  $T$ , т. е.

$$W_c = F [\delta \cdot (H_1 - H_2) + \omega \cdot T].$$

Среднегодовой объем дренажного стока ( $W$ ) на землях атмосферного водного питания зависит в основном от осадков, выпадающих в теплый и холодный периоды года ( $W_{от}$ ) [12], и утечек воды из водонесущих коммуникаций ( $W_y$ ), к которым следует отнести прежде всего ливневую канализацию и водопроводную сеть. Причем объемы утечек из бытовой канализации и водопроводной сети значительно меньше, чем из ливневой [1].

Утечки из ливневой канализации в течение года изменяются крайне неравномерно и связаны непосредственно с режимом выпадения осадков и снеготаянием. Зимой (при отрицательных температурах воздуха) и в «сухие» периоды весны–осени они отсутствуют, так как нет дождевого стока. Дождевой сток в ливневой сети, так же как и в дренажных системах и небольших временных водотоках, наблюдается, как правило, только при выпадении стокообразующих осадков, т. е. при их

суточной сумме 1–2 мм и более [13]. Меньшие осадки задерживаются растительностью, расходуются на впитывание, испарение, аккумуляцию на поверхности и в понижениях.

По данным [14], например, для Санкт-Петербурга среднее количество дней со стокообразующими осадками (свыше 2 мм в сутки) в теплый период (IV–X) составляет в среднем  $N = 68$  сут. Суммарное количество таких дней зимой, когда наблюдаются оттепели и зимние паводки, – 15–20 сут, продолжительность весеннего снеготаяния на застроенной территории – 10–15 сут. Таким образом, суммарная продолжительность талового и дождевого стоков в ливневой сети в среднем за год составит  $N = 90$ –100 сут, а объем утечек воды из нее в дренаж будет равен (в  $\text{м}^3$ )

$$W_{л} = q_{л} \cdot N \cdot P,$$

где  $q_{л}$  – удельные утечки воды [1, табл. 19],  $\text{м}^3/\text{сут}$  на 1 км сети;  $P$  – протяженность канализационной сети на осушаемой территории, км.

С учетом утечек из водопроводной сети и бытовой канализации, которых значительно меньше, чем из ливневой сети [1], среднегодовой объем дренажного стока (в  $\text{м}^3$ ) примерно составит

$$W_{э} \approx W_{от} + W_y = W_{от} + (1,1 - 1,2) \cdot W_{л},$$

здесь  $W_{от}$  – объем дренажного стока с «открытых» территорий,  $\text{м}^3$ .

С «закрытых» территорий  $W_{зт} = \beta \cdot W_{от}$ .

**Вероятный** объем дренажного стока в многоводный год  $p\%$ -ной вероятности превышения будет приблизительно равен (в  $\text{м}^3$ )

$$W_{p\%} = K_{p\%} \cdot W_{э},$$

здесь  $K_{p\%}$  – ордината кривой обеспеченности  $p\%$ -ной вероятности превышения. Так, при  $p = 10\%$   $C_v = 0,25$  и  $C_s/C_v = 2$   $K_{10\%} = 1,33$  [15].

## Тестирование и сравнительные расчеты

Анализ сравнительных расчетов продолжительности периода «стабилизации» при различной водопроницаемости грунтов, расстояний между дренами и интенсивности расчетного притока воды к ним показал:

1. На продолжительность «стабилизации» режима грунтовых вод значительное влияние оказывает интенсивность притока воды к ним. В «сухие» периоды, т. е. при превышении испарения над осадками, она примерно в 2–4 раза меньше, чем во влажные.

При интенсивности притока свыше 0,004 м/сут понижение УГВ в легких суглинках и пылеватых супесях ( $K \leq 0,1$  м/сут) до нормы осушения не достигается при расстояниях между дренами больше 10 м. Для повышения эффективности действия дренажа в слабопроницаемых грунтах на сельскохозяйственных землях необходимо проведение дополнительных мероприятий, например агротехнических (глубокое рыхление, кротование и др.), что подтверждается результатами полевых исследований [7, 9].

2. При допустимой продолжительности периода «стабилизации» 10 сут и  $\omega = 0,004$  м/сут необходимое расстояние между дренами в легких супесях и мелкозернистых песках составит 30 м, в среднезернистых песках – 45 м. При  $T_{\text{доп}} = 5$  сут и  $\omega = 0,002$  м/сут его следует уменьшить соответственно до 20 и 30 м.

3. Для повышения гидрологической эффективности действия дренажа его глубину следует принять ниже нормы осушения не менее чем на 0,3 м. При этом увеличивается напор воды над дренами, а продолжительность периода «стабилизации» сокращается на 10–20 % (по сравнению с вариантом  $t = h_{\text{в}}$ ).

4. Продолжительность периода «стабилизации», вычисленная по формуле (1), на 50–100 % превышает результаты расчетов по формулам (5), (7), что в значительной мере обусловлено неучетом формы кривой депрессии, существенно завышающим результаты расчетов по (1). По опытным данным [7] она

примерно в 1,5–2 раза меньше вычисленной по (1).

## Заключение

Для определения продолжительности осушения грунтов и расстояний между несовершенными дренами получены расчетные зависимости, основанные на решении уравнений водного баланса грунтовых вод в осушаемых грунтах и учитывающие приток воды к ним. Они позволяют с большей точностью оценивать характеристики неглубокого дренажа (до 3 м) в зоне избыточного увлажнения грунтов. Учитывая значительные ошибки определения фильтрационных характеристик грунтов в практических расчетах дренажа, целесообразность использования более адекватных моделей процесса фильтрации воды в грунтах и теоретически обоснованных формул вызывает сомнение.

## Библиографический список

1. Прогнозы подтопления и расчет дренажных систем на застраиваемых и застроенных территориях. (Справочное пособие к СНиП.) – М. : Стройиздат, 1991. – 272 с.
2. Алексеев М. И. Методика расчета объемов поверхностного (дождевого, талого) и дренажного стока с территории Санкт-Петербурга и административно подчиненных городов / М. И. Алексеев, А. М. Курганов. – СПб., 1997. – Приложение 1 «к правилам пользования системой коммунальной канализации Санкт-Петербурга». – Утв. распоряжением от 22 сентября 1997 г., № 6 о «Правилах пользования системой коммунальной канализации Санкт-Петербурга». – СПб. : Комитет по энергетике и инженерному обеспечению при администрации Санкт-Петербурга. – URL : [http://www.lawrussia.ru/texts/legal\\_743/doc743a481x715.htm](http://www.lawrussia.ru/texts/legal_743/doc743a481x715.htm) (дата обращения: 15.08.2017).
3. ГОСТ 17.1.3.13–86. Общие требования к охране поверхностных вод от загрязнения. – М., 1986.

4. Аверьянов С. Ф. Борьба с засолением орошаемых земель / С. Ф. Аверьянов. – М. : Колос, 1978. – 288 с.
5. Руководство по проектированию осушительных и осушительно-увлажнительных систем. – М. : Главнечерноземводстрой ; Ленгипроводхоз, 1976. – 133 с.
6. Пособие по проектированию методов регулирования водно-теплого режима верхней части земляного полотна (к СНиП 2.05.02–85). – М. : Стройиздат, 1989. – 97 с.
7. Шкиннис Ц. Н. Гидрологическое действие дренажа / Ц. Н. Шкиннис. – Л. : Гидрометеоздат, 1982. – 311 с.
8. Выгодский М. Я. Справочник по высшей математике / М. Я. Выгодский. – М. : Наука, 1977. – 871 с.
9. Канцибер Ю. А. Методы проектирования водного режима осушаемых земель в Нечерноземной зоне РСФСР / Ю. А. Канцибер, А. И. Климко, С. И. Харченко. – Л. : Гидрометеоздат, 1983. – 82 с.
10. СНиП 2.06.03–85. Мелиоративные системы и сооружения. – М. : Стройиздат, 1986.
11. Канцибер Ю. А. Расчетная приточность к дренируемым площадям в условиях Северо-Запада России / Ю. А. Канцибер, В. И. Штыков // Сб. Академические чтения к 200-летию ПГУПС. – СПб. : ПГУПС, 2009. – С. 88–90.
12. Канцибер Ю. А. Расчеты стока воды с осушаемых сельскохозяйственных земель в Нечерноземной зоне РФ / Ю. А. Канцибер // Вестн. РАСХН. – 1998. – № 1. – С. 25–28.
13. Соколовский Д. Л. Речной сток / Д. Л. Соколовский. – Л. : Гидрометеоздат, 1968. – 415 с.
14. Научно-прикладной справочник по климату СССР. – Сер. 3, ч. 1–6, вып. 1 : Архангельская и Вологодская области, Коми АССР. – Кн. 1 / Ред. З. Н. Пильникова. – Л. : Гидрометеоздат, 1989. – 405 с.
15. СП 33-101–2003. Определение основных расчетных гидрологических характеристик. – М. : Стройиздат, 2003.
1. *Prognozy podtopleniya i raschet drenaznykh system na zastraivayemykh i zastroyennykh territoriyakh* [Submergence forecasting and drainage systems' calculation on the territories under construction and built-up territories]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1991, 272 p. (In Russian)
2. Alekseyev M. I. & Kurganov A. M. *Metodyka rascheta obyemov poverkhnostnogo (dozhdevogo, talogo) i drenazhnogo stoka s territorii Sankt-Peterburga i administrativno podchynennykh gorodov* [Calculation method of surface-water flow volume (storm water, snowmelt) and drainage flow of Saint Petersburg and administratively subordinate cities]. Saint Petersburg, 1997. *Prylozheniye 1 "k pravylam polzovaniya sistemoy kommunalnoy kanalyzatsii Sankt-Peterburga"* [Application 1 "to guidelines for using the public sanitary system of Saint Petersburg"]. *Utv. rasporyazheniyem ot 22 sentyabrya 1997, no. 6, o "Pravylakh polzovaniya sistemoy kommunalnoy kanalyzatsii Sankt-Peterburga"* [Approved by the order dated September 22 1977, no. 6, on "The guidelines for using the public sanitary system of Saint Petersburg"]. Saint Petersburg, Saint Petersburg administration committee on energy and engineering. – URL: [http://www.lawrussia.ru/texts/legal\\_743/doc743a481x715.htm](http://www.lawrussia.ru/texts/legal_743/doc743a481x715.htm). (accessed: 15.08.2017) (In Russian)
3. *GOST 17.1.3.13–86. Obshchiye trebovaniya k okhrane poverkhnostnykh vod ot zagryazneniya* [State Standard 17.1.3.13–86. General requirements for surface water protection from contamination]. Moscow, 1986. (In Russian)
4. Averyanov S. F. *Borba s zasoleniyem oroshayemykh zemel* [Salinization control of irrigated lands]. Moscow, Kolos Publ., 1978, 288 p. (In Russian)
5. *Rukovodstvo po proyektirovaniyu osushitelnykh i osushitelno-uvlazhnytelnykh sistem* [Drainage and combined irrigation systems design guide]. Moscow, Glavnechernozemvodstroy Publ., Lengyprovodkhoz Publ., 1976, 133 p. (In Russian)
6. *Posobiye po proyektirovaniyu metodov regulirovaniya vodno-teplovogo rezhyma verkhney chasty zemlyanogo polotna* [Design guidelines on water-thermal regime regulatory methods of the upper part of earth roadbed] (k CNiP (to Construction Norms and Regulations) 2.05.02–85). Moscow, Stroyizdat Publ., 1989, 97 p. (In Russian)
7. Shkinkis Ts. N. *Gydrologicheskoye deistviye drenazha* [Hydrological effect of drainage]. Leningrad, Gydrometeoizdat Publ., 1982, 311 p. (In Russian)

## References

1. *Prognozy podtopleniya i raschet drenaznykh system na zastraivayemykh i zastroyennykh territoriyakh* [Submergence forecasting and drainage systems'



8. Vygodskiy M. Y. *Spravochnyyk po vysshey matematyke* [Reference on higher mathematics]. Moscow, Nauka Publ., 1977, 871 p. (In Russian)
9. Kantsyber Y. A., Klymko A. I. & Kharchenko S. I. *Metody proyektirovaniya vodnogo rezhyma osushayemykh zemel v Nechernozemnoy zone RSFSR* [Design methods of drain land moisture regime in RSFSR Nonchernozem belt]. Leningrad, Gydrometeoizdat Publ., 1983, 82 p. (In Russian)
10. SNiP 2.06.03–85. *Melioratyvniye systemy i sooruzheniya* [Construction Norms and Regulations 2.06.03–85. Reclamation systems and constructions]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1986. (In Russian)
11. Kantsyber Y. A. & Shtykov V. I. *Raschetnaya prytochnost k dreniruyemym ploshyadyam v usloviyakh Severo-Zapada Rossii* [Calculated drainage area inflow in the North-West climate of Russia]. *Sbornyk Akademicheskoye Chteniya k 200-letiyu PGUPS* [Collection of Academic Readings dedicated to 200<sup>th</sup> anniversary of PGUPS], 2009, pp. 88–90. (In Russian)
12. Kantsyber Y. A. *Raschety stoka vody s osushayemykh selskokhozyaistvennykh zemel v Nechernozemnoy zone RF* [The calculation of water run-off from drainage farming lands in Nonchernozem belt of the Russian Federation]. *Vestnyk RASKhN* [RAAS Bulletin], 1998, no. 1, pp. 25–28. (In Russian)
13. Sokolovskiy D. L. *Rechnoy stok* [River run-off]. Leningrad, Gydrometeoizdat Publ., 1968, 415 p. (In Russian)
14. *Nauchno-prikladnoy spravochnyyk po klymatu SSSR. Arkhangelskaya i Vologodskaya oblasti, Komy ASSR* [Scientifically applicable reference book on USSR climate. The Arkhangelsk and Vologda regions, Komi ASSR]. Ser. 3, pt. 1–6, issue 1, vol. 1; ed. by Z. N. Pylnykova. Leningrad, Gydrometeoizdat Publ., 1989, 405 p. (In Russian)
15. *SP 33-101–2003. Opredeleniye osnovnykh raschetnykh gydrologicheskyykh kharakteristik* [Design and construction specifications 33-101–2003. Determination of the main calculating hydrological characteristics]. Moscow, Stroyizdat Publ., 2003. (In Russian)

КАНЦИБЕР Юрий Алексеевич – канд. техн. наук, ст. научный сотрудник, доцент, [kantziber3@yandex.ru](mailto:kantziber3@yandex.ru); \*ПОНОМАРЕВ Андрей Борисович – канд. техн. наук, доцент, [pol1nom@yandex.ru](mailto:pol1nom@yandex.ru) (Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I).

УДК 681.3

**В. А. Ходаковский, В. Г. Дегтярев****О ТЕОРЕМЕ ОТСЧЕТОВ И ЕЕ ПРИМЕНЕНИИ ДЛЯ СИНТЕЗА И АНАЛИЗА СИГНАЛОВ С ОГРАНИЧЕННЫМ СПЕКТРОМ**

Дата поступления: 06.03.2017

Решение о публикации: 03.07.2017

**Аннотация**

**Цель:** Рассматриваются вопросы правильного понимания теоремы отсчетов, которая была абсолютно математически строго доказана акад. А. Н. Котельниковым в 1933 г., но до настоящего времени существуют убеждения, что для точного восстановления сигнала со спектром, не содержащим частот выше  $f_b$ , недостаточно равномерных отсчетов, выполненных с интервалом  $1/(2f_b)$ , что противоречит теореме отсчетов. **Методы:** Используется метод математического моделирования процессов обработки сигналов в математическом пакете MathCad. Описываются следствия из теоремы отсчетов, предлагается и исследуется в среде MathCad математическая модель сигнала с ограниченным спектром, приводятся характеристики сигналов, в том числе по скорости передачи информации. Показываются возможные ошибки при восстановлении сигнала после дискретизации и раскрываются причины, их вызывающие. **Результаты:** Выявлено, что для точного восстановления неизвестной функции по ее равномерным отсчетам необходимо знать момент первого информационного отсчета. Установлена возможность достижения предельно возможной удельной скорости передачи информации по узкополосному каналу связи. **Практическая значимость:** На основе полученных зависимостей разработаны способы синтеза и анализа узкополосных процессов, а также определения полного количества информации, содержащейся в таких процессах.

**Ключевые слова:** Аналитическая функция, дискретизация, квантование, квадратура, сигнал с ограниченным спектром, теорема отсчетов, фильтр низких частот.

\*Valentyn A. Khodakovskiy, D. Eng. Sci., professor, head of a chair, hva1104@mail.ru; **Valentyn G. Degtyarev**, D. Eng. Sci., professor (Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University) ON SAMPLING THEOREM AND ITS APPLICATION FOR THE PUPOSES OF SYNTHESIS AND ANALYSIS OF BAND-LIMITED SIGNALS

**Summary**

**Objective:** The issues of an insight into the sampling theorem were considered, which was rigorously proven by academician A. N. Kotelnikov in 1933, but until present there have been opinions stating that proportional sampling, conducted with  $1/(2f_b)$  interval, is not enough to regenerate an adequate signal with a band, containing no frequencies higher than  $f_b$ , which contradicts the sampling theorem. **Methods:** The method of mathematical simulation of signal handling processes in MathCad mathematical package was applied. The sampling theorem conclusions were given, a mathematical model of a band-limited signal was introduced and studied in MathCad environment, signal characteristics were presented, including the rate of information transfer. The possible errors in the process of signal recovery after discretization were shown, as well as the reasons causing them. **Results:** It was detected that for an unknown function recovery according to its proportional sampling, it is essential to know the moment of the first data sampling. The possibility of achieving the maximum permissible rate of data transmission via a narrow-band communication channel was established. **Practical importance:** The methods of analysis and synthesis of narrow-band processes were developed on the basis of the obtained dependencies, as well as the identification of mutual information contained in the given processes.

**Keywords:** Analytical function, discretization, quantization, quadrature, band limited signals, sampling theorem, low-frequency filter.

## Введение

В настоящее время во многих системах железнодорожного транспорта используются цифровые методы обработки данных. Это относится к системам поездной и локомотивной связи, к системам централизации и блокировки, а также к системам высокоскоростной передачи данных, где уже невозможно обойтись без цифровой фильтрации и цифровой обработки сигналов.

Во всех указанных системах применяются аналого-цифровые (АЦП) и цифро-аналоговые (ЦАП) преобразователи, которые позволяют свободно переходить от аналогового к цифровому представлению сигналов и наоборот. Для того чтобы точно осуществить переход от одного представления к другому, например от аналогового к цифровому, требуется правильно определить частоту дискретизации аналогового сигнала, поскольку при низкой частоте дискретизации сигнала будет теряться информация, а высокая частота дискретизации существенно увеличивает время обработки информации. При обратном преобразовании из цифрового представления в аналоговую следует правильно осуществить фильтрацию цифрового потока с целью избавления от шума квантования.

Теоретическим обоснованием выбора частоты дискретизации является теорема отсчетов Котельникова–Найквиста, которая была выведена для детерминированных сигналов с ограниченным спектром, конечной мощностью и удовлетворяющих условиям Дирихле. В общем случае теорема не применима для неэргодических сигналов, сингулярных стационарных, а также для сигналов с бесконечной мощностью.

Наиболее значимые исследования по обобщению теоремы отсчетов на случайные процессы проводились в 1959 г. А. Балакришнаном [1], С. Ллойдом [2], в 1967 г. Ю. В. Прохоровым и Ю. А. Розановым [3], в 1968 г. Л. Л. Кэмпбеллом [4]. В 1971 г. Дж. Стиффлер [5] на «инженерном уровне строгости» пред-

ложил доказательство теоремы для случайных процессов.

Теорему отсчетов Котельникова обычно принято формулировать так: *произвольный сигнал, спектр которого не содержит частот выше  $f_B$  (Гц), может быть полностью восстановлен, если известны отсчетные значения этого сигнала, взятые через равные промежутки времени:*

$$s(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} s_k \cdot \frac{\sin[\omega_B(t - k\pi/\omega_B)]}{\omega_B(t - k\pi/\omega_B)}. \quad (1)$$

Функция

$$h(t - \tau) = \frac{\sin[\omega_B(t - \tau)]}{\omega_B(t - \tau)}, \quad (2)$$

где  $\tau = 1/(2f_B)$ , называется функцией отсчетов Котельникова. На рис. 1, а приведен график функции  $h(t - \tau)$  при  $f_B = 50$  Гц и сдвиге  $\tau = 0$ , а также при сдвиге  $\tau = 1/(2f_B)$ . Функция отсчетов (2) обладает свойством нормировки

$$\int_{-\infty}^{\infty} h(t - \tau) dt = 1 \quad \text{при} \quad \tau = \frac{k}{2f_B}, \quad (3)$$

где  $k$  – любое целое, что позволяет интерпретировать (1) как обработку функции  $s(t)$  линейным фильтром. И действительно, спектр функции (2), представленный на рис 1, б, – идеальный фильтр низких частот (ФНЧ) с абсолютно плоской характеристикой и резкой крутизной ската частотной характеристики на частоте среза  $f_B = 50$  Гц.

Спектр функции (1) является комплексной функцией с действительной и мнимой частями:

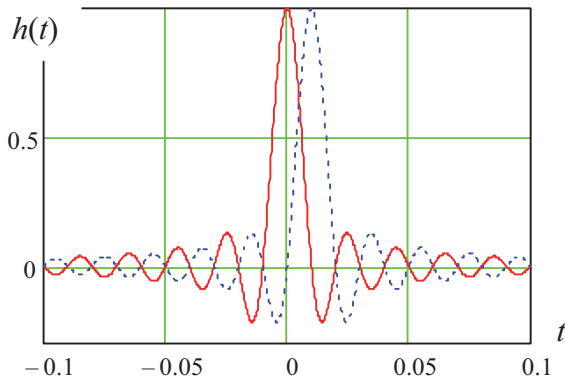
$$H(\omega) = \text{Re}(fft(h(t))) + i \cdot \text{Im}(fft(h(t))),$$

в которой  $fft(x(t))$  – преобразование Фурье функции  $x(t)$ .

Определим комплексно-сопряженный спектр в виде

$$\hat{H}(\omega) = \text{Im}(fft(h(t))) + i \cdot \text{Re}(fft(h(t))), \quad (4)$$

а



б

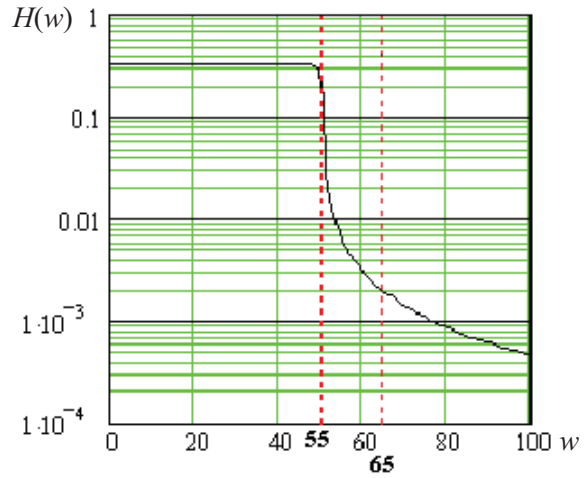


Рис. 1. Характеристики функции отсчетов  $h(t)$ :  
 а – график функции  $h(t)$ ; б – модуль спектра  $h(t)$ : сплошная кривая –  $\tau = 0$ ,  
 пунктирная –  $\tau = 1/(2f_b)$

путем перемены местами действительной и мнимой части в преобразовании Фурье, а затем выполним обратное преобразование Фурье, переходя из частотной во временную область представления:

$$\hat{h}(t) = \text{iffi}(\hat{H}(\omega)), \quad (5)$$

где  $\text{iffi}(\hat{H}(\omega))$  – обратное преобразование Фурье комплексно-сопряженного спектра  $\hat{H}(\omega)$ .

Выражение (5) есть комплексно-сопряженная импульсная переходная характеристика идеального ФНЧ с той же частотой среза  $f_b$ .

Вообще последовательность преобразований вида (4), (5) позволяет сформировать

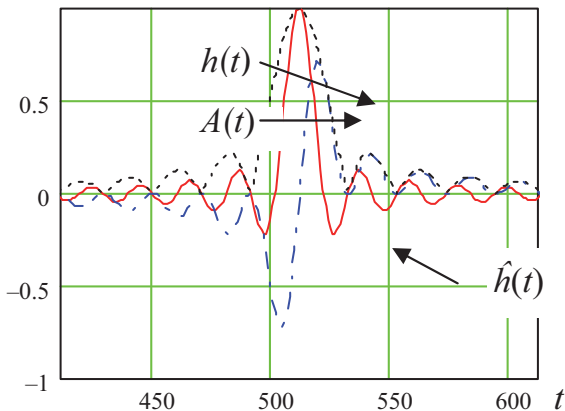


Рис. 2. ИХ ФНЧ и их огибающая

квадратурную компоненту аналитического сигнала из любого действительного сигнала.

Действительная и мнимая импульсная характеристика (ИХ) идеального ФНЧ и их огибающая приведены на рис. 2. Огибающая идеального ФНЧ определяется, как обычно для аналитической функции:

$$A(t) = \sqrt{[h(t)]^2 + [\hat{h}(t)]^2}.$$

На рис. 3 приведен фазовый портрет идеального ФНЧ.

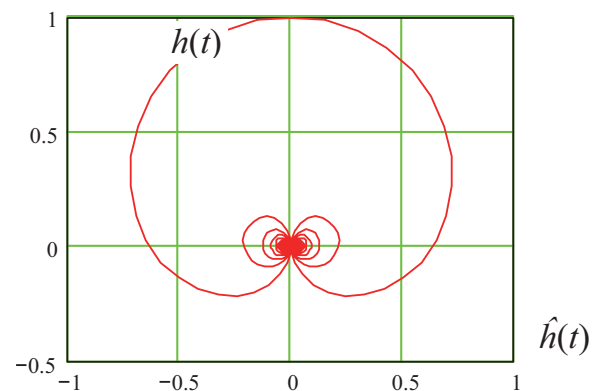


Рис. 3. Фазовый портрет идеального ФНЧ

Выражение (1) дает разложение функции  $s(t)$  в бесконечный ряд по системе ортогональных функций:

$$\int_{-\infty}^{\infty} \frac{\sin[\omega_B(t-i\pi/\omega_B)]}{\omega_B(t-i\pi/\omega_B)} \times \frac{\sin[\omega_B(t-j\pi/\omega_B)]}{\omega_B(t-j\pi/\omega_B)} dt = 0 \text{ при } i \neq j. \quad (6)$$

Ортогональность (6) функции отсчетов (2) дает возможность обеспечения независимой передачи отсчетов при выполнении их с интервалом, равным  $1/(2f_B)$ .

Следует отметить, что формулировка теоремы и выражение (1) указывают на возможности и пути решения следующих задач:

– восстановление непрерывного сигнала, не содержащего частот выше  $f_B$  по его известным равномерным отсчетам, выполненным с интервалом  $1/(2f_B)$ ;

– синтез нового непрерывного сигнала, в котором в информационных точках, следующих с интервалом  $1/(2f_B)$ , будет содержаться информация в виде дискретных отсчетов  $S = \{s_k\}, -\infty < k < \infty$ ;

– получение полного количества информации, содержащейся в непрерывном сигнале, не содержащем частот выше  $f_B$ , по его известным равномерным отсчетам, выполненным с интервалом  $1/(2f_B)$ .

Первые две задачи по сути являются задачами низкочастотной фильтрации решетчатой функции  $S$ , которая существует только в моменты отсчетов, а в остальные моменты времени тождественно равна нулю. Но здесь следует отметить, что так как решетчатая функция определена только в моменты ее отсчетов (в другие моменты времени она тождественно равна нулю, и информации там нет), значит, вся информация функции с ограниченным спектром сосредоточена в решетчатой функции  $S$ . В этом и состоит сущность третьей задачи.

Рассмотрим решения этих задач.

Одновременно с вышеуказанными существует и другая задача, обратная к задаче (1): задана непрерывная функция  $s(t)$ , не содержащая частот выше  $f_B$ , и необходимо так выбрать равномерные отсчеты, чтобы по ним можно было полностью восстановить решетчатую функцию  $S$ , а значит, и всю информацию, в

ней содержащуюся. В этой задаче основными действиями являются правильный выбор начальной отсчетной точки (синхронизация) и знание диапазона возможных значений и величины дискрета функции  $S$ . Данную задачу можно характеризовать как анализ непрерывной функции с целью выявления всей заложеной в ней информации.

К огромному сожалению, такую особенность очень часто не учитывают, считая, что для точного описания функции со спектром, не содержащим частот выше  $f_B$ , достаточно произвести несинхронизированные отсчеты с равномерным интервалом, равным  $1/(2f_B)$ . На самом же деле необходимо с чрезвычайно высокой точностью знать положение первой отсчетной точки. В противном случае восстановление будет только приближенным. Происходит это в связи с тем, что на граничной частоте  $f_B$  сигнала хотя и производится ровно два отсчета, как того требует теорема Котельникова, но они не позволяют правильно восстановить амплитуду и фазу на частоте  $f_B$ .

На данную особенность обращали внимание многие авторы. Это подтверждается и тем, что в звуковых картах для высококачественной передачи звука частота дискретизации выбирается намного выше, чем предельные звуковые частоты.

Рассмотрим более подробно вторую задачу.

### Задача восстановления функции с ограниченным спектром по известным равномерным отсчетам

Пусть известны 12 отсчетов некоторой непрерывной детерминированной функции, имеющей спектр, ограниченный частотой  $f_B = 50$  Гц. Эти отсчеты представим в виде вектора

$$S = (2 \ 3 \ 1 \ -2 \ -3 \ -1 \ 3 \ 3 \ -3 \ -3 \ 8 \ -8)^T \quad (7)$$

и восстановленный сигнал запишем с использованием формулы (1)

$$s(t) \approx \sum_{i=0}^{11} S_i \cdot \frac{\sin[2\pi f_B(t - i / (2f_B))]}{2\pi f_B(t - i / (2f_B))}. \quad (8)$$

Ниже дана программа в среде MathCAD, реализующая обработку (8) по отсчетам (7):

$$\text{si}(f, t, a) := \text{if} \left[ |(t - a)| > 10^{-9}, 1 \cdot \frac{\sin[2 \cdot \pi \cdot f \cdot (t - a)]}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot (t - a)}, 1 \right]$$

$$f := 50 \quad M := 4096 \quad A := (2 \ 3 \ 1 \ -2 \ -3 \ -1 \ 3 \ 3 \ -3 \ -3 \ 8 \ -8)^T$$

$$n := \text{rows}(A) \quad t_n := \frac{-dd - 1}{2f} \quad t_k := \frac{n + dd}{2f} \quad dt := \frac{t_k - t_n}{M} \quad i := 0..n - 1$$

$$s(t) := \sum_{i=0}^{n-1} \left( A_i \cdot \text{si} \left( f, t, \frac{i}{2 \cdot f} \right) \right) \quad j := 0..M - 1 \quad U_j := s(j \cdot dt + t_n) \quad F := \text{fft}(U)$$

а на рис. 4 приведен полученный сигнал.

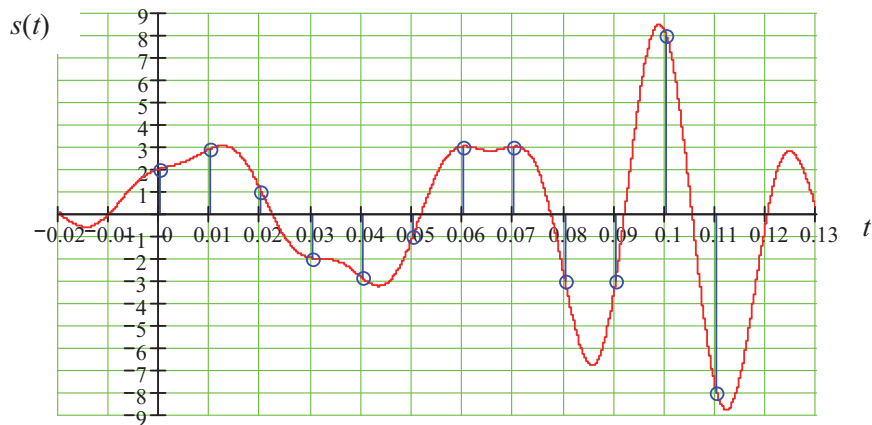


Рис. 4. Сигнал, сформированный программой в среде MathCad: сплошная кривая –  $s(t)$ , информационные точки  $A_i$  –  $\circ$

На рис. 4 кроме сформированного сигнала показаны все 12 информационных точек (первая информационная точка соответствует моменту времени  $t = 0$ , вторая –  $t = 0,01$  и т. д.), а также, что значения сигнала в информационных точках полностью соответствуют известному вектору (7).

На рис. 5 приведен модуль спектра сформированного сигнала. Его анализ показывает, что на частоте среза  $f_B = 50$  Гц уровень спектра падает, но крутизна невысокая. Это связано со слабым затуханием функции отсчетов и слишком близким расположением начальной и конечной информационных точек к началу и концу времени описания сигнала. В приведенном примере первой информа-

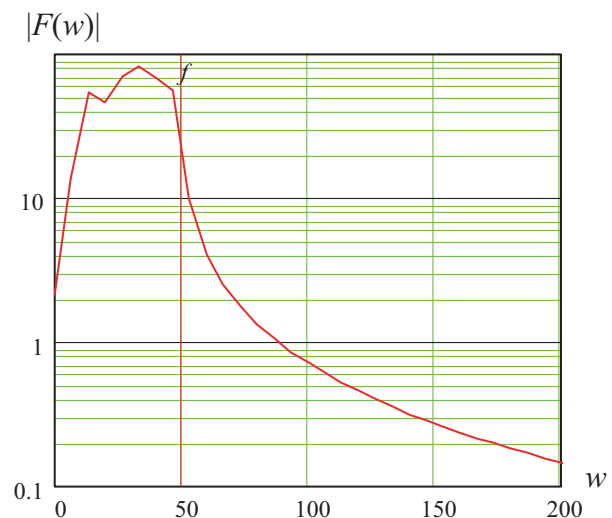


Рис. 5. Модуль спектра сформированного сигнала  $|F(w)|$

ционной точке предшествуют два интервала отсчета и за последней информационной точкой также следуют два интервала отсчета.

Следует отметить, что вторая задача синтеза нового непрерывного сигнала, в котором в информационных точках, следующих с интервалом  $1/(2f_B)$ , будет содержаться информация в виде дискретных отсчетов  $S = \{s_k\}, -\infty < k < \infty$ , не очень существенно отличается от рассмотренной задачи. Разница заключается только в том, что для первой задачи решетчатая функция  $S$  заранее задана, а для второй задачи она формируется из информационного потока, который необходимо передать по каналу связи.

### Определение полного количества информации в непрерывном сигнале, не содержащем частот выше $f_B$ , по его известным равномерным отсчетам, выполненным с интервалом $1/(2f_B)$

Для рассмотрения такой задачи воспользуемся исходными данными предыдущей задачи, где информация представлена вектором (7), состоящим из  $N = 12$  чисел, из интервала  $[-8, +8]$ , т. е. размах значений  $R = \max(A) - \min(A) = 16$ . Элементы вектора являются целыми числами, значит, величина дискрета (шага) по амплитуде равна  $\Delta A = 1$ . Тогда число информационных бит, содержащих описание всех возможных вариантов размещения уровня амплитуды сигнала, в конкретный отсчетный момент времени будет равно  $L = \log_2(R/\Delta A) = 4,0$  Бит, а поскольку наш сигнал содержит  $N$  отсчетов, то общее количество информации в этом сигнале будет равно (в Бит)

$$I = N \cdot L = N \cdot \log_2(R/\Delta A) = 48.$$

Рассчитаем время, которое будет затрачено на передачу  $N$  информационных отсчетов. Поскольку информационные отсчеты следуют через равные интервалы времени, то

$$\Delta T = 1/(2f_B) = 0,01 \text{ с},$$

то на передачу  $N$  отсчетов потребуется в  $N$  раз больше времени, т. е.

$$T = N/(2f_B) = 12/100 = 0,12 \text{ с}.$$

Скорость передачи информации (в Бит) можно определить как отношение общего количества информации ко времени передачи информации, т. е.

$$\begin{aligned} C &= I/T = N \cdot L/T = N \cdot L/(N/(2f_B)) = \\ &= 2f_B \log_2(R/\Delta A) = \\ &= 2 \cdot 50 \cdot \log_2(16) = 400 \text{ Бит/с}. \end{aligned}$$

Удельную скорость передачи информации можно определить как отношение скорости передачи информации к полосе частот, занимаемых сигналом. Поскольку полоса частот описываемого сигнала не превышает величины  $f_B = 50$  Гц, то для удельной скорости передачи информации получим

$$I_{\text{уд}} = C/f_B = 2 \cdot \log_2(16) = 8 \text{ Бит/с/Гц}.$$

Следует иметь в виду, что в данном расчете не учтено время, необходимое для описания нарастания и спада «хвостов» функции отсчетов, в примере использовано  $4 \Delta T$ , что увеличивает время передачи сигнала до  $T = (N - 1 + 4) \cdot \Delta T = 15/(2f_B) = 0,15$  с. Данное увеличение времени описания нарастания и спада функции отсчетов соответственно для первой и последней информационных точек позволяет существенно повысить точность описания сигнала в таких точках. Скорость передачи при этом уменьшится на величину  $(N + 4) / N = 1,33$ . В этом случае приведенные выше формулы нужно откорректировать:

$$T^* = (N + 3)/(2f_B) = (12 + 3)/100 = 0,15 \text{ с},$$

$$\begin{aligned} C^* &= I/T^* = N \cdot L/(T + 4) = N \cdot L/((N + 3)f(2f_B)) = \\ &= 2f_B \cdot (N/(N + 3)) \log_2(R/\Delta A) = \\ &= 1,6 \cdot 50 \cdot \log_2(16) = 320 \text{ Бит/с}, \end{aligned}$$

$$I_{уд}^* = C^*/f_B = 1,6 \cdot \log_2(16) = 6,4 \text{ Бит/с/Гц.}$$

Интересно сравнить полученные результаты с предельными формулами Клода Шеннона для узкополосного канала передачи информации. Необходимо сразу перейти от дискретов амплитуды к дискретам по мощности и принять мощность помехи равной 1, тогда при 16 дискретах в амплитуде и величине шага 1 получим  $\log_2(16^2) = 8$  Бит: столько информации в одном отсчете и такова предельная по Шеннону удельная скорость передачи информации по каналу в расчете на 1 Гц полосы частот канала. Для общего объема переданной информации в соответствии с предельной формулой Шеннона имеем

$$I = T \cdot f_B \cdot \log_2(16^2) = 0,12 \cdot 50 \cdot 8 = 48 \text{ Бит.}$$

Для скорости передачи информации

$$C = I/T = 48/0,12 = 400 \text{ Бит/с.}$$

Видно, что результаты, полученные на рассмотренной математической модели, приближаются к предельным значениям по скорости передачи информации по узкополосному каналу связи. Конечно, приведенные выше рассуждения не показывают алгоритма расшифровки сообщения, но они дают ответ на

вопрос о том, какой максимальный объем информации может содержаться в узкополосном сигнале.

### Выбор по заданной непрерывной функции $s(t)$ , не содержащей частот выше $f_B$ , равномерных отсчетов для полного восстановления решетчатой функции $S$ , а значит, и всей информации, в ней содержащейся

В этой задаче в качестве исходных данных воспользуемся функцией (7), о которой известно, что ее спектр ограничен сверху частотой  $f_B = 50$  Гц, а значит, отсчеты необходимо делать с равномерным интервалом, равным  $\Delta t = 1/(2f_B)$ , но не знаем момент начала первого отсчета.

Поскольку сигнал сосредоточен на некотором интервале времени, то по входным данным можно определить времена начала и конца сигнала, превышающие некоторый порог, например 0,5, которому соответствуют моменты  $t_n = -0,02$  с,  $t_k = 0,13$  с. Предположим, что первая информационная точка соответствует моменту времени  $t_0 = -0,01$ .

На рис. 6–10 приведены результаты восстановления сигнала при различных положениях точки начала дискретизации. На всех этих ри-

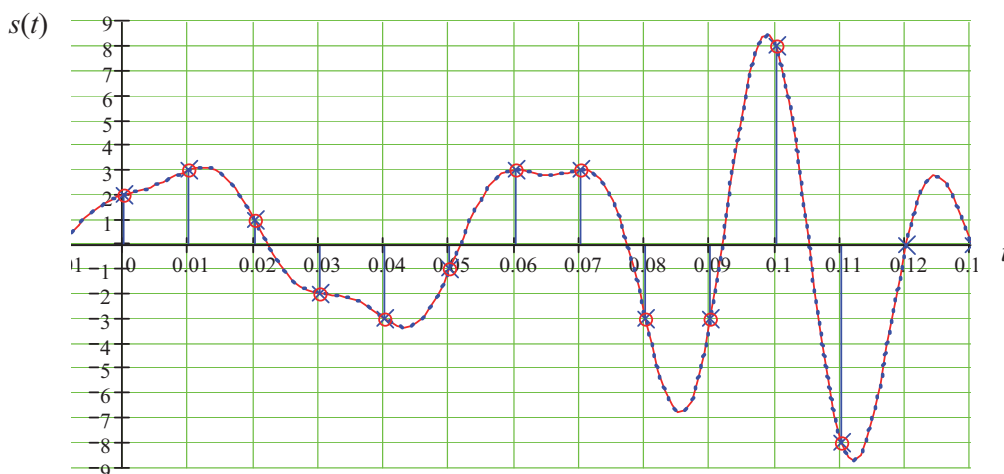
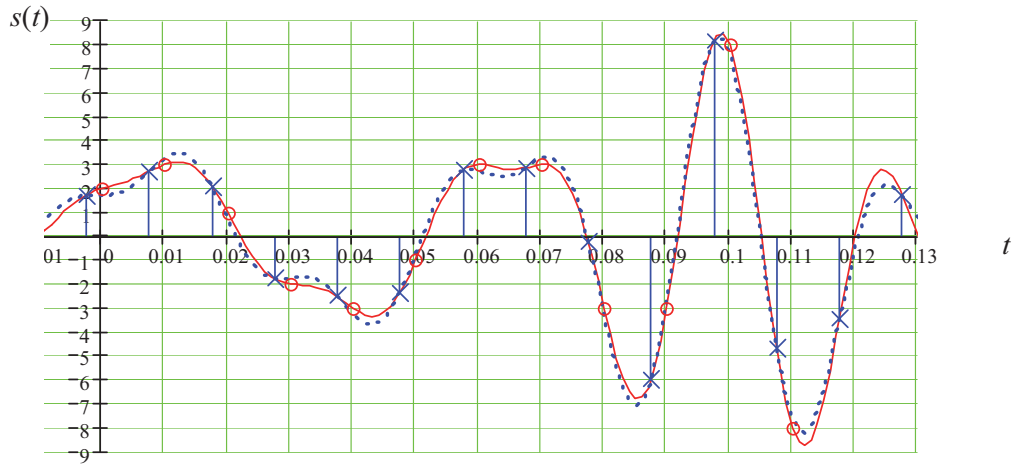
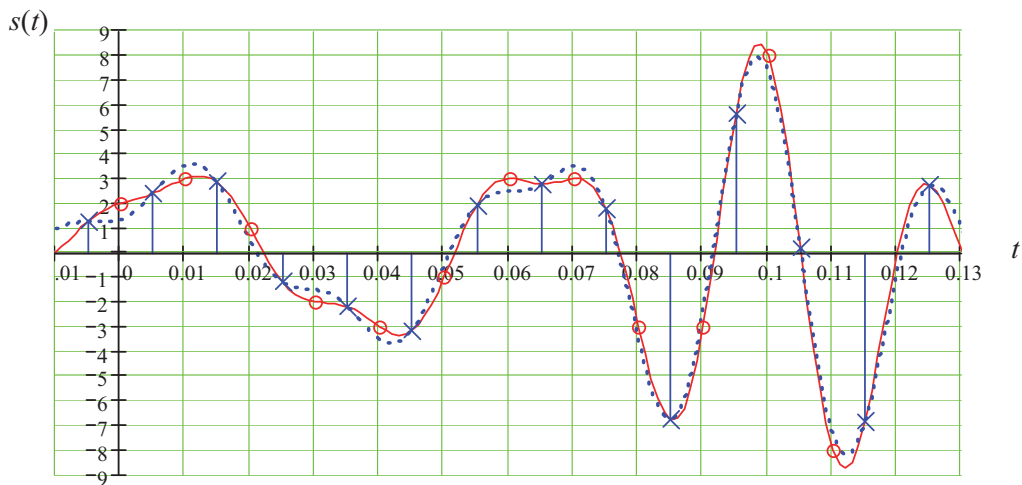
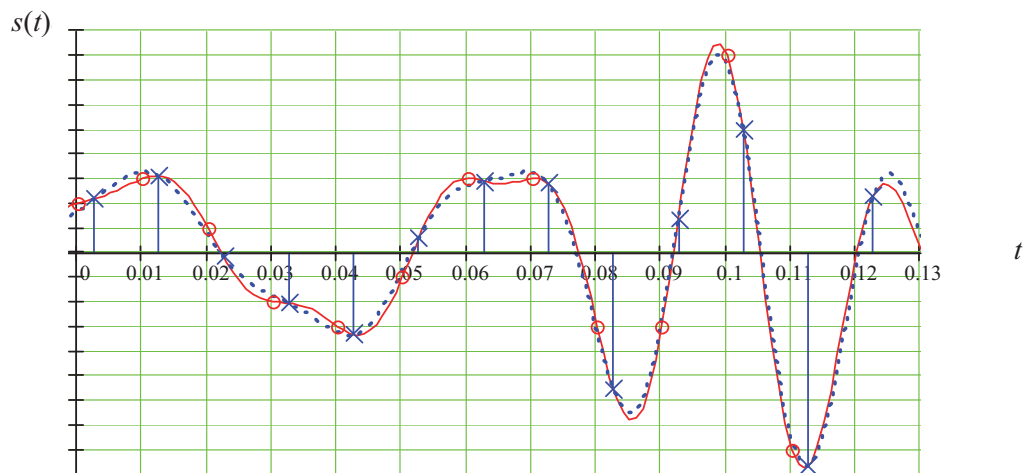


Рис. 6. Сдвиг первой точки дискретизации  $t_0 = -1/(2f_B)$ : сплошная линия –  $s(t)$ , пунктирная – восстановленный сигнал, о – информационные точки, х – восстановленные точки (то же для рис. 7–10)



Рис. 7. Сдвиг первой точки дискретизации  $t_0 = -1,25/(2f_B)$ Рис. 8. Сдвиг первой точки дискретизации  $t_0 = -0,5/(2f_B)$ Рис. 9. Сдвиг первой точки дискретизации  $t_0 = -0,75/(2f_B)$

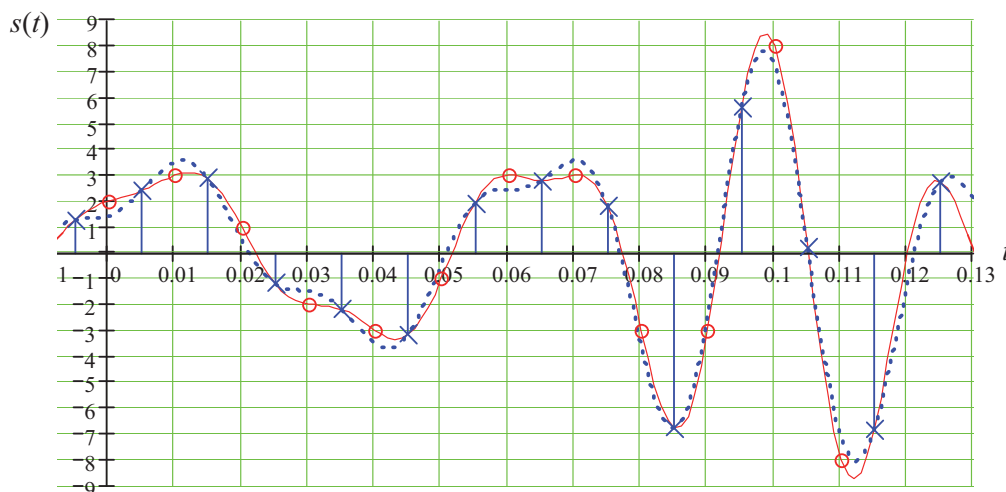


Рис. 10. Сдвиг первой точки дискретизации  $t_0 = -1,5/(2f_B)$

сунках информационные точки, по которым формировался сигнал, отмечены кружками, а точки, по которым сигнал восстанавливался, – импульсным всплеском, оканчивающимся символом «х». Сформированный сигнал обозначен сплошной линией.

На рис. 7–10 видны погрешности восстановления сигнала. Наибольшая погрешность получается при сдвиге точки начала дискретизации относительно истинного положения начальной информационной точки на величину, кратную половине интервала дискретизации. Анализ влияния положения начальной точки отсчета может привести к ложному мнению, что для снижения ошибок восстановления достаточно вдвое увеличить частоту дискретизации, но на самом деле важнее уменьшить сдвиг начальной точки дискретизации относительно первой информационной точки. Приведенное моделирование не учитывало дрожания фазы (смещения информационных точек между первой и последней).

## Заключение

Проведенное моделирование узкополосного сигнала позволяет сделать следующие выводы:

- теорема отсчетов утверждает о возможности восстановления функции со спектром,

ограниченным сверху частотой  $f_B$  по ее **известным отсчетам**, выполненным с равномерными интервалами, равными  $1/(2f_B)$ , но из нее не следует, что любая функция с ограниченным спектром может быть полностью восстановлена **по неизвестным**, но равномерным отсчетам, выполненным с интервалами, равными  $1/(2f_B)$ , и при случайном времени первого отсчета;

- наибольшие искажения при восстановлении функции со спектром, ограниченным сверху частотой  $2f_B$  по равномерным отсчетам, выполняемым с интервалами  $\tau = 1/(2f_B)$ , возникают при сдвиге первого отсчета восстанавливаемой функции относительно первой информационной точки на величину, кратную  $\pm 1/(4f_B)$ ;

- погрешности при восстановлении функции с ограниченным спектром образуются при использовании равномерных отсчетов с интервалом  $1/(2f_B)$  в связи с тем, что такие отсчеты не позволяют точно описать фазу наивысшей частоты в спектре сигнала, а значит, и определить точное время первого информационного отсчета. Знание точного положения первой информационной точки дает возможность полностью восстановить функцию с ограниченным спектром по ее равномерным отсчетам с интервалом  $1/(2f_B)$ ;

- исследование приведенной модели узкополосного сигнала показало, что существует

возможность передачи информации с удельной скоростью 6,4 Бит/с/Гц при пределе Шеннона, равном 8 Бит/с/Гц, для сигнала с 16 градациями амплитуды. Простое увеличение числа информационных точек позволяет еще существеннее приблизиться к пределу Шеннона.

Автор уже многие годы занимается проблемой моделирования сигналов и их фильтрацией. Некоторые из полученных результатов приведены в работах [6–20].

### Библиографический список

1. Balakrishnan A. V. A note on the sampling principle for continuous signals / A. V. Balakrishnan // IRE Trans. – 1957. – Vol. IT-3, N 2. – P. 143–146.
2. Lloyd S. P. A sampling theorem for stationary (wide sense) stochastic processes / S. P. Lloyd // Trans. Amer. Math. Soc. – 1959. – Vol. 92, N 1. – P. 1–12.
3. Прохоров Ю. В. Теория вероятностей. Основные понятия. Предельные теоремы. Случайные процессы / Ю. В. Прохоров, Ю. А. Розанов – М. : Наука, 1967. – 576 с.
4. Campbell L. L. Sampling theorem for the Fourier transform of a distribution with bounded support / L. L. Campbell // SIAM J. Appl. Math. – 1968. – Vol. 16, N 3. – P. 626–636.
5. Стиффлер Дж. Теория синхронной связи / Дж. Стиффлер ; пер. с англ. Б. С. Цыбакова ; под ред. Э. М. Габидулина. – М. : Связь, 1975. – 488 с.
6. Ходаковский В. А. Метод фильтрации случайных процессов с использованием обобщенной функции регрессии / В. А. Ходаковский, Д. Г. Бетнев // Изв. Петерб. ун-та путей сообщения. – СПб. : ПГУПС, 2005. – Вып 3 (5). – С. 58–63.
7. Культин В. Б. Полосовой цифровой фильтр с временной обработкой в аппаратуре тональных рельсовых цепей / В. Б. Культин, С. А. Суханов, В. А. Ходаковский // Автоматика и телемеханика железных дорог России. Новая техника и новые технологии : сб. науч. тр. / ред. Вл. В. Сапожников, В. В. Сапожников, А. А. Прокофьев. – СПб. : ПГУПС, 2007. – С. 94–97.
8. Ходаковский В. А. Имитационное моделирование рельсовых цепей. Методы и инструментальные средства / В. А. Ходаковский, Д. С. Марков, М. Б. Соколов // Бюл. результатов науч. исследований. – 2014. – № 2 (11). – С. 30–44.
9. Ходаковский В. А. Методы и инструментальные средства имитационного моделирования рельсовых цепей / В. А. Ходаковский, Д. С. Марков, М. Б. Соколов // Развитие элементной базы и совершенствование методов построения устройств железнодорожной автоматики и телемеханики : сб. науч. тр. / под ред. Вл. В. Сапожникова. – СПб. : ПГУПС, 2014. – С. 48–54.
10. Ходаковский В. А. Мера сходства узкополосных сигналов / В. А. Ходаковский, Т. В. Ходаковский // Автоматика на транспорте. – СПб. : ПГУПС, 2015. – Т. 1, № 2. – С. 180–194.
11. Ходаковский В. А. Моделирование многополосного фильтра / В. А. Ходаковский // Международная конференция по мягким вычислениям и измерениям. – СПб. : СПбГЭТУ (ЛЭТИ), 2015. – Т. 1. – С. 145–148.
12. Ходаковский В. А. Синтез многополосного фильтра с требуемой частотной характеристикой / В. А. Ходаковский, Т. В. Ходаковский // Интеллектуальные технологии на транспорте. – СПб. : ПГУПС, 2015. – № 1. – С. 38–42.
13. Ходаковский В. А. Моделирование скрытой передачи информации в среде MathCad / В. А. Ходаковский // Совершенствование математического образования–2016: состояние и перспективы развития : материалы IX Междунар. науч.-метод. конференции. – СПб. : ПГУПС, 2016. – С. 82–86.
14. Ходаковский В. А. Моделирование технических задач сетями Петри в среде HPSIM / В. А. Ходаковский // Актуальные вопросы развития систем железнодорожной автоматики и телемеханики : сб. науч. тр. / гл. ред. Вл. В. Сапожников. – СПб. : ПГУПС, 2013. – С. 41–51.
15. Ходаковский В. А. Моделирование арифметического кодека в среде MatCad / В. А. Ходаковский, В. А. Кудряшов, В. В. Яковлев // Изв. Петерб. ун-та путей сообщения. – СПб. : ПГУПС, 2012. – Вып. 2 (31). – С. 132–139.
16. Дегтярев В. Г. Математическое моделирование процессов развития дефектов в рельсовом пути / В. Г. Дегтярев, В. А. Ходаковский // Изв. Петерб. ун-та путей сообщения. – СПб. : ПГУПС, 2008. – Вып. 3. – С. 35–44.

17. Войнов К. Н. Математическое моделирование шероховатых поверхностей / К. Н. Войнов, В. А. Ходаковский, М. А. Шварц // Трение. Износ. Смазка. – 2009. – Т. 12, № 41. – С. 1–9.

18. Демьянович Ю. К. Введение в теорию вейвлетов : учеб. пособие / Ю. К. Демьянович, В. А. Ходаковский. – СПб. : ПГУПС, 2008. – 51 с.

19. Ходаковский В. А. Случайные величины. Распределения и их моделирование в среде MathCad-2000 : справ.-метод. пособие для науч. сотрудников, аспирантов и студентов ст. курсов / В. А. Ходаковский. – СПб. : ПГУПС, 2005. – 92 с.

20. Ходаковский В. А. Разработка алгоритмов исследования экономических задач в математических пакетах MathCad и MathLab / В. А. Ходаковский // Математическая подготовка студентов экономических направлений : материалы Междунар. науч.-метод. конференции. – СПб. : Изд-во СПбГЭУ, 2016. – С. 213–223.

## References

1. Balakrishnan A. V. A note on the sampling principle for continuous signals. *IRE Trans*, 1957, vol. IT-3, no. 2, pp. 143–146.

2. Lloyd S. P. A sampling theorem for stationary (wide sense) stochastic processes. *Trans. Amer. Math. Soc.*, 1959, vol. 92, no. 1, pp. 1–12.

3. Prokhorov Y. V. & Rozanov Y. A. *Teoriya veroyatnostey. Osnovniye ponyatiya. Predelniye teoremy. Sluchainyye protsessy* [Probability theory. Basic notions. Limiting theorems. Stochastic processes]. Moscow, Nauka Publ., 1967, 576 p. (In Russian)

4. Campbell L. L. Sampling theorem for the Fourier transform of a distribution with bounded support. *SIAM J. Appl. Math.*, 1968, vol. 16, no. 3, pp. 626–636.

5. Stiffler J. *Teoriya synkhronnoy svyazy* [The theory of synchronous communication]. Moscow, Communication Publ., 1975, 488 p. (In Russian)

6. Khodakovskiy V. A. & Betenev D. G. Metod filtratsii sluchainyykh protsessov s ispolzovaniyem oboshennoy funktsii [Filtering method of stochastic processes with application of generalized regression function]. *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2005, issue 3 (5), pp. 58–63. (In Russian)

7. Kultyn V. B., Sukhanov S. A. & Khodakovskiy V. A. Polosovoy tsyfrovoy filtr s vremennoy obrabotkoy v apparature tonalnykh relsovykh tsepey. *Avtomatika i telemekhanika zheleznikh dorog Rossii. Novaya tekhnika i noviye tekhnologii* [Band digital filter with time processing in audio frequency track circuits' equipment [Automatics and telemechanics of Russian railroads. New machinery and new technologies]. *Sbornyk nauchnykh trudov* [Collection of research papers], ed. by V. I. V. Sapozhnikov, V. V. Sapozhnikov, A. A. Prokofyev. Saint Petersburg, PGUPS Publ., 2007, pp. 94–97. (In Russian)

8. Khodakovskiy V. A., Markov D. S. & Sokolov M. B. Imitatsionnoye modelirovaniye relsovykh tsepey. Metody i instrumentalniye sredstva [Rail track circuit simulation modeling. Methods and tools]. *Bulletin of scientific research results*, 2014, no. 2 (11), pp. 30–44. (In Russian)

9. Khodakovskiy V. A., Markov D. S. & Sokolov M. B. Metody i instrumentalniye sredstva imitatsionnogo modelirovaniya relsovykh tsepey. *Razvitiye elementnoy bazy i sovershenstvovaniye metodov postroyeniya ustroystv zheleznodorozhnoy avtomatyki i telemekhaniky* [Methods and tools of track circuits' simulation modeling. The development of element base and design methods improvement of facilities of railroad automatics and telemechanics]. *Sbornyk nauchnykh trudov* [Collection of research papers], ed. by V. I. V. Sapozhnikov. Saint Petersburg, PGUPS Publ., 2014, pp. 48–54. (In Russian)

10. Khodakovskiy V. A. Mera skhodstva uzkopolosnykh signalov [Commonality measure of narrow-band signals]. *Automation on transport*, 2015, vol. 1, no. 2, pp. 180–194. (In Russian)

11. Khodakovskiy V. A. Modelirovaniye mnogopolosnogo fyltra [Multi band-pass filter simulation]. *Mezhdunarodnaya konferentsiya po myagkym vychisleniyam i izmereniyam* [International conference on soft computing and measurement]. Saint Petersburg, Saint Petersburg Electronical University (LETI) Publ., 2015, vol. 1, pp. 145–148. (In Russian)

12. Khodakovskiy V. A. & Khodakovskiy T. V. Sintez mnogopolosnogo fyltra s trebuyemoy chastotnoy kharakteristikoy [Multi band-pass filter synthesis with the required frequency response characteristic]. *Intelligent technologies on transport*, 2015, no. 1, pp. 38–42. (In Russian)

13. Khodakovskiy V.A. Modelyrovaniye skrytnoy peredachy informatsii v srede MathCad [Simulation of hidden data transmission in MathCad environment]. *Sovershenstvovaniye matematycheskogo obrazovaniya–2016: sostoya niye i perspektyvy razvitiya* [The improvement of mathematical education–2016: current state and development trends]. *Materialy IX Mezhdunarodnoy nauchno-metodycheskoy konferentsii* [Proceedings of the 9<sup>th</sup> International research and methodological conference]. Saint Petersburg, 2016, pp. 82–86. (In Russian)
14. Khodakovskiy V.A. Modelyrovaniye tekhnicheskikh zadach setyamy Petry v srede HPSIM [Petri nets engineering problems' simulation in HPSIM environment]. *Aktualniye voprosy razvitiya system zhelezodorozhnoy avtomatyky i telemekhaniky* [Topical issues of railroad automatics and telemechanics' systems development]. *Sbornyk nauchnykh trudov* [Collection of research papers]. Saint Petersburg, PGUPS Publ., 2013, pp. 41–51. (In Russian)
15. Khodakovskiy V.A. Modelyrovaniye aryfmeticheskogo kodeka v srede MathCad [Arithmetic codec simulation in MathCad environment]. *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2012, issue 2 (31), pp. 132–139. (In Russian)
16. Degtyarev V.G. & Khodakovskiy V.A. Matematicheskoye modelyrovaniye protsessov razvitiya defektov v relsovom puty [Mathematical simulation of defects' growth processes on a track]. *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2008, issue 3, pp. 35–44. (In Russian)
17. Voinov K. N., Khodakovskiy V.A., Shwarts M.A. Matematicheskoye modelyrovaniye sherokhovatykh poverkhnostey [Mathematical simulation of uneven surfaces]. *Treniye. Iznos. Smazka* [Confrication. Abrading. Antifriction], 2009, vol. 12, no. 41, pp. 1–9. (In Russian)
18. Demyanovich Y.K. & Khodakovskiy V.A. *Vvedeniye v teoriyu veyvletov* [Wavelet theory introduction]. Saint Petersburg, PGUPS Publ., 2008, 51 p. (In Russian)
19. Khodakovskiy V.A. *Sluchayniye velychyny. Raspredeleniya i ikh modelyrovaniye v srede MathCad-2000* [Random variables. Their arrangement and simulation in MathCad-2000 environment]. Saint Petersburg, PGUPS Publ., 2005, 92 p. (In Russian)
20. Khodakovskiy V.A. Razrabotka algoritmov ekonomicheskikh zadach v matematycheskikh paketakh MathCad i MathLab [Research algorithms development of business problems in MathCad and MathLab mathematical packages]. *Matematycheskaya podgotovka studentov ekonomicheskikh napravleniy* [Mathematical training of students of economical field of education]. *Materialy Mezhdunarodnoy nauchno-metodycheskoy konferentsii* [Proceedings of the International research and methodological conference]. Saint Petersburg, Saint Petersburg State University of Economics Publ., 2016, pp. 213–223. (In Russian)

\*ХОДАКОВСКИЙ Валентин Аветикович – доктор техн. наук, профессор, заведующий кафедрой, hva1104@mail.ru; ДЕГТЯРЕВ Валентин Григорьевич – доктор техн. наук, профессор (Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I).