

# ТРАНСПОРТ

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ УРАЛ



**АВТОМАТИЧЕСКОЕ ПОСТРОЕНИЕ  
ИМИТАЦИОННЫХ МОДЕЛЕЙ  
КРУПНЫХ ТРАНСПОРТНЫХ ОБЪЕКТОВ**

**О НЕКОТОРЫХ ПРОБЛЕМАХ  
И СДЕРЖИВАЮЩИХ  
ФАКТОРАХ РАЗВИТИЯ  
РЕГИОНАЛЬНОГО РЫНКА  
ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ ПЕРЕВОЗОК**

**РАЗВИТИЕ ВЫСОКОСКОРОСТНОГО ДВИЖЕНИЯ ПОЕЗДОВ  
И ТЕХНОЛОГИЯ КОНТРОЛЯ СОСТОЯНИЯ СТЫКОВ РЕЛЬСОВ  
НА ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГАХ РОССИИ**





#### **На обложке:**

Производство скоростных электропоездов нового поколения «Ласточка» началось на заводе «Уральские локомотивы» в Верхней Пышме (Свердловская область). Прообразом уральской электрички станет Desiro RUS, созданный компанией «Сименс АГ» (на фото). Первые «Ласточки» будут выпущены в Верхней Пышме в 2014 году, поставки для РЖД начнутся в 2015 году.



**TRANSPORT  
OF THE URAL**

**SCIENTIFIC JOURNAL**

**МЕЖДУНАРОДНЫЙ РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ**

1. Александр Ефимов, профессор, главный редактор журнала «Транспорт Урала», Екатеринбург, Россия
2. Александр Сладковски, д-р техн. наук, профессор, Силезский технический университет, Польша
3. Эдуард Горкунов, д-р техн. наук, профессор, член-кор. РАН, Россия
4. Аксель Шмидер, д-р, «Сименс АГ», отраслевой сектор, департамент транспорта «Железнодорожное строительство», Эрланген, Германия
5. Эрки Хамалайнен, д-р экон. наук, университет Аалто, Школа экономики, Финляндия
6. Валерий Доманский, д-р техн. наук, профессор Национального технического университета «Харьковский политехнический институт», Харьков, Украина

**РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ**

1. Асадченко Виталий Романович, д-р техн. наук, профессор, научный редактор, Екатеринбург
2. Боровских Александр Михайлович, канд. техн. наук, профессор, Екатеринбург
3. Галиев Ильхам Исламович, д-р техн. наук, профессор, Омск
4. Грицык Валерий Иванович, д-р техн. наук, профессор, Ростов
5. Козлов Петр Алексеевич, д-р техн. наук, профессор, Москва
6. Комаров Константин Леонидович, д-р техн. наук, профессор, Новосибирск
7. Лапшин Василий Федорович, д-р техн. наук, профессор, Екатеринбург
8. Ларин Олег Николаевич, д-р техн. наук, профессор, Челябинск
9. Ледяев Александр Петрович, д-р техн. наук, профессор, Санкт-Петербург
10. Резник Леонид Григорьевич, д-р техн. наук, профессор, Тюмень
11. Румянцев Сергей Алексеевич, д-р техн. наук, с.н.с., Екатеринбург
12. Сай Василий Михайлович, д-р техн. наук, профессор, зам. главного редактора, Екатеринбург
13. Смолянинов Александр Васильевич, д-р техн. наук, профессор, Екатеринбург
14. Туранов Хабибулла Туранович, д-р техн. наук, профессор, Екатеринбург
15. Умняшкин Владимир Алексеевич, д-р техн. наук, профессор, Ижевск
16. Хоменко Андрей Павлович, д-р техн. наук, профессор, Иркутск

**INTERNATIONAL EDITORIAL BOARD**

1. Alexander Efimov, professor, editor-in-chief of the journal «Ural Transport», Ekaterinburg, Russia
2. Aleksander Sladkowski, professor, Silesian University of Technology, Poland
3. Eduard Gorkunov, DSc, professor, corresponding member of Russian Academy of Sciences, Russia
4. Axel Schmieder, DSc, Siemens AG, Industry Sector, Mobility Division, Transportation Engineering, Erlangen, Germany
5. Erkki Hamalainen, DSc, Aalto University School of Economics, Finland
6. Valery Domansky, DSc, professor of National technical University «Kharkiv politechnical institute», Kharkiv, Ukraine

**EDITORIAL BOARD**

1. Asadchenko Vitaly Romanovich, DSc, professor, scientific editor, Ekaterinburg
2. Aleksandr Mikhailovich Borovskikh, PhD, professor, Ekaterinburg
3. Galiev Ilkham Islamovich, DSc, professor, Omsk
4. Gritsyk Valery Ivanovich, DSc, professor, Rostov
5. Kozlov Petr Alekseevich, DSc, professor, Moscow
6. Komarov Konstantin Leonidovich, DSc, professor, Novosibirsk
7. Lapshin Vasily Fedorovich, DSc, professor, Ekaterinburg
8. Larin Oleg Nikolaevich, DSc, professor, Chelyabinsk
9. Ledaev Alexandr Petrovich, DSc, professor, Saint-Petersburg
10. Reznik Leonid Grigorievich, DSc, professor, Tumen
11. Rumyantsev Sergey Alekseevich, DSc, senior staff scientist, Ekaterinburg
12. Say Vasily Mikhailovich, DSc, professor, deputy editor-in-chief, Ekaterinburg
13. Smolyaninov Alexandre Vasilievich, DSc, professor, Ekaterinburg
14. Turanov Khabibulla Turanovich, DSc, professor, Ekaterinburg
15. Umnyashkin Vladimir Alekseevich, DSc, professor, Izhevsk
16. Khomenko Andrey Pavlovich, DSc, professor, Irkutsk



## ОБЩИЕ ВОПРОСЫ ТРАНСПОРТА

<b>П.А. Козлов, В.Ю. Пермикин, В.С. Колокольников/ Автоматизированное построение имитационных моделей крупных транспортных объектов .....</b>	<b>3</b>
<b>Е.А. Русакова/ Методология определения ущерба предприятия от чрезвычайных происшествий .....</b>	<b>6</b>
<b>Р.Н. Kovalev, Е.В. Kochurov/ Определение необходимого количества топливораздаточных колонок для автозаправочных станций .....</b>	<b>12</b>

## ВАГОНЫ И ВАГОНОЕ ХОЗЯЙСТВО

<b>Ю.В. Зыков, Е.И. Сигилева/ Совершенствование системы технического диагностирования грузовых вагонов в эксплуатации .....</b>	<b>15</b>
<b>А.Э. Павлюков, О.В. Черепов/ Оценка влияния величин износа основных узлов грузовых вагонов на безопасность движения.....</b>	<b>20</b>

## ГРУЗОВЫЕ И ПАССАЖИРСКИЕ ПЕРЕВОЗКИ

<b>П.А. Козлов, В.С. Колокольников/ Теоретические основы гибкого взаимодействия станций в узле .....</b>	<b>28</b>
<b>О.Ю. Портнова/ О некоторых проблемах и сдерживающих факторах развития регионального рынка железнодорожных перевозок .....</b>	<b>32</b>
<b>Д.В. Бондарчук, Г.А. Тимофеева/ Методы мониторинга пассажиропотоков.....</b>	<b>38</b>
<b>К.Е. Герасимчук/ Влияние уровня населенности электропоезда на размеры и график движения поездов .....</b>	<b>42</b>

## ПОДВИЖНОЙ СОСТАВ И ТЯГА

<b>Д.А. Потахов/ Метод линейного программирования при расчете режимов восстановления профиля поверхности катания колесных пар .....</b>	<b>46</b>
<b>А.Т. Когут/ Синтез алгоритмов управления колебаниями при вибродиагностическом контроле механических узлов подвижного состава.....</b>	<b>51</b>
<b>А.В. Бородин, Г.П. Здор, Л.В. Ярышева/ Влияние условий эксплуатации на прочность соединения «колесный центр — бандаж» колеса тепловоза.....</b>	<b>55</b>

## ИЗЫСКАНИЕ И ПРОЕКТИРОВАНИЕ. ПУТЬ И ПУТЕВОЕ ХОЗЯЙСТВО

<b>В.А. Бучкин, Е.П. Ленченкова, Е.А. Рыжик/ Базовый функционал САПР железных дорог .....</b>	<b>59</b>
<b>А.В. Сосновских, В.В. Трошков, А.С. Шишмаков/ Развитие высокоскоростного движения поездов и технология контроля состояния стыков рельсов на железных дорогах России .....</b>	<b>64</b>

## ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ

<b>С.Н. Чижма, А.А. Лаврухин, В.С. Циркин, Е.В. Евдокимов/ Многофункциональный измерительный комплекс для анализа электрических величин на тяговых и трансформаторных подстанциях электрических железных дорог .....</b>	<b>67</b>
<b>Т.А. Несенюк/ Применение RFID-технологий для поиска неисправной изоляции .....</b>	<b>72</b>

## АВТОМОБИЛЬНЫЙ ТРАНСПОРТ

<b>В.Б. Держанский, И.А. Тараторкин, А.С. Ушенин/ Повышение долговечности согласующего редуктора гидромеханической трансмиссии специального колесного шасси .....</b>	<b>77</b>
<b>Ю.В. Перчаткин/ Пути совершенствования прицепного состава к колесным тракторам .....</b>	<b>82</b>

## GENERAL TRANSPORT PROBLEMS

<b>P.A. Kozlov, V.Yu. Permikin, V.S. Kolokolnikov/ Computer aided construction of simulation models of major transport facilities.....</b>	<b>3</b>
<b>E.A. Rusakova/ Methodology of determining accident damage .....</b>	<b>6</b>
<b>R.N. Kovalev, E.V. Kochurov/ Determining necessary number of fuel dispensers for filling stations .....</b>	<b>12</b>

## CARS AND CARRIAGE EQUIPMENT

<b>Y.V. Zykov, E.I. Sigileva/ Improvement of operational technical diagnosis system for freight cars .....</b>	<b>15</b>
<b>A.E. Pavlyukov, O.V. Cherepov/ Assessment of wear rate impact of freight cars' major units on traffic safety.....</b>	<b>20</b>

## CARGO AND PASSENGER TRANSPORTATION

<b>P.A. Kozlov, V.S. Kolokolnikov/ Theoretical basis of flexible interaction of stations within a transport hub .....</b>	<b>28</b>
<b>O.Yu. Portnova/ On some problems and limiting factors of development of the regional railway services market .....</b>	<b>32</b>
<b>D.V. Bondarchuk, G.A. Timofeeva/ Passenger traffic monitoring methods .....</b>	<b>38</b>
<b>K.E. Gerasimchuk/ Effect of train occupancy levels on train set and schedule .....</b>	<b>42</b>

## ROLLING STOCK AND TRACTION

<b>D.A. Potakhov/ Linear programming method for calculation of wheelset tread surface profile recovery .....</b>	<b>46</b>
<b>A.T. Kogut/ Synthesis of vibration control algorithms in vibrodiagnostic monitoring of mechanical parts of rolling stock.....</b>	<b>51</b>
<b>A.V. Borodin, G.P. Zdor, L.V. Yarysheva/ Effect of operating conditions on the strength of “wheel center — band” connection of locomotive wheel .....</b>	<b>55</b>

## RESEARCH AND ENGINEERING. ROAD AND TRACK FACILITIES

<b>V.A. Buchkin, E.P. Lenchenkova, E.A. Ryzhik/ Basic functionality of CAD for railway industry .....</b>	<b>59</b>
<b>A.V. Sosnovskikh, V.V. Troshkov, A.S. Shishmakov/ Development of high-speed train traffic and rail joint monitoring technology in russian railways .....</b>	<b>64</b>

## ELECTRIC SUPPLY

<b>S.N. Chizhma, A.A. Lavruchin, V.S. Tsirkin, E.V. Evdokimov/ Multifunctional measuring system for analysis of electric parameters at traction and transformer substations of electric railways.....</b>	<b>67</b>
<b>T.A. Nesenyuk/ The use of RFID technology to detect insulation faults.....</b>	<b>72</b>

## MOTOR TRANSPORT

<b>V.B. Derzhanskiy, I.A. Taratorkin, A.S. Ushenin/ Improving service life of matching reducing gear in hydromechanical transmission of special wheeled chassis.....</b>	<b>77</b>
<b>Y.V. Perchatkin/ Ways to improve trailing implements for crawler tractors .....</b>	<b>82</b>

УДК 656.212.5

Петр Алексеевич Козлов, доктор технических наук, профессор, президент научно-производственного холдинга СТРАТЕГ (Современные транспортные технологии государства),  
 Вадим Юрьевич Пермикин, кандидат технических наук, доцент кафедры «Управление эксплуатационной работой» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС),  
 Виталий Сергеевич Колокольников, ассистент кафедры «Управление эксплуатационной работой» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС)

## АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ ПОСТРОЕНИЕ ИМИТАЦИОННЫХ МОДЕЛЕЙ КРУПНЫХ ТРАНСПОРТНЫХ ОБЪЕКТОВ

Petr A. Kozlov in, DSc in Engineering, Professor, President of the Research and Production Holding STRATEG (Modern transportation technologies of the state),  
 Vadim Yu. Permikin, PhD in Engineering, Associate Professor of the Chair "Management of Exploitation Work", USURT,  
 Vitaly S. Kolokolnikov, Assistant of the Chair "Management of Exploitation Work", USURT

## Computer Aided Construction Of Simulation Models Of Major Transport Facilities

### Аннотация

Сформулированы принципы автоматизированного построения имитационных моделей. Для крупных объектов (транспортных узлов) предложена методика создания моделей по частям с автоматическим объединением последних в единую модель.

**Ключевые слова:** модель, транспорт, станция, узел, автоматизация, имитация.

### Abstract

Principles of computer-aided construction of simulation models are formulated. For large facilities (transport hubs), the method of creating models by parts is proposed, with subsequent automatic combining the parts into a single model.

**Keywords:** model, transport, railway station, transport hub, automation, simulation.

### 1. Принципы автоматизированного построения

На первых этапах основную работу по построению модели брал на себя пользователь. Он подробно описывал схему станции и технологию ее работы, в том числе варианты выполнения каждой операции и управление процессами. Этот подход создавал целый ряд трудностей:

- а) необходимость введения огромного числа данных, что приводило с большой вероятностью к возникновению ошибок;
- б) трудоемкость построения модели, отпугивающая многих исследователей;
- в) пользователь должен был обладать технологической квалификацией не ниже хорошего маневрового диспетчера. Это бывало редко, а потеря гибкости в технологии приводила к искаженным результатам.

### Построение модели на уровне элементов

В этом случае пользователь строил модель полностью вручную (рис. 1).



Рисунок 1 — Построение модели на уровне элементов

Причем он подробно описывал технологию, в том числе задавал последовательность использования элементов в операции и параметры их работы.

### **Построение модели на уровне операций**

В данном случае в имитационную систему включается подсистема САПР (автоматизированного построения моделей). Подсистема САПР берет часть работы пользователя на себя (рис. 2).



Рисунок 2 — Построение модели на уровне операций

В основном это варианты выполнения операций с последовательностью использования элементов и параметрами их работы. Пользователь может только запретить некоторые варианты.

### **Построение модели на уровне процессов**

Здесь подсистема САПР должна знать основные процессы работы различных типов станций, а также принципы управления процессами. Пользователь описывает параметры процессов. Например, в случае выгрузки это:

- перечень путей, где могут находиться составы, ожидающие выгрузки;
- перечень фронтов выгрузки;
- перечень возможных путей накопления порожняка;
- временные параметры процесса.

Если при задании параметров структуры указать более точную специализацию путей, то при описании процесса перечень начальных и конечных путей можно опустить.

Подсистема САПР берет на себя значительную часть работы по построению модели (рис. 3).

При этом она сама строит структуру процесса в виде последовательности операций и условий их выполнения. Подсистема САПР должна максимально автоматизировать процесс построения модели [1]. Для этого она должна иметь достаточный набор инструментов (рис. 4).

## **2. Построение модели крупных объектов**

В качестве крупного объекта здесь рассматривается транспортный узел. Он состоит из нескольких станций, их может быть десятки. Строить такую большую модель как единую



Рисунок 3 — Построение модели на уровне процессов

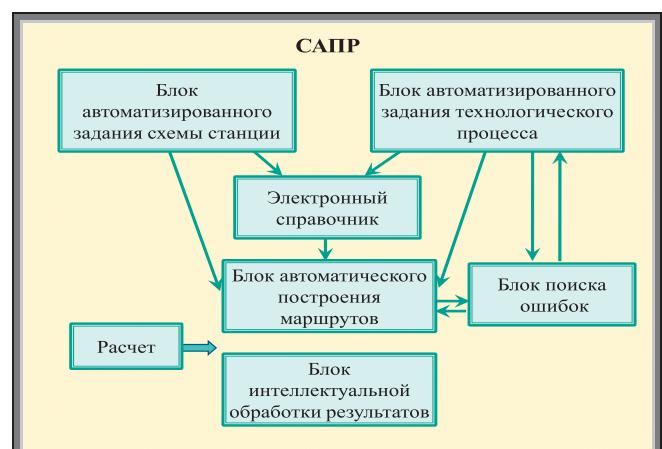


Рисунок 4 — Примерная структура подсистемы САПР

весьма непроизводительно. Ее сложно строить, а еще сложнее отлаживать. Поэтому предлагается методика построения модели узла постанционно различными разработчиками. Подсистема САПР потом должна автоматически объединить отдельные модели в единую.

### **Объединение схем станций**

Подсистема определяет перегоны, которыми нужно объединить станции, по их индексам. Затем она производит следующую процедуру (рис. 5):

$$x_{i\Delta} \oplus x_{j\Delta} \equiv x_{ij\Delta} \quad (1)$$

где  $\oplus$  — логическое сложение;

$x_{i\Delta}$  — часть перегона, соединенного с  $i$ -й станцией;

$x_{j\Delta}$  — часть перегона, соединенного с  $j$ -й станцией.

По этому алгоритму соединяются схемы всех станций.

### **Объединение технологий**

Для этого нужно соединить операции отправления с одной станции с операциями прибытия с другой (рис. 6). Причем необходимо учитывать, что и операции отправления, и операции

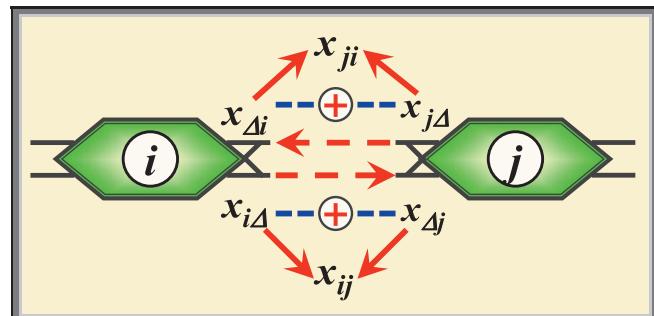


Рисунок 5 — Объединение схем станций через соединение перегонов

прибытия имеют несколько вариантов выполнения. Так что каждая операция представляет собой некоторое множество (см. рис. 6).

Процедура объединения технологий будет иметь вид:

$$\{\xi_{i\Delta}\} \wedge \{\xi_{\Delta j}\} \equiv \{\xi_{ij}\}; \quad (2)$$

$$\{\xi_{j\Delta}\} \wedge \{\xi_{\Delta i}\} \equiv \{\xi_{ji}\}. \quad (3)$$

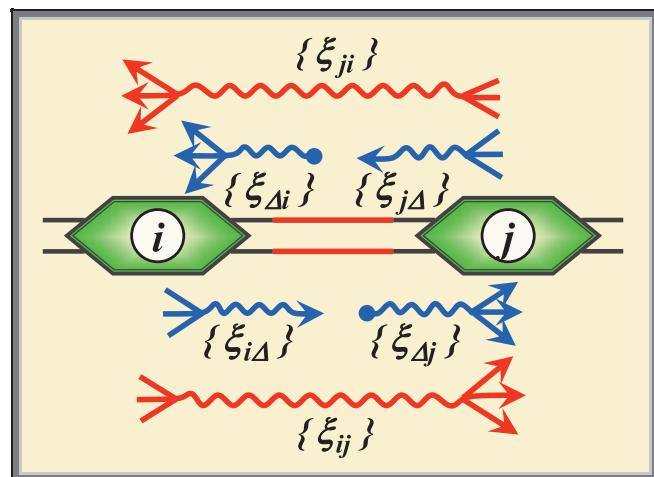


Рисунок 6 — Объединение операций отправления и приема

### Отображение узлового управления

Узел функционирует как единое целое, и в нем присутствует не только станционное, но и узловое управление [2]. Узловой диспетчер выбирает режимы работы в зависимости

от значения некоторых узловых параметров (например, число порожних вагонов определенного типа в узле, число вагонов с определенным родом груза и т. п.). Узловые параметры должны быть отражены уже в станционных моделях (рис. 7).

Применительно к приведенной схеме процедура создания параметров для узлового управления имеет вид:

$$\alpha_i \wedge \alpha_j \wedge \alpha_k \equiv \alpha; \quad (4)$$

$$\beta_i \wedge \beta_j = \beta; \quad (5)$$

$$\gamma_j \wedge \gamma_k = \gamma, \quad (6)$$

где  $\alpha_i, \beta_i, \gamma_i$  — узловые параметры, описанные в модели  $i$ -й станции;

$\alpha, \beta, \gamma$  — узловые параметры в модели узла.

Алгоритмы объединения схем станций, технологий и управления позволят подсистеме САПР построить узловую модель из моделей станций.

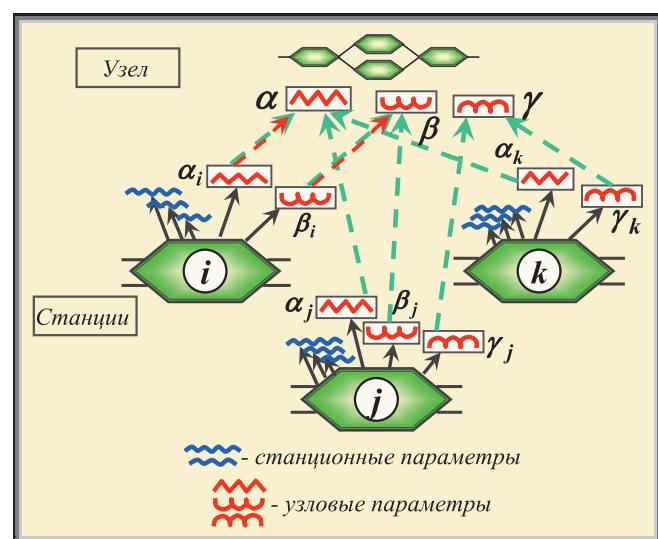


Рисунок 7 — Введение узловых параметров в моделях станций

Методика автоматизированного построения подробных имитационных моделей по частям может быть с успехом использована при осуществлении технологической экспертизы проектов развития транспортной инфраструктуры [3].

## Литература

1. Козлов П.А., Владимирская И.П., Козлова В.П. Экономико-технологические риски в проектах развития транспортной инфраструктуры // Транспорт Российской Федерации. 2009. № 2 (21). С. 24 — 27.
2. Козлов П.А., Александров А.Э. Имитационная экспертиза — необходимая процедура в составе транспортного проекта // Железнодорожный транспорт. 2010. № 3. С. 52 — 53.
3. Козлова В.П. Расчет технико-технологических параметров для оценки эффективности инвестиционных транспортных проектов // Транспорт Урала. 2007. № 3 (14). С. 9 — 11.

## References

1. Kozlov P.A., Vladimirskaya I.P., Kozlova V.P. Ekonomiko-tehnologicheskie riski v proektakh razvitiya transportnoy infrastruktury [Economic and technological risks in transport infrastructure development projects] // Transport Rossiiyiskoy Federatsii. 2009. No. 2 (21). p.24 — 27.
2. Kozlov P.A., Aleksandrov A.E. Imitatsionnaya ekspertiza — neobkhodimaya protsedura v sostave transportnogo proekta [Simulation expertise - a necessary procedure in the transport project] // Zheleznodorozhnyy transport. 2010. No. 3. p. 52 — 53.
3. Kozlova V.P. Raschet tekhniko-tehnologicheskikh parametrov dlya otsenki effektivnosti investitsionnykh transportnykh proektov [Calculation of technical and technological parameters for evaluation of investment projects in transport industry] // Transport of the Urals 2007. 3 (14). p.9-11.

УДК 656.2

Елена Александровна Русакова, доцент кафедры «Автоматика, телемеханика и связь» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС)

## МЕТОДОЛОГИЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ УЩЕРБА ПРЕДПРИЯТИЯ ОТ ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ ПРОИСШЕСТВИЙ

Elena A. Rusakova, Associate Professor of the Chair “Automation, telemechanics and communication” of Ural State University of Railway Transport (USURT)

### Methodology Of Determining Accident Damage

#### Аннотация

Дана классификация последствий чрезвычайных происшествий на предприятиях железнодорожного транспорта. Рассмотрена семантическая модель определения ущерба и риска чрезвычайных происшествий. Предложена методика определения риска чрезвычайных происшествий и риска ущерба от чрезвычайных происшествий с учетом пространственного распределения объектов инфраструктуры железной дороги в зависимости от длительности периода прогнозирования. Предложенная в статье методика позволяет определять объем финансовых средств, необходимых для ликвидации риска чрезвычайных происшествий или снижения их последствий. Сформулированы требования к составу данных, необходимых для функционирования системы оценки рисков.

**Ключевые слова:** железнодорожный транспорт, инфраструктура, экономический ущерб, система оценки рисков, чрезвычайное происшествие, граф состояний, техническое обслуживание, информационные системы.

#### Abstract

The classification of accidents' consequences at rail transport companies is given. The semantic model of damage and risk assessment system of accidents is viewed. The method of damage and risk assessment system of accidents with regard to railway infrastructure facilities allocation depending on prediction period is offered. The suggested method helps to evaluate amount of finance for risks' elimination of accidents or their consequences' minimization. The requirements for data that is necessary for risk assessment system operation are formulated.

**Keywords:** rail transport, infrastructure, economic damage, risk assessment system, accident, state chart, maintenance, information systems.

**Ф**ункционирование любого предприятия происходит в условиях опасности возникновения чрезвычайных происшествий (ЧП), вызывающих финансовые затраты на мероприятия по ликвидации их последствий.

При планировании работы на предстоящий период и разработке управляющих воздействий по снижению рисков ЧП необходимо прогнозировать возможный ущерб от возникновения ЧП, что позволит оптимизировать распределение имеющихся средств на эти цели и оценить эффективность соответствующих мероприятий.

Исследуем данную постановку вопроса применительно к предприятиям инфраструктуры железнодорожного транспорта. При решении задачи будем рассматривать предприятие как сложную эргатическую систему. При анализе ЧП необходимо учитывать и причину их возникновения, и последствия. В эргатической системе ЧП могут иметь стихийный, технико-технологический характер или вызываться действиями людей (рис. 1) [1]. При анализе последствий необходимо учитывать ущерб не только для рассматриваемой технической системы и смежных с ней систем, но и для окружающей среды и здоровья людей (рис. 2).

Рассмотрим семантическую модель определения ущерба и риска ЧП (рис. 3). Под ущербом будем понимать финансовую оценку последствий ЧП, приведенных на рис. 2.

Риск ЧП ( $R_{\text{ЧП}}$ ) учитывает вероятность возникновения ЧП  $i$ -го вида [2]

$$R_{\text{ЧП}_i} = p(E_i), \quad (1)$$

где  $E_i$  — ЧП  $i$ -го вида.

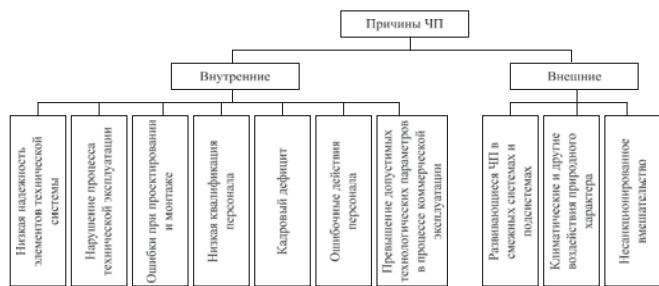
Однако последствия ЧП могут быть различными. Их оценка учитывается риском ущерба ЧП —  $R(Y)$ , т. е.

$$R(Y_i) = R_{\text{ЧП}_i} \cdot Y(E_i) = p(E_i) \cdot Y(E_i), \quad (2)$$

где  $Y(E_i)$  — ущерб от ЧП  $i$ -го вида.

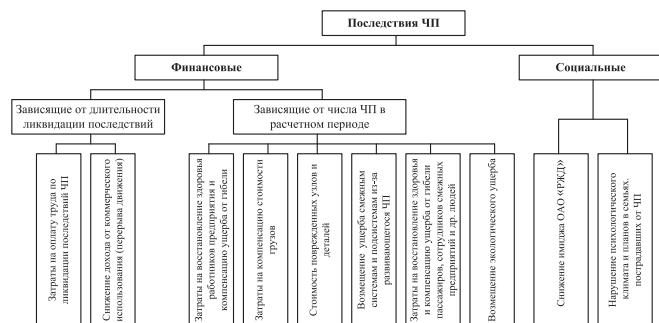
При решении поставленной задачи все причины необходимо структурировать по месту их зарождения на внутренние (собственные)  $E_c$  и внешние  $E_v$ .

Последствия ЧП по месту их реализации тоже структурируем на внутренние и внешние. Приведенная на рис. 3 семан-



**Рисунок 1 — Классификация причин ЧП на предприятиях инфраструктуры**

тическая модель устанавливает правила игры по определению источника компенсации ущерба. Если источником причины ЧП является смежная подсистема ( $E_B$ ), то ущерб должна компенсировать эта подсистема или система более высокого ранга и при определении риска ущерба предприятия может не учитываться. С другой стороны, ЧП на предприятии может оказаться развивающимся и привести к ущербу  $Y_{CBi}$  для сторонних предприятий, при этом компенсировать этот ущерб должно предприятие, на котором возникло ЧП. В данном случае возникший ущерб должен включаться в риск ущерба предприятия  $R_c$ .



**Рисунок 2 — Классификация последствий ЧП на предприятиях инфраструктуры железнодорожного транспорта**

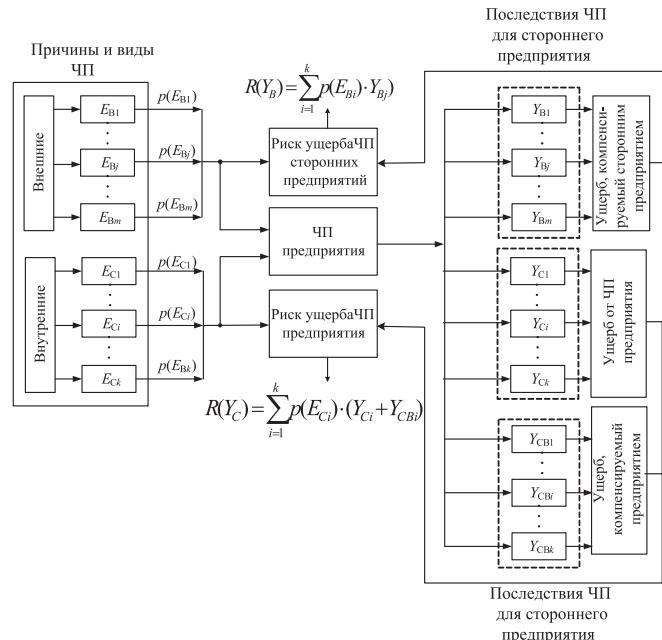
Однако учесть все последствия ЧП финансовым ущербом сложно, а иногда и невозможно. Примером может служить снижение имиджа предприятия из-за нарушения договорных условий.

Чаще всего воздействовать на показатели внешних причин нельзя. В этом случае необходимо принимать меры по уменьшению возможного ущерба. Например, в Японии на скоростной линии Синкансен при возникновении опасной сейсмической обстановки автоматически отключается электроснабжение. Таким образом исключается опасность поражения людей электрическим током, разрушения электрических аппаратов и узлов токами короткого замыкания.

Предлагаемая методология позволяет оценить эффективность управляющих воздействий по снижению риска ущерба внешних ЧП. Она может использоваться на стадии проектирования, строительства или реконструкции предприятий инфраструктуры железной дороги.

Управлять рисками ЧП можно, воздействуя на их причину и величину ущербов. Особенностью предприятий инфраструктуры железнодорожного транспорта является их про-

тяженнность в пространстве. Поэтому структурирование ЧП необходимо выполнять с учетом их пространственного распределения.



**Рисунок 3 — Семантическая модель определения ущерба и риска**

Интенсивность возникновения ЧП  $\lambda$  меняется по длине участка инфраструктуры  $l$  и определяется числом событий в единицу времени на единице длины (обычно — 100 км). Например, для системы электроснабжения, кроме протяженных элементов (контактный провод, несущий трос, усиливающие провода), на участке длиной 100 км находятся сосредоточенные элементы (опоры, консоли, фиксаторы, изоляторы и т. д.), число которых может быть различным. Поэтому для определения интенсивности ЧП, вызываемых отказами сосредоточенных элементов, в единицах 1/год·100 км нужно ввести понятие эталонного числа элементов  $i$ -го вида на участке длиной 100 км —  $M_{i_0}$ . Результаты мониторинга на реальном участке с числом элементов  $i$ -го вида ( $T_i$ ) должны учитываться с коэффициентом приведения

$$k_i = \frac{M_i}{M_{i_0}}. \quad (3)$$

Тогда интенсивность отказов

$$\lambda_{i_0} = \frac{\lambda_i}{k_i}. \quad (4)$$

Например, максимальная длина пролета для участков железной дороги с максимальной скоростью движения до 160 км/ч по качеству токосъема принимается равной 70 м. Поэтому на одном километре железной дороги устанавливается минимум 14 опор контактной сети ( $M_{i_0} = 14$ ), которые и могут быть приняты для эталонного участка. От минимального числа опор зависит минимальное число других узлов и элементов —  $M_{j_0}$  (изоляторов, струн, консолей и т. д.). Интенсивность событий определяется на основании мони-

торинга состояния конкретного участка контактной сети, длина пролета на котором может отличаться от эталонной. Например, при длине пролетов 56 м количество опор на этом участке будет  $M_o = 18$ . В данном случае коэффициент приведения интенсивности воздействия ЧП на элементы участка составит

$$k_i = \frac{M_o}{M_{i_0}} = 1,28. \quad (5)$$

Любое ЧП нарушает процесс функционирования предприятия, включающий техническую и коммерческую эксплуатацию [3]. В процессе коммерческой эксплуатации реализуется цель функционирования подсистемы. Для инфраструктуры железной дороги это услуга по обеспечению возможности передвижения подвижного состава. Техническая эксплуатация представляет собой комплекс мер по обеспечению надежности подсистемы, в том числе по ликвидации последствий ЧП. Особенностью инфраструктуры железнодорожного транспорта как эргатической системы является то, что персонал в подавляющем большинстве занят в процессе технической эксплуатации. Затраты на организацию коммерческой эксплуатации незначительны в отличие, например, от локомотивного хозяйства, где в этом процессе заняты локомотивные бригады, диспетчеры и т. д.

Ущерб  $Y_{Ct}$  вызываемый ЧП типа  $E_c$  в процессе технической эксплуатации за время  $T$ , состоит из двух составляющих:

затрат  $Y_{o_t}$  не зависящих от длительности восстановления (затраты на материалы и оборудование, необходимые для восстановления работоспособного состояния системы, дополнительные потери электрической энергии на торможение и разгон поездов [4, 5], ущерб, нанесенный здоровью пострадавших людей);

затрат  $Y_{\tau_t}$  определяемых временем ликвидации ЧП,

$$Y_T = Y_K + Y_{\tau_t}. \quad (6)$$

Ущерб  $Y_{Kt}$  вызванный ЧП в процессе коммерческой эксплуатации, равен потере доходов предприятия и смежных подсистем за время ликвидации последствий ЧП

$$Y_K = y_K(T_B) = D_0 T_B, \quad (7)$$

где  $D_0$  — доход предприятия в единицу времени;  
 $T_B$  — время ликвидации последствий ЧП.

Кроме того, часть затрат определяется эксплуатационными расходами на ликвидацию последствий ЧП —  $Y_{\tau_t}$  и зависит от времени ликвидации последствий ЧП. Это затраты на оплату труда, на эксплуатацию используемых машин, инструментов и приборов. Примем, что в единицу времени их величина составляет  $\mathcal{E}_0$ . Тогда ущерб, зависящий от продолжительности процесса ликвидации последствий,

$$Y_T = (D_0 + \mathcal{E}_0) T_{\tau_t}, \quad (8)$$

а общий ущерб от ЧП одного типа

$$Y_{Ci} = Y_0 + (D_0 + \mathcal{E}_0) T_{\tau_t}. \quad (9)$$

Для определения ущерба предприятия от возможных ЧП необходимо учитывать распределение их числа  $N_E$  и времени ликвидации последствий  $T_B$  на прогнозируемом периоде  $\tau$ . Число событий  $N_E$  является случайной величиной и зависит от интенсивности возникновения ЧП —  $\lambda$ . Общее время ликвидации последствий ЧП на прогнозируемом периоде зависит от числа событий и интенсивности их ликвидации  $\mu$ .

Рассмотрим порядок определения ущерба при одиночном ЧП. Граф состояний системы [6] представлен на рис. 4, где  $E_0$  — состояние нормального функционирования системы,  $E_1$  — состояние отказа, вызванного ЧП.

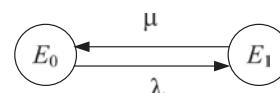


Рисунок 4 — Граф состояний системы при одиночном ЧП

Система описывается дифференциальным уравнением

$$\begin{cases} \frac{dp(E_0)}{dt} = -\lambda \cdot p(E_0) + \mu \cdot p(E_1), \\ p(E_0) + p(E_1) = 1 \end{cases}, \quad (10)$$

где  $\frac{dp(E_0)}{dt}$  — приращение вероятности нахождения системы в состоянии  $E_0$ ;

$\lambda \cdot p(E_0)$  — уменьшение вероятности нахождения системы в состоянии  $E_0$  из-за возникновения ЧП;

$\mu \cdot p(E_1)$  — увеличение вероятности нахождения системы в состоянии  $E_0$  из-за ликвидации ЧП.

Если  $t = 0$ , то  $p(E_0) = 1$ ,  $p(E_1) = 0$ .

Решение этого уравнения:

$$p(E_0) = \frac{\mu}{\lambda + \mu} \left[ 1 + \frac{\lambda}{\mu} \exp\{-(\lambda + \mu)t\} \right]; \quad (11)$$

$$p(E_1) = \frac{\lambda}{\lambda + \mu} \left[ 1 - \exp\{-(\lambda + \mu)t\} \right] \quad (12)$$

позволяет определить финальные вероятности нахождения в рассмотренных состояниях (при  $t \rightarrow \infty$ ) (рис. 5):

$$p(E_0)_\phi = \frac{\mu}{\lambda + \mu}; \quad (13)$$

$$p(E_1)_\phi = \frac{\lambda}{\lambda + \mu} \quad (14)$$

и средние значения времени нахождения системы в состояниях  $E_0$  и  $E_1$  —  $T_0$  и  $T_1$  соответственно:

$$\begin{aligned} \bar{T}_0(\tau) &= \int_0^\tau p(E_0) dt = \int_0^\tau \frac{\mu}{\lambda + \mu} \left[ 1 + \frac{\lambda}{\mu} \exp\{-(\lambda + \mu)t\} \right] dt = \\ &= \frac{\mu\tau}{\lambda + \mu} + \frac{\lambda}{(\lambda + \mu)^2} (1 - \exp[-(\lambda + \mu)\tau]); \end{aligned} \quad (15)$$

$$\bar{T}_1(\tau) = \int_0^\tau p(E_1) dt = \frac{\lambda\tau}{\lambda + \mu} - \frac{\lambda}{(\lambda + \mu)^2} (1 - \exp[-(\lambda + \mu)\tau]). \quad (16)$$

Однако решение уравнения (10) не позволяет определить ни число возникновений ЧП на интервале  $\tau$ , ни длительность времени ликвидации последствий каждого из них.

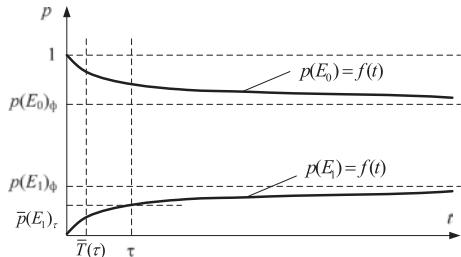


Рисунок 5 — Графическое представление решения системы дифференциальных уравнений состояния

При определении числа событий на прогнозируемом периоде  $[0, \tau]$  представим процесс функционирования в виде потока событий (ПС).

Учитывая, что  $\mu >> \lambda$ , число прямых переходов  $E_0 \rightarrow E_1$  можно принять равным числу обратных переходов  $E_1 \rightarrow E_0$  на прогнозируемом интервале  $\tau$ . Последовательность отрезков времени  $T_{01}, T_{11}, T_{02}, T_{12}, \dots, T_{0n}, T_{1n}$  является ПС, описывающим процесс функционирования системы (рис. 6).

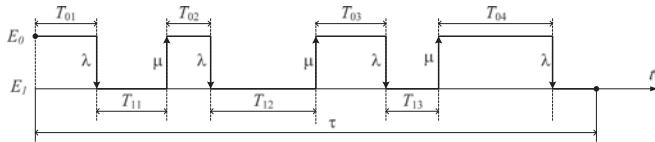


Рисунок 6 — Процесс функционирования системы

Общее время пребывания системы в состоянии  $E_0$  на прогнозируемом периоде (при  $\tau \rightarrow \infty$ )

$$\tau_0 = \sum_{i=1}^n T_{0i} = \frac{\mu}{\lambda + \mu} \tau, \quad (17)$$

а в состоянии  $E_1$

$$\tau_1 = \sum_{i=1}^n T_{1i} = \frac{\lambda}{\lambda + \mu} \tau. \quad (18)$$

Представим этот поток событий как сумму двух простейших потоков:  $\text{ПС}_0 (T_{01}, T_{02}, \dots, T_{0n})$  и  $\text{ПС}_1 (T_{11}, T_{12}, \dots, T_{1n})$  (рис. 7). Такие потоки обладают свойствами ординарности, стационарности и отсутствия последействия.

Таким образом, число событий прямых переходов нужно определять на интервале  $\tau_0$ , а число обратных — на интервале  $\tau_1$ .

Вероятность числа событий простейшего ПС на интервале времени  $[0, t]$  с учетом того, что  $n$ -е событие происходит на бесконечно малом интервале времени  $[t, t+\Delta t]$ , определяется следующей формулой [7]:

$$p(n) = \frac{(\lambda t)^n}{n!} \exp(-\lambda t) \text{ при } t \geq 0. \quad (19)$$

Вероятность  $n$ -го числа прямых переходов на прогнозируемом интервале времени  $\tau$  равна

$$p(n_0) = \frac{\left( \lambda \cdot \tau \frac{\mu}{\lambda + \mu} \right)^n}{n!} \cdot \exp\left(-\lambda \frac{\lambda \cdot \mu}{\lambda + \mu} \tau\right). \quad (20)$$

Аналогично можно получить формулу для вероятности  $n$ -го числа обратных переходов

$$p(n_1) = \frac{\left( \mu \cdot \tau \frac{\lambda}{\lambda + \mu} \right)^n}{n!} \cdot \exp\left(-\mu \frac{\lambda \cdot \mu}{\lambda + \mu} \tau\right). \quad (21)$$

Как и следовало ожидать, вероятности числа прямых и обратных переходов совпадают. Формула (19) для определения вероятности появления  $n$  случаев переходов при однотипных ЧП на фиксированном отрезке времени  $\tau$  примет следующий вид:

$$p(n, \lambda, \tau) = \frac{(\lambda \tau)^n}{n!} \exp(-\lambda \tau), \quad \tau \geq 0, \quad (22)$$

где  $\lambda = \lambda_{\text{окн}} = \frac{\lambda \mu}{\lambda + \mu}$ .

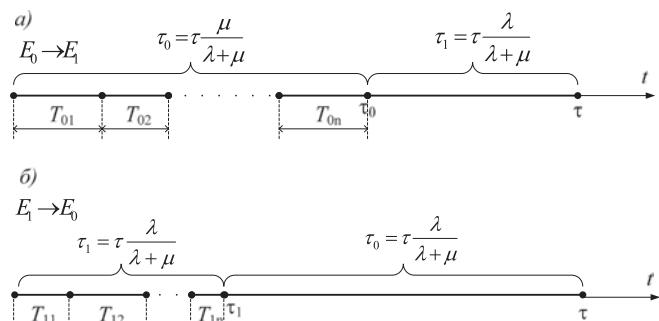


Рисунок 7 — Простейшие потоки событий: а — поток событий прямых переходов; б — поток событий обратных переходов

Рассмотрим два варианта определения ущерба от ЧП.

1. По средним значениям числа ЧП на интервале  $\tau$  и средней длительности времени ликвидации ЧП. Среднее число ЧП в соответствии с формулой (22)

$$\bar{n} = \sum_{n=0}^{\infty} n \frac{(\lambda \tau)^n}{n!} \exp(-\lambda \tau) = \lambda \tau \sum_{n=0}^{\infty} n \frac{(\lambda \tau)^{n-1}}{(n-1)!} \exp(-\lambda \tau) = \lambda \tau, \quad (23)$$

так как экспоненциальную функцию можно разложить в ряд Маклорена [8]

$$\sum_{n=0}^{\infty} \frac{(\lambda \tau)^{n-1}}{(n-1)!} = \exp(\lambda \tau). \quad (24)$$

Средняя длительность ликвидации одного ЧП равна  $1/\mu$ . Общее время ликвидации ЧП на интервале  $\tau$

$$\bar{T}_1 = \frac{1}{\mu} \bar{n} = \frac{\lambda \tau}{\mu}. \quad (25)$$

Ущерб за период прогнозирования  $\tau$

$$\bar{y} = y_N \bar{n} + Y_t \bar{T}_1 = \lambda \tau \left( Y_0 + \frac{Y_T}{\mu} \right), \quad (26)$$

где  $Y_0$  — ущерб, вызванный фактом появления ЧП, отнесенный к одному ЧП;

$Y_T$  — ущерб, вызванный длительностью ЧП, отнесенный ко времени его ликвидации.

Этот подход не позволяет оценить риск ЧП, риск ущерба ЧП и их зависимость от длительности прогнозируемого периода  $\tau$ .

2. На прогнозируемом интервале в общем случае система может находиться в одном из  $S_n$  состояний ( $0 \leq n \leq N$ ). Теоретически число ЧП стремится к бесконечности. Однако вероятность появления  $N$  событий быстро убывает с увеличением их числа. Можно ограничиться рассмотрением  $N$  числа событий при выполнении условия  $p(N) \leq \varepsilon$ , где  $\varepsilon$  — принимаемая точность вычислений.

Определим закон распределения ущерба с учетом случайного характера числа событий ЧП. Ущерб в состоянии  $S_n$  равен

$$y_n = n \left( Y_0 + \frac{Y_T}{\mu} \right). \quad (27)$$

Распределение ущерба с учетом случайного характера числа ЧП имеет вид

$$F(Y_N) = p(y_n \leq Y_N) = \sum_{n=1}^N \frac{(\lambda_0 \tau)^n}{n!} \exp(-\lambda_0 \tau). \quad (28)$$

Риск ущерба в соответствии с формулами (2) и (22)

$$R(Y_n) = n \left( Y_0 + \frac{Y_T}{\mu} \right) \frac{(\lambda_0 \tau)^n}{n!} \exp(-\lambda_0 \tau). \quad (29)$$

Просуммировав риски ущерба по всем состояниям, получим среднее значение ущерба на интервале  $\tau$

$$\bar{y}_\tau = \sum_{n=1}^N R(Y_n) = \sum_{n=1}^{N_{\max}} n \left( Y_0 + \frac{Y_T}{\mu} \right) \frac{(\lambda_0 \tau)^n}{n!} \exp(-\lambda_0 \tau). \quad (30)$$

Риск ЧП представляет собой вероятность того, что на интервале  $\tau$  произойдет хотя бы одно ЧП, т. е.

$$R_{\text{ЧП}} = p(T_{01} \leq \tau) = 1 - \exp(-\lambda_0 \tau).$$

Функция распределения ущерба от ЧП имеет вид

$$F(y) = P(y \leq Y) = \sum_{n=1}^{N_{\max}} \frac{(\lambda_0 \tau)^{n-1}}{(n-1)!} \exp(-\lambda_0 \tau), \quad (31)$$

где  $n = \frac{y}{Y_0 + Y_T / \mu}$ .

Приведенная выше методика позволяет определить объем финансовых ресурсов, необходимых для ликвидации или снижения последствий ЧП.

На рис. 8 приведены графики функции распределения ущерба с учетом случайного характера числа ЧП при величине ущерба от одиночного ЧП  $Y_0 = 10000$  руб. и затратах, связанных с длительностью восстановления  $D_0 = 70000000$  руб./год на периоде прогнозирования 10 лет. Из графика видно, что применение мероприятий, направленных на повышение

надежности за счет снижения интенсивности отказов приводит к снижению величины ущерба от возникновения ЧП. Так, при интенсивности отказов  $\lambda = 0,25$  вероятность того, что величина ущерба не превысит  $Y_{n1} = 199817,3$  руб., равна 0,78 (см. рис. 8а). При уменьшении интенсивности отказов до величины  $\lambda = 0,1$  при той же вероятности величина ожидаемого ущерба снизится до  $Y_{n2} = 99908,7$  руб. В целом выигрыш от проведенных мероприятий равен заштрихованной на рисунке области.

Снижать величину ущерба можно также и за счет мероприятий, направленных на увеличение интенсивности восстановления (сокращение времени локализации места ЧП и времени доставки персонала к нему, регулярное повышение квалификации обслуживающего персонала, использование новой техники и технологий для ликвидации последствий ЧП и т. д.) (см. рис. 8б).

По графику зависимости  $F(Y_n)$  (см. рис. 8) при планировании эксплуатационной деятельности можно, задаваясь допустимым уровнем риска ущерба, определять объем необходимых денежных средств на ликвидацию последствий ЧП на заданном интервале планирования, в том числе и за период жизненного цикла объектов инфраструктуры железной дороги.

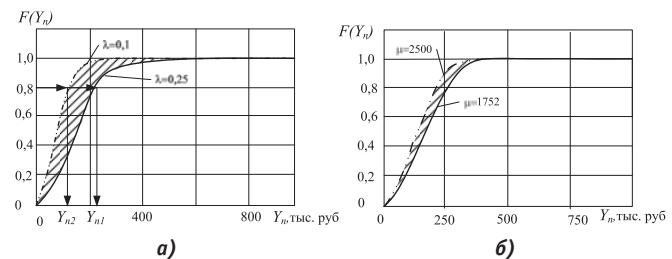


Рисунок 8 — Графики функции распределения ущерба с учетом случайного характера числа ЧП: а — при  $\mu = 1752$ ; б — при  $\lambda = 0,25$

Риск возникновения ЧП (рис. 9) дает информацию только о возможной частоте их появления и не позволяет оценить последствия ЧП. Например, при  $R_{\text{ЧП}} = 0,95$  с вероятностью 0,05 не произойдет ЧП при интенсивности ЧП  $\lambda = 0,3$  за 10 лет.

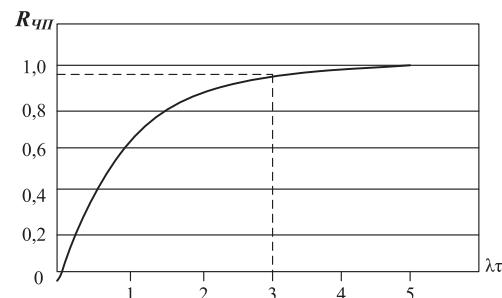


Рисунок 9 — Зависимость риска возникновения ЧП от их интенсивности и длительности периода прогнозирования

В [9] в первом приближении была определена структура и сформулированы требования к информационно-аналитической системе предприятия инфраструктуры железной дороги — «виртуальная модель инфраструктуры» (ВМИ). На основе приведенных выше рассуждений можно определить состав

данных, необходимых для функционирования системы оценки рисков:

— данные обо всех элементах инфраструктуры предприятия (как протяженных, так и сосредоточенных) с учетом их пространственного расположения;

— сведения об отказах элементов инфраструктуры предприятия (количество отказов каждого элемента на интервале времени, равном интервалу прогнозирования; интервалы между отказами элементов);

— информация о восстановлении элементов (время восстановления, финансовые затраты на восстановление);

— информация об ущербе, нанесенном предприятию каждым конкретным ЧП (потери дохода предприятием, ущерб, нанесенный здоровью и жизни пострадавших людей, дополнительные затраты на электроэнергию, связанные с ЧП).

При наличии исходной информации предлагаемая методика позволяет определить ущерб от ЧП и оценить эффективность мероприятий по их предупреждению и снижению риска.

## Литература

- Нестеров В.Л., Радченко В.И., Русакова Е.А. Количественные показатели качества подготовки специалистов железных дорог // Транспорт Урала. 2009. № 1 (20). С. 18 — 20.
- Ефимов А.В., Галкин А.Г. Надежность и диагностика систем электроснабжения железных дорог. М.: УМК МПС России, 2000. 512 с.
- Ефимов А.В. Мониторинг экономических показателей надежности транспортных систем // Транспорт. Наука, техника, управление : обзорная информация. М.: ВИНИТИ. 2000. № 4. С. 33 — 37.
- Галкин А.Г. Совершенствование системы обслуживания контактной сети электрических железных дорог на основе технической диагностики: дис. ... канд. техн. наук. М.: МИИТ, 1988.
- Ефимов А.В., Галкин А.Г. Роль информации об отказах в управлении системой электроснабжения электрических железных дорог // межвуз. сборник науч. трудов МИИТ. 1987. Вып. 788.
- Вентцель Е.С., Овчаров Л.А. Прикладные задачи теории вероятностей. М.: Радио и связь, 1983.
- Тараканов К.В., Овчаров Л.А., Тырышкин А.Н. Аналитические методы исследования систем. М.: Советское радио, 1974. 240 с.
- Двайт Г.Б. Таблицы интегралов и другие математические формулы. М.: Наука, 1973.
- Русакова Е.А. Мониторинг состояния инфраструктуры железной дороги // Транспорт Урала. 2011. № 4 (31). С. 22 — 25.

## References

- Nesterov V.L., Radchenko V.I., Rusakova E.A. *Kolichestvennye pokazateli kachestva podgotovki spetsialistov zheleznykh dorog* [Quantitative indicators of the quality of railway specialists' training] // Transport of the Urals. — Ekaterinburg, 2009. — No. 1 (20). — p. 18—20
- Efimov A.V., Galkin A.G. *Nadyozhnost i diagnostika sistem elektronsnabzheniya zheleznykh dorog*. [Reliability and diagnostics of railway power supply systems] — UMK MPS of Russia, 2000. — 512 p.
- Efimov A.V. *Monitoring ekonomicheskikh pokazateley nadezhnosti transportnykh sistem* [Monitoring of economic indicators of transport systems reliability] // Transport. Nauka, tekhnika, upravlenie : Sbornik obzornoy informatsii. [Transport. Science, technology, management: Collection of survey information.] — M: VINITI, 2000. — No.4. — p.33 — 37
- Galkin A.G. *Dissertatsiya na soiskanie uchenoj stepeni kandidata technicheskikh nauk "Sovershenstvovanie sistemy obsluzhivanija kontaktnoi seti elektricheskikh zheleznykh dorog na osnove tekhnicheskoi diagnostiki"* [PhD thesis in Engineering "Improving maintenance service of electric railways contact network on the basis of technical diagnostics]. — M: MIIT, 1988
- Efimov A.V., Galkin A.G. *Rol informatsii ob otkazakh v upravlenii sistemoy elektrosnabzheniya elektricheskikh zheleznykh dorog*. Mezhevuzovskiy sbornik nauchnykh trudov [The role of information about failures in railway power supply system control. Interuniversity collection of scientific papers] MIIT. Issue 788 — M: MIIT, 1987
- Tarakanov K.V., Ovcharov L.A., Tyryshkin A.N. *Analiticheskie metody issledovaniya sistem*. [Analytical methods for systems' study.] — M: Sovetskoe radio, 1974, 240 p
- Ventsel E.S., Ovcharov L.A. *Prikladnye zadachi teorii veroyatnostey*. [Applied problems in probability theory] — M: Radio i svyaz, 1983.
- Dwight G.B. *Tablitsy integralov i drugie matematicheskie formuly*. [Integral tables and other mathematical formula.] — M:Nauka, 1973.
- Rusakova E.A. *Monitoring sostoyaniya infrastruktury zheleznoy dorogi* // Transport of the Urals. [Railway infrastructure status monitoring] — Ekaterinburg :USURT, 2011. — No. 4 (31). — p. 22-25

УДК 625.748.54

Рудольф Николаевич Ковалев, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой экономики транспорта и логистики Уральского государственного лесотехнического университета (УГЛТУ),  
Евгений Владимирович Кошурев, аспирант кафедры экономики транспорта и логистики Уральского государственного лесотехнического университета (УГЛТУ)

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ НЕОБХОДИМОГО КОЛИЧЕСТВА ТОПЛИВОРАЗДАТОЧНЫХ КОЛОНОК ДЛЯ АВТОЗАПРАВОЧНЫХ СТАНЦИЙ

Rudolph N. Kovalev, Professor, DSc in Engineering, Head of the Chair of Economics of Transport and Logistics of Ural State Forestry University (USFU),  
Evgeniy V. Kochurov, postgraduate student, Chair of Economics of Transport and Logistics of Ural State Forestry University (USFU)

## Determining Necessary Number Of Fuel Dispensers For Filling Stations

### Аннотация

Предложена методика расчета необходимого количества топливораздаточных колонок на автозаправочной станции, позволяющая определить эффективность работы как самой станции, так и ТРК. Методика позволяет на стадии проектирования АЗС определиться с оптимальным количеством оборудования, что позволит уменьшить срок окупаемости проекта.

На основе предложенной методики можно установить границы возможной зоны размещения будущей АЗС в городе в зависимости от интенсивности движения и структуры транспортного потока на основе существующей транспортной сети, тем самым определяя и формируя рациональный комплекс сервисных услуг в соответствии с плотностью застройки.

**Ключевые слова:** автозаправочная станция, топливораздаточная колонка, интенсивность движения, коэффициент использования ТРК, дополнительные услуги.

### Abstract

The method of calculating the required amount of fuel dispensers at the filling station is suggested, which allows determining operational efficiency of both the station and the fuel dispenser. The method allows to determine the optimal number of equipment at the stage of filling station design, thus reducing payback period of the project.

Using of the proposed method, the boundaries of the possible area for future location of filling station within the city can be determined, depending on traffic intensity and traffic patterns on the basis of the existing urban transport network, thereby defining and shaping the rational range of services, depending on the density of urban development.

**Keywords:** gas filling station, fuel dispenser, traffic intensity, fuel dispenser utilization ratio, additional services.

С ростом автомобилизации населения страны растет и количество автозаправочных станций (АЗС), оказывающих различные сопутствующие услуги. Результатом их бессистемного размещения является то обстоятельство, что встречаются АЗС с большим количеством топливораздаточных колонок (ТРК) и хорошо развитой системой дополнительных услуг, на которых есть значительное число постоянных клиентов, но площадь и, что самое важное, количество ТРК позволяет обслужить в 2—3 раза больше клиентов. Нередки и обратные случаи, когда на достаточно большой площади земельного участка у дороги с интенсивным движением размещается небольшая (на 2—3 колонки) станция, к которой выстраивается огромная очередь из желающих заправиться. И в первом, и во втором случае основные ошибки и их последствия просматриваются очень легко.

В первом случае лишние, практически не используемые дорогостоящие колонки удлиняют срок окупаемости, повышают стоимость содержания станции, что отрицательно сказывается на доходах, поступающих с этой АЗС.

Недостатки есть и во втором случае: никто не любит стоять в очередях, поэтому многие клиенты стараются заправиться в другом месте, что приводит к потере большого количества посетителей. Этому способствует и персонал станции, из-за высокой загруженности не уделяющий необходимого внимания каждому клиенту, что также отрицательно сказывается на работе АЗС. К тому же на такой станции топливораздаточное оборудование подвергается повышенному износу, являясь причиной постоянных поломок, образующих дополнительные заторы, и вынуждая посетителей заправляться в другом месте.

Таким образом, от выбора количества топливораздаточных колонок зависит популярность у клиентов и дальнейшая работа всей АЗС. Кроме того, в прямой зависимости от количества колонок находится и площадь навесной конструкции, также имеющая немалую стоимость, поэтому вопрос, сколько ТРК необходимо устанавливать на АЗС, требует всестороннего изучения.

В первую очередь количество ТРК зависит от того, сколько посетителей будет заправляться на станции. Для этого в течение нескольких недель производится суточный подсчет проезжающего мимо выбранного места транспорта и определяется мощность АЗС (табл. 1) [1, 2].

**Таблица 1 — Размещение и мощность АЗС**

Интенсивность движения, ед./сут	Мощность АЗС, число заправок в сутки	Расстояние между АЗС, км	Размещение АЗС
< 1 000 — 2 000	250	30 — 40	Одностороннее
< 2 000 — 3 000	500	40 — 50	
< 3 000 — 5 000	750	40 — 50	
< 5 000 — 7 000	750	50 — 60	
< 7 000 — 20 000	1 000	40 — 50	
< 20 000	1 000	20 — 25	Двустороннее

При посещении АЗС, на которой, кроме отпуска нефтепродуктов, не предполагается других услуг, клиенту или оператору-заправщику для оплаты топлива необходимо подойти к кассе, произвести расчет, дождаться, пока распечатается фискальный чек, и вернуться к автомобилю. Эти процедуры занимают 2 — 3 минуты, после чего посетитель может покинуть АЗС. На АЗС такого типа на подъезд к ТРК, предоплату за топливо и фактическую заправку одного автомобиля уходит от 4 до 6 мин, что позволяет заправлять около 10 — 15 автомобилей в час с односторонней колонки или 20 — 30 — с двусторонней. Если же на АЗС проектируется небольшой магазин с системой реализации товаров через продавца (традиционной) и расчетно-кассовым узлом, находящимся в помещении, то при таком варианте время нахождения одного автомобиля у ТРК увеличивается до 10 — 15 мин [3]. За это время посетитель успевает бегло осмотреть предлагаемый товар и рассчитаться за топливо. Кроме того, необходимо предусматривать некоторое пространство для остановки автотранспорта вне зоны ТРК. При строительстве большого автозаправочного комплекса со всеми дополнительными услугами и магазином с системой самообслуживания необходимо учитывать время пребывания покупателя на АЗС до 30 — 35 мин.

Зная интенсивность движения и информацию о дополнительных услугах на АЗС, можно определить, сколько времени автомобиль будет заправляться на данной станции. Основными факторами, влияющими на количество ТРК, являются: скорость выдачи топлива колонкой и время, необходимое для проведения расчетно-кассовых операций. Время фактической заправки топливом транспортного средства редко превышает 1 мин, поэтому данный параметр имеет минимальное влияние.

Следующий параметр — это время, необходимое для предоплаты отпускаемого топлива. Данный фактор может менять свои значения в зависимости от типа станции и способа обслуживания (оплата посредством оператора-заправщика или самостоятельно). Но наиболее важным показателем при определении количества ТРК на АЗС является коэффициент использования колонки в течение 1 сут ( $\mu$ ) [4].

$$\mu = \frac{R_{\Phi}}{R} = \frac{Q_{cp} N_1}{7200 K} = 14 \cdot 10^{-6} \frac{N_1}{K} Q_{cp} \quad (1)$$

и 1 ч

$$\mu = \frac{Q_{cp} N_2}{3000 K} = 33 \cdot 10^{-5} \frac{N_2}{K} Q_{cp}, \quad (2)$$

где  $R_{\Phi}$  — фактическая реализация нефтепродуктов всеми колонками;

$R$  — теоретически возможная за календарный период реализация;

$N_1, N_2$  — число машин на АЗС за 1 сут или 1 ч;

$Q_{cp}$  — средняя разовая заправка, равная 35 л;

$K$  — количество топливораздаточных колонок (ТРК);

7 200 — суточный теоретический расход одной колонки;

3 000 — часовой теоретический расход одной колонки.

На сегодняшний день опытным путем установлено, что данный коэффициент должен равняться или быть больше значения 0,6, так как это обеспечивает среднюю рентабельность бизнеса 8 — 12% [5]. По нормам одна ТРК заправляет от 10 до 16 транспортных средств за час. Используя данные значения, можно рассчитать потребность в ТРК по следующим формулам.

Принимаем работу ТРК равной

$$T = 24 \cdot K_u, \quad (3)$$

где  $K_u$  — коэффициент использования колонки (0,6).

Количество заправляемых транспортных средств одной колонкой за 1 сут

$$A = T \cdot \Lambda_u, \quad (4)$$

где  $T$  — работа топливораздаточной колонки в час;

$\Lambda_u$  — нормативное количество автомобилей, заправляемое одной ТРК (16 авт./ч).

Определяем необходимое число топливораздаточных колонок

$$M = \frac{1000}{A}. \quad (5)$$

При обращении посетителей, равном 1 000, для АЗС потребуется четыре двусторонних многопродуктовых ТРК (это их оптимальное количество).

Поскольку транспортные потоки в городе меняются из-за появления новых жилых районов, открытия торговых центров, строительства новых дорог и развязок, меняется и интенсивность движения, что влияет на существующую мощность АЗС. Поэтому необходимо каждый год считать существующий коэффициент использования ТРК по следующей формуле:

$$K_u = \frac{(\lambda_{cp} / T) \cdot K_u}{\lambda_u}, \quad (6)$$

где  $\lambda_{cp}$  — максимальное количество транспортных средств, поступающих на АЗС в единицу времени;

$T$  — количество ТРК на АЗС;

$K_n$  — нормативный коэффициент использования колонки (0,6);

$\lambda_n$  — нормативное количество автомобилей, заправляемое одной ТРК (16 авт./ч).

В случае если значение коэффициента использования ТРК меньше 0,6, необходимо снижать количество ТРК до тех пор, пока его значение не будет равно или больше 0,6.

Можно пойти по другому пути и организовать на АЗС дополнительные услуги в виде автомойки, шиномонтажки или открыть магазин, что позволит увеличить количество посещений, следовательно, повысит коэффициент использования ТРК. Правда, в данной ситуации наблюдается и одна сложность — клиента, посетившего магазин при АЗС, необходимо

задержать среди прилавков на как можно большее время. Чем больше посетитель находится в торговом зале, тем больше шансов, что он что-нибудь купит. За это время покупатель может бегло осмотреть около 50% предлагаемого товара. При тех же 1000 автомобилях в сутки на АЗС, чтобы не образовывалась очередь и посетитель чувствовал себя комфортно, необходимо не менее 10 двухсторонних многопродуктовых колонок. С другой стороны, стоимость ТРК составляет достаточно большую сумму, и, по какому пути пойти, выбирает каждый владелец АЗС сам. И очевидно, что наиболее важное здесь — определиться с оптимальным количеством ТРК, от которых зависит и имидж самой станции, и сроки ее окупаемости.

## Литература

1. ГОСТ Р 52766-2007. Дороги автомобильные общего пользования. Элементы обустройства. Общие требования : введ. 01.07.2008. М. : Изд-во стандартов, 2008. 27 с.

2. Межотраслевые правила по охране труда при эксплуатации нефтебаз, складов ГСМ, стационарных и передвижных автозаправочных станций / ПОТ РМ-2002. М. : НЦ ЭНАС, 2002. 128 с.

3. Коваленко В.Г., Сафонов А.С., Ушаков А.И. Автозаправочные станции: оборудование, эксплуатация, безопасность : учебное пособие для вузов. СПб. : ДНК, 2001. 176 с.

4. Кантор Ф.М., Юсупов И.Ю. Научные основы развития сети автозаправочных станций. Ташкент: Фан, 1981. 112 с.

5. Волгушев А.Н., Сафонов А.С., Ушаков А.И. Автозаправочные станции. Оборудование. Эксплуатация. СПб. : ДНК, 2001. 176 с.

## References

1. Dorogi avtomobilnye obshchego polzovanija. Elementy obustrojstva. Obshchie trebovaniya [Road cars for general use. Infrastructural elements. General requirements]: GOST R 52766-2007. Introduction 2008-07 -01. M.: Standard Publishing House, 2008. IV. 27 p.

2. Mezhotraslevye pravila po okhrane truda pri ekspluatatsii neftebaz, skladov GSM, statcionarnykh i peredvizhnykh avtozapravchnykh stantsiy [Cross-industry labor safety regulations for operation of tank farms, fuel storages, stationary and mobile filling stations] / POT RM – 2002. M.: NTs ENAS, 2002. 128 p.

3. Kovalenko V.G., Safonov A.S., Ushakov A.I. Avtozapravochnye stantsii: Oborudovanie, ekspluatatsiya, bezopasnost : Uchebnoe posobie dlya vuzov. [Filling stations: equipment, maintenance, security: manual for universities] Saint-Petersburg.: DNK, 2001. 176 p.

4. Kantor F.M., Yusupov I.Yu. Nauchnye osnovy razvitiya seti avtozapravchnykh stantsiy. [Scientific basis of development of filling station network] Tashkent: Fan, 1981. 112 p.

5. Volgushev A.N., Safonov A.S., Ushakov A.I.. Avtozapravochnye stantsii: Oborudovanie. Ekspluatatsiya. [Filling stations: equipment. Operation.] Saint-Petersburg: DNK, 2001. 176 p.

УДК 629.44

Юрий Валентинович Зыков, кандидат технических наук, профессор кафедры «Вагоны» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС),  
 Екатерина Игоревна Сигилева, аспирант кафедры «Вагоны» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС)

## СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СИСТЕМЫ ТЕХНИЧЕСКОГО ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ГРУЗОВЫХ ВАГОНОВ В ЭКСПЛУАТАЦИИ

**Yuri V. Zykow, PhD in Engineering, Professor of the Chair “Railway Cars” of Ural State University of Railway Transport (USURT),  
 Ekaterina I. Sigileva, postgraduate student of the Chair “Railway Cars” of Ural State University of Railway Transport (USURT)**

## Improvement Of Operational Technical Diagnosis System For Freight Cars

### Аннотация

Одним из основных направлений повышения уровня безопасности движения является совершенствование системы технического диагностирования грузовых вагонов в эксплуатации. Низкая эффективность работы системы обусловлена рядом причин. К ним относятся: недостаточный контроль за техническим состоянием вагонов при подготовке к перевозкам, периодичность контроля за техническим состоянием грузовых вагонов в пути следования, отсутствие контроля за деталями, взаимосвязанными с отказавшей деталью, и другие. В статье сформулированы рекомендации, которые позволят сократить основные причины отказов грузовых вагонов и обеспечить их безотказную работу не на гарантийный участок, а на период оборота.

**Ключевые слова:** безотказность, система технического обслуживания, средства технической диагностики, текущий ремонт, информация, оборот вагона.

### Abstract

One of the main ways to increase the level of safety is to improve the system of technical diagnosis of freight cars during operation. Low efficiency of the system is determined by several reasons. These include: lack of monitoring of technical condition of cars during preparation for operation, frequency of monitoring of technical condition of freight cars along the route, the lack of control of parts interconnected to the failed part, and others. The article gives recommendations that allow reducing the major causes of failures of freight cars and ensure their reliable operation not only for the guaranteed section, but throughout the whole turnaround period.

**Keywords:** reliability, maintenance system, technical diagnostic tools, routine maintenance, information, car turnaround.

**Б**езопасность движения поездов на железнодорожном транспорте во многом зависит от технического состояния подвижного состава (вагонов, локомотивов). Поэтому требования, предъявляемые к ним, должны полностью обеспечивать сохранность как подвижного состава в процессе эксплуатации, так и перевозимого им груза. Одним из показателей, характеризующих надежность вагонов, является безотказность — свойство непрерывно сохранять работоспособное состояние в межремонтный период. Как правило, этот период определяется межремонтным сроком или объемом выполненной работы. Для грузовых вагонов межремонтный период определен пробегом. Фактически за межремонтный период в среднем грузовой вагон отказывает и поступает в текущий отцепочный ремонт (TOP) 4,3 раза.

Существующая система технического обслуживания основана на пунктах технического обслуживания вагонов (ПТО), которые гарантируют безотказность вагонов на участке длиной 1 000 — 1 200 м до следующего ПТО. Для обеспечения безопасности движения на ПТО выполняют контроль за техническим состоянием вагонов при встрече поезда с ходу, а затем сплошной осмотр вагонов с пролазкой. На ПТО сортировочных станций осмотр выполняют трижды — в парке приема, в сортировочном парке осмотрщиками по сохранности и в парке отправления с процессами полного и сокращенного опробования автормозов. В пути следования и на подходах к станциям для контроля за техническим состоянием грузовых вагонов на контрольных постах установлены различные напольные средства технической диагностики (СТД) (табл. 1).

Но, несмотря на такую комплексную систему контроля, отказы вагонов возникают и на гарантийных участках, что приводит к нарушению условий безопасности перевозочного процесса. Причины низкой эффективности существующей системы технического диагностирования грузовых вагонов в основном обусловлены не техникой СТД, а технологией ее использования.

**Таблица 1 — Средства технического диагностирования грузовых вагонов в эксплуатации**

Элемент	Тип	Диагностический параметр
Колесная пара	1. КТСМ-02К 2. ДДК 3. Путевой индикатор юза колеса 4. КТСМ-023 5. «КОМПЛЕКС» 6. «Экспресс-Профиль»	1. Виброускорение рельса 2. Деформация шейки рельса 3. Определяется положением магнитных меток 4. Деформация шейки рельса 5. Прокат; толщина, ширина обода; расстояние между внутренними гранями колес; толщина гребня; диаметр колеса 6. Прокат; толщина, ширина обода; расстояние между внутренними гранями колес; толщина гребня; диаметр колеса
Буксовый узел	1. КТСМ-02Б 2. УКСКБ	1. Перегрев корпуса буксы 2. Положение корпуса буксы относительно шейки оси
Тележка	1. УНКР 2. АСООД	1. Угол перекоса колесных пар относительно оси пути 2. Амплитуда и частота колебаний
Автосцепное оборудование	1. САКМА 2. АДУ	1. Зазоры в контуре зацепления автосцепки 2. Выход головки автосцепки относительно ударной розетки
Автотормозное оборудование	1. УЗОТ-РМ 2. УКТП 3. КТСМ-02Т 4. КТСМ-02В 5. КТСМ-02З	1. Плотность тормозной сети, целостность тормозной магистрали, время отпуска тормоза 2. Плотность тормозной сети, целостность тормозной магистрали, время отпуска тормоза, давление воздуха в тормозной магистрали хвостового вагона 3. Перегрев ступицы колеса 4. Нарушение нижнего габарита 5. Параметр отношения температуры обода колеса к деформации шейки рельса
Кузов	1. КТСМ-02Г	1. Нарушение верхнего и бокового габарита

Отказы вагонов в пути следования по причине их возникновения можно разделить на производственные и эксплуатационные. Причины производственных отказов заключаются в нарушении технических условий при постройке вагона и изготовлении основных элементов конструкции, механизмов, аппаратов и приборов, а также в нарушении правил ремонта. Эксплуатационные отказы возникают из-за нарушений правил эксплуатации и технического обслуживания вагонов. Большая часть эксплуатационных отказов связана с повреждением вагонов при маневровых и погрузочно-разгрузочных работах.

Различают также внезапные и постепенные отказы. Внезапные отказы характеризуются скачкообразным изменением одного или нескольких параметров, определяющих надежность подвижного состава. Постепенные отказы характеризуются постепенным, медленным изменением одного или нескольких заданных параметров [1]. К внезапным отказам грузовых вагонов относятся: разрушение буксового подшипника, нарушение или ослабление торцевого крепления подшипников, ползунов, трещина/излом надпрессорной балки, трещина/излом боковой рамы, трещина обода, трещина/откол

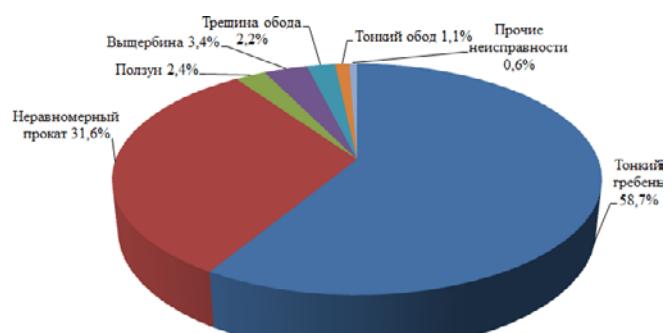
гребня, трещина диска колеса, трещины оси колесной пары, излом шейки оси колесной пары, излом пружин.

На рис. 1 представлена диаграмма распределения неисправностей вагонов, поступивших в ТОР на Свердловской и Южно-Уральской железных дорогах.



**Рисунок 1 — Распределение неисправностей вагонов по основным узлам**

Выполненный анализ отказов грузовых вагонов по основным узлам показал, что основную долю составляют отказы по причине неисправностей ходовых частей. На неисправности колесных пар приходится более 45% всех отказов вагонов. На рис. 2 представлена диаграмма распределения неисправностей колесных пар.



**Рисунок 2 — Распределение неисправностей колесных пар**

Диаграмма показывает, что 94,8% составляют постепенные отказы износового и усталостного (тонкий гребень) характера, на внезапные отказы приходится 4,6% (ползун, трещина обода) от всех отказов по причине неисправностей колесных пар. Более 30% составляют отказы по причине неравномерного проката, который возникает вследствие закатывания ползуна и оказывает гораздо большее силовое воздействие на ходовые части вагона, чем ползун. Ползун возникает в результате заклинивания, юза колес. Поэтому необходимо предотвращать появление ползуна и, как следствие, неравномерного проката, своевременно выявляя и устраняя заклинивание колесных пар.

Основную долю отказов по причине неисправностей тележек составляют внезапные отказы (рис. 3). К ним относятся трещина/излом боковой рамы, надпрессорной балки.



Рисунок 3 — Распределение неисправностей тележек

Отказы по причине неисправностей буксового узла составляют 7% от общего числа отказов. Но практически все они носят внезапный характер. К ним относятся: греение буксы, трещина/излом корпуса буксы, излом или изгиб крышки буксы (рис. 4).



Рисунок 4 — Распределение неисправностей буксового узла

Ниже приводены основные причины высокой интенсивности отказов грузовых вагонов.

1. В отличие от пассажирских, контроль за техническим состоянием грузовых вагонов выполняется периодически на контрольных постах и ПТО. Это затрудняет обнаружение внезапных отказов на грузовом вагоне и приводит к снижению уровня безотказности вагона в пути следования.

2. Практически невозможно создать такой комплекс наземных СД, который охватил бы весь перечень операций контроля, определяемый действующими инструкциями, поэтому достоверность результатов определения технического состояния вагона во многом зависит от человеческого фактора. Так, в эксплуатации, как и 100 лет назад, на каждом ПТО осмотрщик осматривает вагон с пролазкой, выявляя трещины в деталях ходовых частей и автосцепки, и простукивает колеса вагонов на предмет выявления трещин по тону отзыва [3].

3. Работа наземных СД основана на косвенных, вспомогательных параметрах. При этом возможны только статистические методы принятия решения, что не исключает пропуск дефекта и ложную тревогу. Так, техническое состояние буксового узла в пути следования оценивается по температуре корпуса буксы. Действительно, отказ подшипника, как правило, сопровождается его перегревом. Но перегрев корпуса буксы Я является функцией многих аргументов, т. е.

$$\Theta = f(T, V, P, B, R, L, F), \quad (1)$$

где  $T$  — продолжительность работы;

$V$  — скоростной режим поезда;

$P$  — загрузка вагона;

$B$  — состояние пути (балльность);

$R$  — профиль пути в плане (кривые малого радиуса);

$L$  — солнечное излучение;

$F$  — силы сопротивления качению в подшипнике.

Элементарный анализ свидетельствует о том, что первые шесть аргументов не зависят от технического состояния подшипника, которое определяется в основном силами сопротивления качению  $F$ . Поэтому однозначно судить о состоянии подшипников по температурному режиму корпуса буксы невозможно, так как в процессе эксплуатации температура букс может быть различной. Необходимо непрерывно контролировать температуру букс, и если наблюдается прирост температуры за короткий промежуток времени, то это свидетельствует о наличии опасного дефекта.

4. Груженые вагоны поступают в ТОР чаще, чем порожние, из-за постепенных отказов износового и усталостного характера, что свидетельствует о нарушении требований к подготовке вагонов к перевозкам или несоответствии их условиям эксплуатации. При этом значительно увеличивается время доставки груза [4]. На рис. 5 представлена диаграмма распределения неисправностей колесных пар, выявленных на ПТО, в зависимости от состояния вагона.

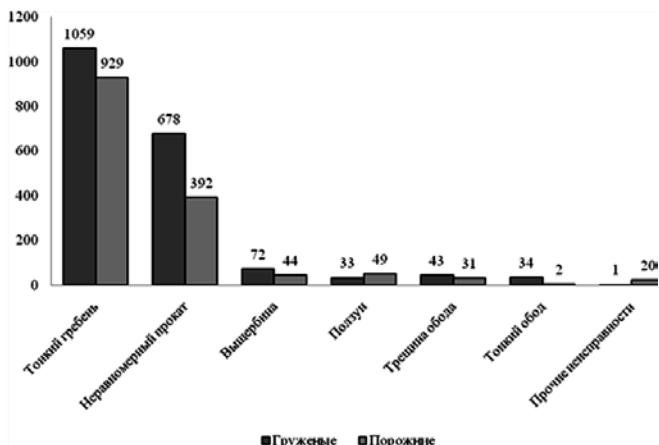


Рисунок 5 — Диаграмма распределения неисправностей колесных пар, выявленных на ПТО, в зависимости от состояния вагона

Диаграмма показывает, что груженые вагоны поступают в ТОР из-за неисправностей колесных пар чаще, чем порожние, большинство которых являются постепенно возникающими (тонкий гребень, неравномерный прокат, тонкий обод). Такие неисправности необходимо выявлять заранее при подготовке вагонов к перевозкам и при текущем ремонте. Но в настоящее время все средства технического диагностирования для контроля за техническим состоянием вагонов в основном сосредоточены на ПТО и в пути следования. В результате этого груженые вагоны поступают в текущий ремонт по усталостным и износовым дефектам, хотя их следовало бы выявлять на пунктах подготовки вагонов к перевозкам (ППВ).

5. При выполнении ТОР, как правило, заменяют отказавшую деталь или сборочную единицу, не устранив причину отказа, в результате чего вагон повторно поступает в ТОР. Для подтверждения этого выполнен анализ работы вагонов в течение 2 месяцев после ТОР. Всего обследовано 377 вагонов, из них 295 с отказом ходовых частей. В результате анализа последующей их работы было выявлено, что 43 вагона, поступивших в ТОР вследствие неисправностей ходовых частей, в течение 2 месяцев снова отказали.

Повторно по тем же неисправностям в ТОР поступило 10 вагонов по неисправностям, которые возникли в результате причины предыдущего отказа 19 вагонов. На рис. 6 представлен график повторных отказов грузовых вагонов.

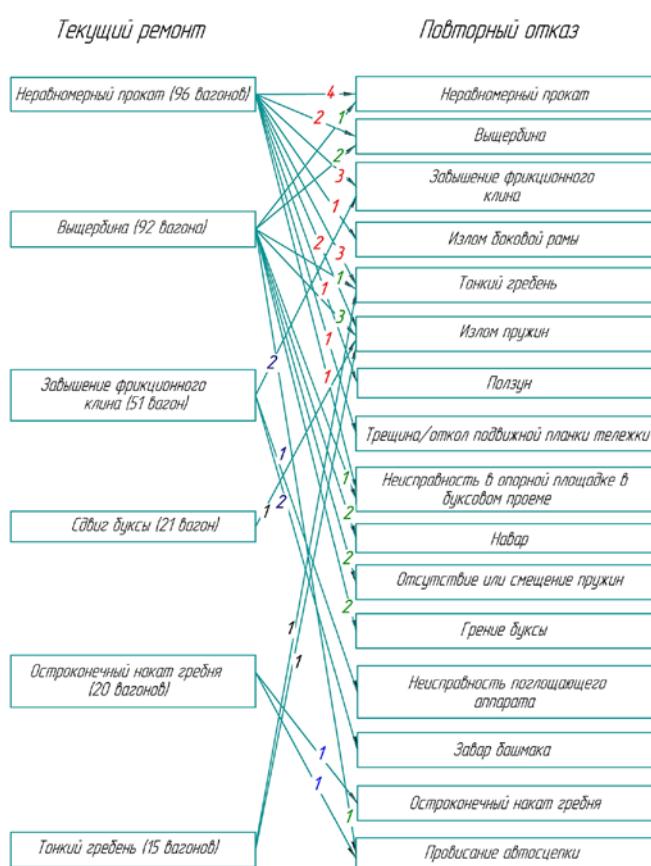


Рисунок 6 — Граф повторных отказов грузовых вагонов

6. 17,1% отказов ходовых частей связаны с дефектами колесных пар тормозного происхождения (ползун, неравномерный прокат, выщербина), что свидетельствует о необходимости совершенствования системы подготовки и опробования автотормозов.

В целом совершенствование системы технического диагностирования грузовых вагонов должно осуществляться в следующих направлениях.

1. Предупреждение постепенных отказов у груженых вагонов. Для этого СД, контролирующие усталостные и износовые дефекты, необходимо сосредоточить на ППВ и МПРВ (КОМПЛЕКС, САКМА, АДУ, ПАК и др.). В пути следования на постах контроля следует ставить СД, которые контролируют

внезапные отказы: ползуны, выщербины, разрушение и перегрев букс и т. д.

Постепенные отказы могут быть выявлены и предотвращены в процессе подготовки к перевозкам и при текущем и плановых ремонтах. Так, износ гребня — это постепенный отказ ходовых частей вагона. На его долю приходится более 15% от общего числа обследованных отказов и 58,7% от всех случаев неисправностей колесной пары. Интенсивность изнашивания гребня различна и у разных вагонов, и у разных колес одного вагона. Отказ вагона по причине износа гребня можно полностью исключить, соблюдая следующее условие при подаче вагона под погрузку [2]:

$$(b_{\min} - b_{\text{доп}}) \geq \frac{L}{L_{\text{кн}}} (b_0 - b_{\min}), \quad (2)$$

где  $b_{\min}$  — самый тонкий гребень у рассматриваемого вагона, мм;

$b_{\text{доп}}$  — предельная толщина гребня по условиям безопасности в эксплуатации, 25 мм;

$L$  — расстояние, которое должен пройти вагон до пункта разгрузки, км;

$b_0$  — начальная толщина гребня, мм;

$L_{\text{кн}}$  — пробег вагона с данной колесной парой, км.

Исходя из данной формулы можно определить допускаемую толщину гребня, при которой будет исключен отказ груженых вагонов по износу гребня за период оборота.

2. При выполнении текущего ремонта необходимо учитывать взаимосвязь неисправностей. Так, связь между наличием ползуна на колесной паре и возникновением и дальнейшим развитием трещин в литых деталях тележки или их излома можно доказать, используя статистические данные отказов вагонов по причине дефектов надпрессорных балок тележек и предыдущих отказов этих же вагонов по дефектам на поверхности катания колес. Согласно [2], информация, которую дает техническое состояние одной системы  $B$  относительно состояния другой системы  $A$ , определяется по формуле

$$J_{A_i}(B_j) = \log_2 \frac{P(A_i / B_j)}{P(A_i)}, \quad (3)$$

где  $i$  и  $j$  — реализация состояния системы  $A$  и системы  $B$  соответственно;

$P(A_i / B_j)$  — условная вероятность реализации состояния  $i$  системы  $A$  при условии, что состояние  $j$  системы  $B$  уже реализовано;

$P(A_i)$  — вероятность реализации состояния  $i$  системы  $A$ .

Итак, информация, которую дает техническое состояние колесной пары относительно состояния литых деталей тележки, определяется по формуле

$$J_{A_2}(B_2) = \log_2 \frac{P(A_2 / B_2)}{P(A_2)}, \quad (4)$$

где  $A_2$  — трещина/излом литых деталей тележки;

$B_2$  — дефекты на поверхности катания колес.

С целью количественной оценки информативности технического состояния колесной пары относительно состояния литых деталей тележки обследовано 120 вагонов, поступивших в текущий ремонт по причине трещины/излома литых деталей тележки. Выполнен анализ предыдущих отказов этих вагонов

в течение 2 лет. В результате было выявлено, что в текущий ремонт с дефектами на поверхности катания колес до отказа по трещине/излому литых деталей тележки поступало 52 вагона. Вероятность трещины/излома литых деталей тележки при условии, что на колесной паре обнаружен дефект поверхности катания, определяется по формуле

$$P(A_2/B_2) = \frac{N_2}{N_1}, \quad (5)$$

где  $N_1$  — количество вагонов, поступивших в текущий ремонт по причине трещины/излома литых деталей тележки;

$N_2$  — количество вагонов, поступивших в ремонт по дефектам на поверхности катания колес до отказа по дефектам литых деталей тележек,

$$P(A_2/B_2) = 0,43.$$

Вероятность отказа литых деталей тележки на вагоне при прохождении очередного технического обслуживания определяется по формуле

$$P(A_2) = \frac{W_{A_2} L_{\text{уч}}}{L}, \quad (6)$$

где  $W_{A_2}$  — частота отказов вагонов из-за отказов литых деталей тележки в течение года;

$L$  — годовой пробег вагона,  $L = 100\,000$  км;

$L_{\text{уч}}$  — средняя длина гарантийных участков,  $L_{\text{уч}} = 1\,160$  км.

Частота отказов вагонов в течение года по трещине/излому литых деталей тележки определяется по формуле

$$W_{A_2} = \frac{N_{\text{сл}}}{n}, \quad (7)$$

где  $N_{\text{сл}}$  — число отказов вагонов в текущий ремонт в течение года;

$n$  — общее количество вагонов парка ПГК,  $n = 191\,200$ .

Число отказов по трещине/излому литых деталей тележки в текущий ремонт в течение года составляет 185 вагонов. Тогда:

$$W_{A_2} = 0,001;$$

$$P(A_2) = 1,16 \cdot 10^{-5};$$

$$J_{A_2}(B_2) = 15,2.$$

Если информативность больше единицы, то считается, что связь между рассматриваемыми событиями существенна. Поэтому для оценки технического состояния сложных технических систем необходимо не только выявлять неисправность с помощью СТД, но и устранять причину и следствие данной неисправности.

3. Следует усовершенствовать процессы подготовки и опробования автотормозов (зарядка — от стационарной сети, опробование — от локомотива), создать и внедрить детекторы юза колес.

4. В перспективе целесообразно создать бортовые средства контроля опасных внезапных отказов грузовых вагонов.

Предложенные направления совершенствования системы технического диагностирования грузовых вагонов в эксплуатации позволят существенно сократить случаи отказов гуженных вагонов и перейти от гарантии безотказной работы на гарантийном участке к гаранции безотказной работы за период оборота вагона.

## Литература

- Соколов М.М. Диагностирование вагонов. М.: Транспорт, 1990. 197 с.
- Биргер И.А. Техническая диагностика. М.: Машиностроение, 1978. 240 с.
- Зыков Ю.В., Орлов М.В. Техническому обслуживанию вагонов — современные методы // Железнодорожный транспорт. 1982. № 11. С. 23 — 29.
- Новая система технического обслуживания грузовых вагонов / Зыков Ю.В., Козубенко И.Д., Лозинский С.Н., Сендеров Г.К., Глушко М.И., Свердлов В.Б., Поздина Е.А. // Железнодорожный транспорт. 2002. № 1. С. 8 — 15.

## References

- Sokolov M.M. Diagnostirovaniye vagonov. [Cars diagnosis] M.: Transport, 1990. 197 p.
- Birger I.A. Tekhnicheskaya diagnostika. [Technical diagnostics] M.: Mashinostroenie, 1978. 240 p.
- Zykov Yu.V., Orlov M.V. Tekhnicheskemu obsluzhivaniyu vagonov — sovremenennye metody [Modern methods of cars maintenance] // Zheleznodorozhny transport. 1982. No. 11. p. 23 — 29.
- Novaya sistema tekhnicheskogo obsluzhivaniya gruzovykh vagonov [New system of freight cars maintenance] / Zykov Yu.V., Kozubenko I.D., Lozinskiy S.N., Senderov G.K., Glushko M.I., Sverdlov V.B., Pozdina E.A. // Zheleznodorozhny transport. 2002. No. 1. p. 8 — 15.

УДК 629:006.015.8:621.89

Александр Эдуардович Павлюков, доктор технических наук, профессор кафедры «Вагоны» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС),  
Олег Вячеславович Черепов, кандидат технических наук, доцент кафедры «Вагоны» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС)

## ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ВЕЛИЧИН ИЗНОСА ОСНОВНЫХ УЗЛОВ ГРУЗОВЫХ ВАГОНОВ НА БЕЗОПАСНОСТЬ ДВИЖЕНИЯ

Alexander E. Pavlyukov, DSc in Engineering, Professor of the Chair "Railway Cars" of Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg,

Oleg V. Cherepov, PhD in Engineering, Associate Professor of the Chair "Railway Cars" of Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg

## Assessment Of Wear Rate Impact Of Freight Cars' Major Units On Traffic Safety

### Аннотация

Дана оценка динамических характеристик грузового вагона из условия обеспечения его безопасного движения вследствие деградации линейных размеров узлов трения вагона, таких как фрикционные гасители колебаний и буксовый узел. Предложены нормы содержания исследуемых пар трения в эксплуатации.

**Ключевые слова:** грузовой вагон, динамические характеристики, безопасность движения, изменение линейных размеров узлов трения, нормы содержания пар трения в эксплуатации.

### Abstract

The assessment of dynamic characteristics of the freight car from a condition of ensuring its safe movement in a consequence of degradation of the linear sizes of knots of friction of the car such as is made: frictional quenchers of fluctuations and buksovy knot. Standards of the maintenance of studied couples of friction in operation are offered.

**Key words:** the freight car, dynamic characteristics, traffic safety, change of the linear sizes of knots of friction, standard of the maintenance of couples of friction in operation.

Уровень физического износа вагона, т. е. его техническое состояние в процессе эксплуатации, определяется совокупностью факторов, таких как продолжительность работы, пробег (груженый плюс порожний), количество перевезенного груза и его агрессивность, профиль пути и т. д. От технического состояния вагона и пути зависит характер движения вагона и его устойчивость в колее, что непосредственно связано с безопасностью движения. Поскольку узлы, определяющие техническое состояние, имеют различные степени износа, то это приводит к тому, что возможно большое количество сочетаний и разнообразие технических состояний одного объекта. В такой ситуации наиболее перспективным методом оценки технических состояний и их влияния на безопасность движения, а также проверки установленных опытным путем нормативов по износу является математическое моделирование. Авторами для этих целей использовался программный комплекс «Универсальный механизм» и разработанная в нем модель движения вагона на тележках модели 18-100 [1].

Разработанная модель позволяет имитировать различные технические состояния тележки и пути благодаря учету (рис. 1):

- износов поверхностей фрикционного клина;
- изменения зазора между скользунами в вагоне;
- износа наклонных поверхностей надпрессорной балки;
- износа диаметра и глубины подпятника и пятника;
- износа направляющих челюстей боковой рамы тележки и опорной плоскости;
- реального профиля колеса и рельса, задаваемых по 10 точкам;
- фактических неровностей каждой нитки пути в горизонтальной и вертикальной плоскости;
- плана пути (радиус кривой, возвышение рельса, длина участка переходной кривой);
- изменения жесткости рессорных комплектов (по каждой пружине).

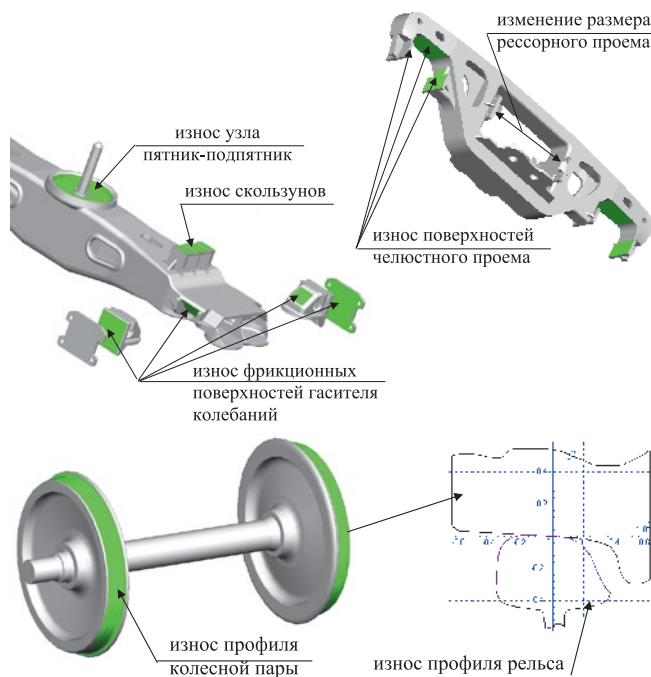


Рисунок 1 — Зоны, по которым учитывается изменение геометрических параметров (износ) трибоузлов

Поскольку разработанная модель вагона позволяет исследовать большое число кинематических и динамических характеристик, определяемое количеством степеней свободы модели, то перед проведением исследований был произведен обоснованный выбор динамических характеристик для оценки движения вагонов с различным состоянием.

Поскольку характеристики, учитываемые в нормах [2], являются общепринятыми в отрасли, а также в соответствии с опытом моделирования [1] были выбраны следующие динамические показатели для оценки движения вагона:

- коэффициент вертикальной динамики;
- коэффициент запаса устойчивости от схода с рельсов по условию вкатывания гребня колеса на головку рельса  $K_{yc}$ ;
- коэффициент запаса поперечной устойчивости от опрокидывания в кривой под действием боковых сил  $K_{yo}$ ;
- рамная сила;
- угол набегания колеса на рельс;
- сила отжатия рельса;
- сила воздействия на путь;
- горизонтальное ускорение кузова;
- вертикальное ускорение кузова;
- фактор износа (мощность сил трения);
- интегральный фактор износа;
- вертикальная сила на скользуне;
- перевалка кузова.

Для оценки безопасности движения был принят следующий критерий — вертикальная координата величины подъема точки контакта «колесо — рельс». За критерий схода предлагается принять момент, когда точка контакта «колесо — рельс» совпадает с точкой перехода прямолинейной образующей гребня в криволинейный участок гребня (рис. 2).

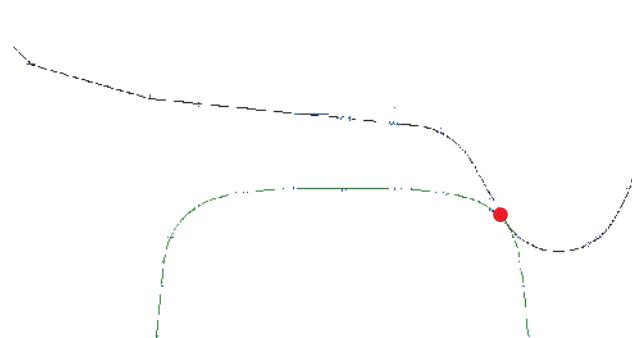


Рисунок 2 — Подъем точки контакта «колесо — рельс»

При моделировании оценивается изменение вертикальной координаты точки контакта, и достижение схода в этой постановке происходит при значении данного параметра, равном 22 мм — для нового профиля и 28 мм — для изношенного профиля.

Следует отметить, что такое положение точки контакта, принятое за критериальное, не означает безусловного последующего полного вкатывания колеса на рельс и схода, т. е. достижение этого положения приводит или к последующей штатной установке колеса на рельсе, или к последующему вкатыванию. Выбирать для оценки безопасности критерий полного вкатывания колеса на рельс, на наш взгляд, нерационально, так как речь идет о безопасности движения и предупреждении аварийных ситуаций. Поэтому целесообразнее иметь определенные гарантии с запасом, нежели пытаться оценить полное вкатывание колеса, что позволяет устанавливать значения параметров состояния вагона с точки зрения допустимости.

Возмущения, действующие на экипажную часть, отличаются сложностью и многообразием и носят в большинстве своем случайный характер [3]. Представление неровностей пути с помощью математического аппарата теории случайных процессов [3] позволяет учитывать воздействие со стороны пути в более широком диапазоне частот.

В нормативном документе РД 32.68-96 [4], явившемся следствием и обобщением значительных исследований ВНИИЖТ, для математического моделирования рекомендуются расчетные спектральные неровности. В документе приведены аналитические зависимости, представляющие как усредненные спектры вертикальных и горизонтальных неровностей рельсового пути, так и разброс оценок этих спектральных плотностей. По данной функции спектральной плотности производилась генерация вертикальных (просадки) и горизонтальных неровностей пути (рихтовки).

#### Оценка влияния износа элементов фрикционных гасителей колебаний и завышения клиньев относительно надрессорной балки на безопасность движения

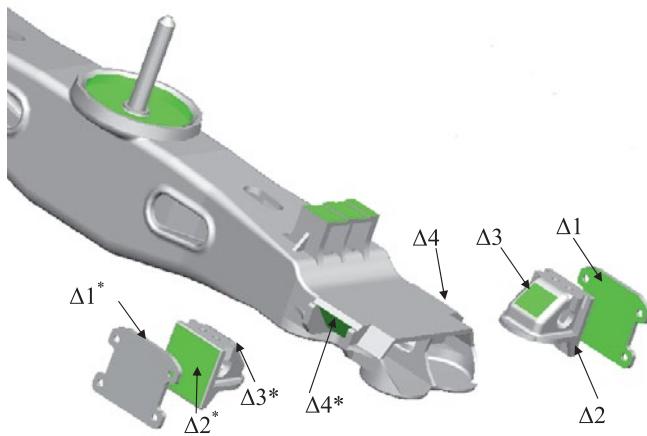
В соответствии с [5] одной из причин схода вагонов является ненормативная величина завышения клиньев фрикционного гасителя относительно надрессорной балки, которая обусловлена износом поверхностей клинового гасителя

колебаний в эксплуатации, а также неправильным подбором размеров сопрягаемых частей гасителя после ремонта: полностью клина, размера по наклонным поверхностям надрессорной балки, ширины рессорного проема боковой рамы по фрикционным планкам.

Для моделирования влияния износов клинового гасителя на динамические качества порожнего вагона и безопасность движения выбраны значения завышения клиньев (табл. 1) и соответствующие им значения равномерного износа элементов клинового гасителя по рабочим поверхностям (рис. 3).

**Таблица 1 — Исследуемые состояния элементов фрикционного гасителя**

Значения износов, мм								Возвышение <i>h</i> , мм
$\Delta_1$	$\Delta_2$	$\Delta_3$	$\Delta_4$	$\Delta_1^*$	$\Delta_2^*$	$\Delta_3^*$	$\Delta_4^*$	
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	2
1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	4
1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	6
2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	8
3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	10
3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	12
4,7	4,7	4,7	4,7	4,7	4,7	4,7	4,7	16
5,8	5,8	5,8	5,8	5,8	5,8	5,8	5,8	20
7,0	7,0	7,0	7,0	7,0	7,0	7,0	7,0	24



**Рисунок 3 — Схема обозначения в табл. 1 идентификаторов величин износов поверхностей фрикционного гасителя**

Определение величин износов (при условии их равенства) производилось по формуле расчета суммарного возвышения (при этом угол наклона вертикальных поверхностей клина и фрикционной планки не учитывали из-за их малости)

$$0h = (\Delta_1 + \Delta_2) \cdot \cos\alpha + \Delta_3 + \Delta_4, \quad (1)$$

где  $\Delta_1$  — износ наклонной поверхности клина;  
 $\Delta_2$  — износ наклонной поверхности боковой рамы;  
 $\Delta_3$  — износ вертикальной поверхности клина;  
 $\Delta_4$  — износ фрикционной планки.

Статический прогиб основных пружин рессорного комплекта определяется с учетом завышения клина по формуле

$$f_{cm}^{\delta} = \begin{cases} f_{cm} + \frac{2}{7} \cdot h, & \text{если } h \leq 12 \text{ мм} \\ \frac{7}{5} \cdot f_{cm} = 12 \text{ мм, если } h > 12 \text{ мм} \end{cases}. \quad (2)$$

Условие, накладываемое на завышение клина в приведенной выше формуле, связано с тем, что в тележке модели 18-100 в состоянии равновесия порожнего вагона при завышении клина более 12 мм надрессорная балка полностью садится на основные пружины. Клин при этом опирается на подклиновые пружины, не испытывая нагрузки со стороны надрессорной балки.

Тогда статический прогиб подклиновых пружин определяется следующим образом:

$$f_{cm}^{k1} = \begin{cases} f_{cm}^{\delta} - h, & \text{если } h \leq 12 \text{ мм} \\ 0, & \text{если } h > 12 \text{ мм} \end{cases}. \quad (3)$$

Исследованиям подвергался порожний вагон, тип — полувагон, движущийся в кривой радиусом 650 м со скоростью 80 км/ч (наиболее опасный участок пути согласно результатам расследования сходов).

Динамические характеристики полувагона изучались в зависимости от скорости движения. Для этого выполнялись многовариантные расчеты, т. е. моделирование движения на каждом выбранном значении скорости 14 м/с (50,4 км/ч), 18 м/с (65 км/ч), 22 м/с (79,2 км/ч), 26 м/с (93,6 км/ч).

Время моделирования выбиралось таким образом, чтобы вагон полностью проходил исследуемый участок, т. е. вход в кривую, прохождение кривой, выход из кривой.

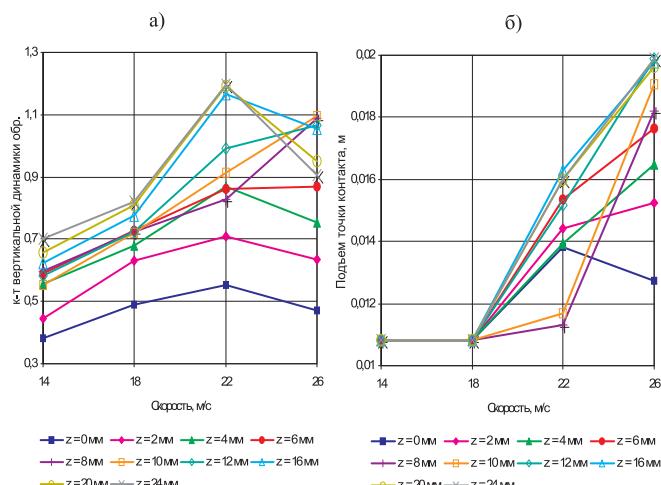
Осциллограммы, полученные для каждой скорости, анализировались по каждому показателю, и определялось среднестатистическое значение. По этим значениям строилась зависимость данного показателя динамики от скорости.

Полученные графики основных, наиболее ярко отображающих задачу исследования динамических показателей от скорости представлены на рис. 4.

Величина подъема точки контакта «колесо — рельс» (т. е. подъем колеса) растет с увеличением завышения клина и в исследуемом диапазоне скоростей принимает значения, близкие к критическим на скорости 26 м/с (93,6 км/ч) для тележек с завышением клиньев более 8—10 мм (см. рис. 4).

#### Оценка влияния величин зазоров между скользунами кузова и надрессорной балки на динамические качества грузового вагона и безопасность движения

Инструкцией ЦВ-ЦЛ-408 [6] запрещается эксплуатация вагонов с нулевым зазором, расположенным по диагонали вагона. Цель исследований этого этапа — оценить влияние данных зазоров на динамические качества вагона, определить, имеются ли сочетания величин остальных двух ненулевых зазоров, при которых возможна эксплуатация, выявить наиболее неблагоприятные сочетания величин зазоров между скользунами, при которых производилось моделирование.



**Рисунок 4 — Графики зависимости динамических показателей от скорости движения вагона в кривой при различной величине завышения клина относительно балки: а — коэффициент динамики обрессоренной части; б — вертикальный подъем точки контакта «колесо — рельс»**

Результаты моделирования приведены в табл. 2. В ней на самом интенсивном темном фоне показаны значения характеристик, не соответствующие нормативным значениям; на сером — предельные по отношению к нормативным значениям; на белом — значения в рамках нормативных с относительным запасом.

Анализ значений динамических характеристик показывает, что при движении в кривых наиболее неблагоприятный вариант сочетания зазоров между скользунами — это нулевой зазор между наружным (относительно кривой) скользуном первой тележки и соответственно внутренними скользунами

второй тележки. Этот вывод подтверждается значениями коэффициентов динамики как обрессоренных (см. табл. 2), так и необрессоренных частей тележки, все значения данной характеристики с нулевым зазором между наружными скользунами расположены выше, чем с отличным от нуля. Даже при малой скорости движения 10 м/с значение коэффициента динамики обрессоренных масс выше предельно допустимого и составляет 0,82 для зазоров 030—300.

Наиболее неблагоприятные зазоры между скользунами 1 мм (при нулевых зазорах по диагонали) в любой комбинации, при движении со скоростью менее 14 м/с подъем точки контакта колесо-рельс превышает 22 мм и составляет 23 мм при скорости 10 м/с, что говорит о максимально вероятной ситуации схода. Зазоры от 3 до 7—10 мм (при нулевых зазорах по диагонали) допустимы при условии, что нулевой зазор между скользунами расположен внутри кривой, однако на такую ситуацию нельзя ориентироваться, так как любой участок курсирования вагона имеет и правые, и левые кривые.

Таким образом, подтверждена недопустимость эксплуатации вагона с зазорами между скользунами по диагонали равными нулю при любых значениях остальных двух зазоров. Факторы динамики ведения поезда еще более усугубляют ситуацию, проанализированную выше.

#### Влияние возвышения наружного рельса в кривой при различных зазорах между скользунами кузова и надрессорной балки

Существует мнение, что одной из причин сходов в кривых [7] является в числе прочих причин излишнее возвышение наружного рельса над внутренним при неблагоприятных зазорах в скользунах, т. е. при наклоне кузова дополнительно внутрь кривой за счет разницы зазоров. Для проверки данного предположения были выполнены исследования.

**Таблица 2 — Значения показателей динамики при моделировании движения грузового вагона с различными (нулевыми) диагональными зазорами между скользунами тележки и кузовом (скорость движения — 22 м/с)**

Динамические показатели (норматив)	Зазоры в скользунах											
	70–07*	07–70**	10–01	01–10	010–100	100–010	030–300	300–030	03–30	30–03	50–05	05–50
К.д. обр. масс (0,7)	0,7	1,1	1,1	1,2	1,0	0,7	1,0	0,8	1,2	0,9	0,8	1,1
К.д. необр. масс (0,85)	0,6	0,9	0,9	1,0	0,9	0,6	0,9	0,7	1,0	0,8	0,7	1,0
Коэф. запаса устойчивости от опрокидывания (1,5)	1,1	1,1	1,3	1,2	1,3	1,3	1,4	1,0	1,4	1,1	1,0	1,4
Горизонтальное ускорение кузова (отлично — 1,96; удовлетворительно — 2,94 м/с <sup>2</sup> )	2,47	2,73	2,5	2,57	2,56	2,45	2,46	2,4	293	2,83	2,7	2,85
Коэф. запаса устойчивости от вкатывания гребня колеса на рельс (1,4)	0,8	1,1	0,8	0,8	1,4	0,8	0,8	0,9	1,0	0,8	0,9	1,0
подъем точки контакта (мм)	14	21	21	21	11	15	11	21	11	18	21	11

\* В первой тележке с наружной стороны зазор между скользунами равен 7 мм, с внутренней — 0 мм; во второй тележке с наружной стороны — 0 мм, с внутренней — 7 мм.

\*\* В первой тележке с наружной стороны зазор равен 0 мм, с внутренней — 7 мм; во второй тележке с наружной стороны — 7 мм, с внутренней — 0 мм.

Изучалось движение порожнего вагона (тип — полувагон) в кривой радиуса 650 м со скоростью 80 км/ч (участок пути и скорость движения назначены согласно результатам расследования сходов). За варьируемые параметры были приняты: возвышение наружного рельса в интервале от 60 до 140 мм; зазоры между скользунами кузова и тележкой от 0 до 7 мм, при том что минимальный зазор принимаем между внутренними (относительно кривой) скользунами кузова и тележки (табл. 3).

**Таблица 3 — Варьируемые параметры для моделирования состояния вагона**

Зазор между скользунами, мм		Возвышение наружного рельса, мм
Внутренний	Внешний	
0	7	60 — 80—100—120—140
3	7	60 — 80—100—120—140
7	7	60 — 80—100—120—140

Целью данного исследования является оценка качества вагона и безопасность движения при несимметричных относительно продольной оси вагона зазорах между скользунами кузова и тележки.

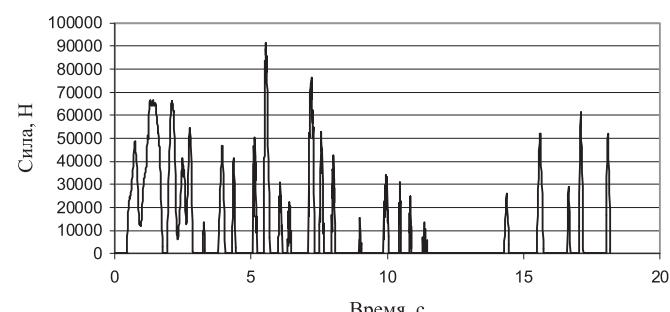
Анализ проведенных многовариантных компьютерных расчетов показал, что силы, действующие между скользунами кузова и тележки в кривой 650 м, носят кратковременный и импульсный (ударный) характер на каждом скользуне, что говорит о колебаниях вагона (перевалке), и действие этих сил не приводит к защемлению скользунов порожнего вагона даже при начальном отсутствии зазора на внутреннем скользунке. Эти выводы подтверждаются осциллограммой (рис. 5), на которой приведено изменение силы на «внутреннем» скользуне тележки (относительно кривой). Частота ударов пропорциональна величине начального зазора между скользуном кузова и тележки.

На рис. 6 приведены результаты численного моделирования. Анализ графиков показывает, что при несимметричных зазорах (0—7, 3—7 мм) между внутренними скользунами (относительно кривой) уровень максимальных амплитуд (см. рис. 6) сил на скользуне практически не меняется в зависимости от изменения возвышения.

Угол набегания внешнего колеса на рельс одинаково меняется для всех зазоров в скользунах при проектном профиле колеса, а при изношенном вагон с наклоненным кузовом имеет даже меньшие значения углов набегания.

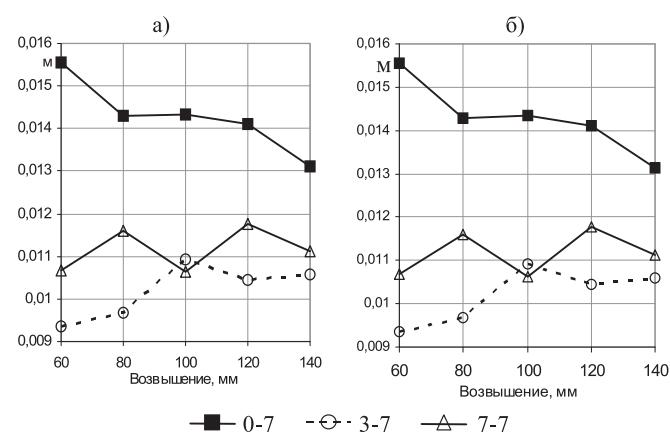
При сопоставлении характера сил на скользунах и величины углов набегания внешнего колеса на рельс можно сказать, что не происходит защемления скользунов и заклинивания тележки у кузова вагона с зазорами 0—7 мм при увеличении возвышения наружного рельса и по данным характеристикам не имеется качественных отличий при вписывании в кривые для вагонов с разными зазорами между скользунами.

Однако с точки зрения безопасности движения, которая оценивается по вертикальной координате точки контакта «колесо — рельс» (см. рис. 2), наиболее опасны для



**Рисунок 5 — Осциллограмма нормальной силы действующей между скользунами кузова и надрессорной балки**

наклоненного кузова «малые» значения завышения рельса, которые приводят к увеличению вертикальной координаты точки (подъему) контакта «колесо — рельс», т. е. к увеличению вкатывания колеса на рельс. Так, при величине возвышения 60 мм наружного рельса координата точки контакта составляет 16 мм как на проектном, так и на изношенном профиле колеса.



**Рисунок 6 — Зависимость подъема точки контакта для левого колеса первой колесной пары от возвышения наружного рельса (при разных внутренних зазорах между скользунами): а — проектный профиль; б — изношенный профиль**

Вкатывание колеса на рельс для вагона с наклоненным кузовом обусловлено повышенным уровнем горизонтальных вертикальных ускорений кузова. При этом горизонтальные ускорения с возвышением рельса имеют тенденцию к незначительному увеличению, вертикальные — обратную тенденцию.

Из приведенных результатов следует, что наибольшее влияние на безопасность движения порожнего грузового вагона в кривой радиусом 650 м при несимметричных зазорах 0—7 мм имеет заниженное значение возвышения наружного рельса, чем завышенное значение, т. е. более 120 мм. Интервал рекомендуемых величин по данным исследований составляет 80—100 мм, что соответствует принятым нормам для кривой 650 м.

## Оценка влияния геометрических характеристик буксового узла на динамические характеристики и безопасность движения грузового вагона

В работе [5] приведены исследования влияния зазоров в буксовых направляющих на динамику тележки и вагона, которыми было установлено, что основное влияние оказывает поворот колесной пары относительно рамы тележки благодаря наличию зазоров, нежели смещение колесной пары относительно своей оси. Поворот колесной пары в буксовых направляющих определяется величинами продольных (вдоль оси пути) зазоров.

Проектные размеры тележки 18-100 предусматривают продольные зазоры между вертикальными плоскостями корпуса боксы и боковинами не более 6 мм. Однако в инструкции по ремонту тележек грузовых вагонов [7] суммарный зазор в челюстях тележки должен составлять вдоль оси вагона 21 мм. При замерах тележек в эксплуатации [8] среднее значение суммы зазоров между боксами и боковыми направляющими было близким к 30 мм, а максимальное — до 35 мм. Такие продольные зазоры в буксовых узлах позволяют колесным парам перекаиваться в тележке (только что прошёл деповский ремонт) на 20—25 мм, т. е. около 1,2°. Если учесть, что забегание боковин в кривых при движении со скоростью более 60 км/ч может достигать 25 мм, то суммарный перекос колесных пар может достигать 50 мм, т. е. около 2,7°. Поэтому необходимы научно обоснованные нормы допусков содержания элементов и конструкций подвижного состава.

Большие продольные зазоры в буксовом узле являются одной из определяющих причин перекоса и непараллельности осей колесных пар в тележке, ведущих к интенсивному изнашиванию гребней колес. По данным ВНИИЖТ [7], 1 мрад угла набегания колеса на рельс дает дополнительное сопротивление движению 5 кгс/т. С целью измерения действительных значений углов перекоса колесных пар вагонов и определения предельно допустимых значений углов перекоса в Уральском отделении ВНИИЖТ проводились эксплуатационные испытания [8]. Так, в 1999 г. на посту диагностики, расположенного на четном подходе к станции Свердловск-Сортировочный, было проконтролировано 107 поездов. Максимально встречающиеся углы перекоса колесных пар составляли 0,008 рад, что соответствует продольному зазору в буксовых узлах около 9 мм (на одну сторону).

Чтобы изучить влияние продольных динамических характеристик грузового вагона на безопасность движения, предлагается следующая методика: исследовать динамическое поведение грузового вагона при движении в кривой. При этом начальным условием при входе в кривую является непараллельность колесных пар в первой тележке.

Определим повороты колесных пар при движении в кривой тележки 18-100 (рис. 7). Из графика на рис. 7 видим, что колесные пары в первой тележке поворачиваются по ходу движения в кривой, а во второй тележке — против хода движения в кривой.

Начальное условие при исследовании может быть двух видов: первая колесная пара перекошена либо по ходу вписывания тележки в кривую (см. рис. 7а), либо против хода вписывания тележки в кривую (см. рис. 7б).

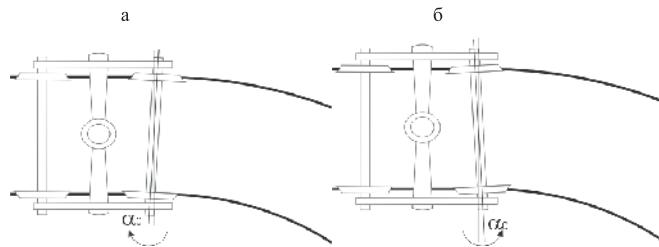


Рисунок 7 — Варианты перекоса колесной пары перед входом тележки в кривую

Для выбора наихудшего положения первой колесной пары перед входом в кривую проводилось численное моделирование движения грузового вагона со скоростью 80 км/ч в кривой радиусом 650 м. При этом продольный зазор в буксовом узле составлял 9 мм без перекоса первой колесной пары, с перекосом по ходу вписывания тележки в кривую, с перекосом против хода вписывания тележки в кривую.

Угол перекоса определялся по формуле

$$\alpha_0 = \frac{\Delta_{0x}}{h + l_2}, \quad (4)$$

где  $\Delta_{0x}$  — продольный зазор в буксовом узле;  
 $2h$  — расстояние между серединами шеек колесной пары,  
 $2h = 2036$  мм;  
 $2l_2$  — размер в буксовом узле (рис. 8).

Оценивался угол набегания первой колесной пары. Наибольший угол набегания (рис. 9) в процессе всего движения в кривой отмечен у тележки, имеющей перед входом в кривую перекос первой колесной пары против хода вписывания в кривую.

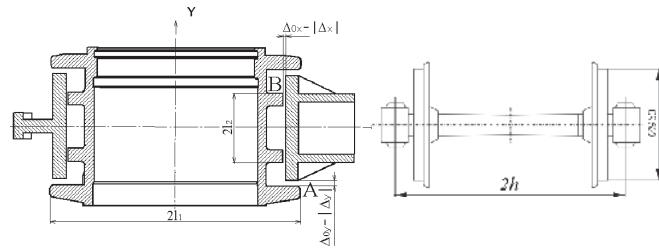


Рисунок 8 — Пояснение обозначений в формуле (4)

Для оценки влияния продольных зазоров с учетом ситуации перекоса колесной пары проводилось численное моделирование движения грузового вагона на тележках модели 18-100 в круговой кривой (радиус кривой — 650 м, возвышение наружного рельса — 90 мм).

По результатам вышеописанного численного эксперимента был выбран в качестве начального условия перекос первой колесной пары против хода вписывания тележки в кривую (см. рис. 8). При этом поперечный зазор в буксовом узле оставался постоянным — 5 мм, а продольный зазор варьировался от 1 до 13 мм. Моделирование проводилось в порожнем режиме со скоростью движения 10, 14, 18, 22 и 26 м/с. В качестве

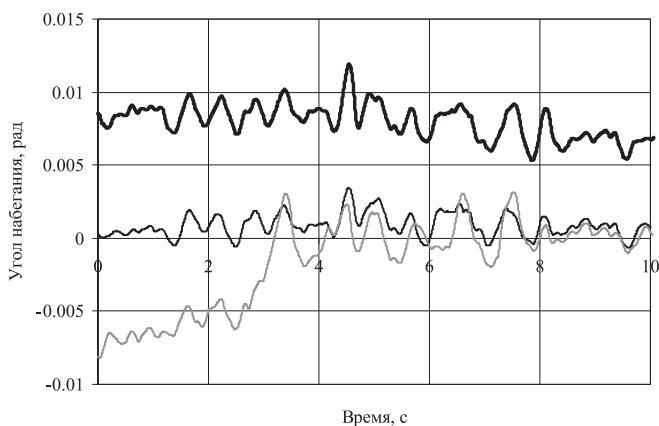


Рисунок 9 — Зависимость от времени угла набегания первой колесной пары для разных начальных условий вписывания тележки в кривую

начального условия при входе в кривую задавался максимальный перекос колесной пары, определяемый продольным зазором в буксовом узле.

Результаты исследований приведены на рис. 10. Для оценки влияния продольных зазоров с учетом ситуации перекоса колесной пары приведены значения динамических показателей грузового вагона при скорости движения 22 м/с (табл. 3).

Результаты численных экспериментов по оценке влияния геометрических характеристик буксового узла на динамические характеристики вагона позволили установить, что у тележек с продольными зазорами в буксовом узле от 7 до 13 мм величина подъема точки контакта (при скорости движения 26 м/с) выше 22 мм. У тележки с продольным зазором 13 мм она достигает верхнего предела уже при скорости 22 м/с. При этом коэффициент запаса устойчивости от вкатывания колеса на головку рельса ниже нормативного значения при максимальной скорости движения для всего диапазона рассматриваемых продольных зазоров в буксовом узле (см. рис. 10).

Наименьшее значение коэффициент запаса устойчивости от вкатывания колеса на гребень рельса имеет для тележки с продольным зазором в буксовом узле 13 мм во всем диапазоне рассматриваемых скоростей. Также при увеличении продольного зазора в буксовом узле уменьшается скорость, при которой коэффициент запаса устойчивости от вкатывания колеса на гребень рельса имеет нормативное значение. Например, для тележки с продольным зазором 13 мм уже при скорости 12 м/с коэффициент запаса устойчивости от вкатывания колеса на гребень рельса ниже нормативного значения.

## Выводы

Исследования по определению влияния изменения линейных размеров (вследствие износа) на безопасность движения вагонов, выполненные с использованием разработанной ма-

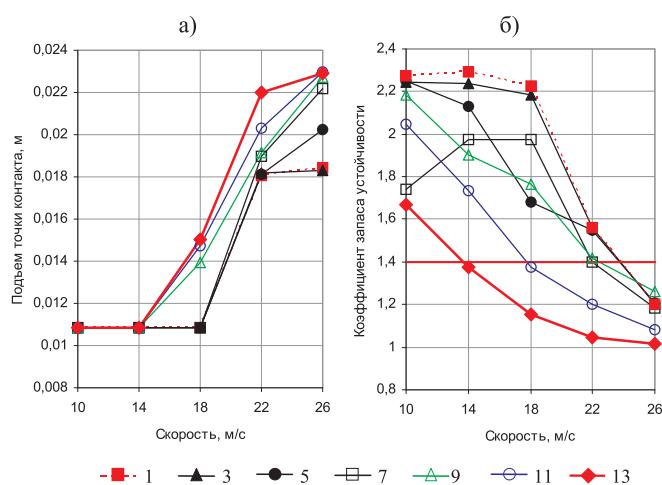


Рисунок 10 — Графики зависимости динамических показателей от скорости движения вагона в кривой при различных продольных зазорах в буксовом узле: а — вертикальный подъем точки контакта «колесо — рельс»; б — коэффициент запаса устойчивости от вкатывания гребня колеса на рельс

Таблица 3 — Значения показателей динамики при моделировании движения грузового вагона с различными продольными зазорами в буксовом узле (скорость движения — 22 м/с)

Динамические характеристики	Продольный зазор в буксовом узле, мм						
	1	3	5	7	9	11	13
Подъем точки контакта, мм (22)	18	18	18	19	19	20	22
Коэф. запаса устойчивости от вкатывания гребня колеса на рельс (1,4)	1,56	1,56	1,55	1,42	1,4	1,2	1,04
Рамная сила, Н (14 700–22 500)	12 458	11 301	10 911	10 618	10 666	11 630	11 932
Горизонтальное ускорение кузова, м/с <sup>2</sup> (1,96–2,94)	2,5	2,2	2,4	2,3	2,3	2,6	2,6
Сила отжатия рельса, Н	26 360	23 830	25 445	28 264	30 110	34 521	37 141
Угол набегания, рад	0,005	0,005	0,008	0,009	0,013	0,015	0,016
Фактор износа, Нм/с	3 967	3 654	3 763	4 255	4 668	4 744	5 465

тематической модели движения грузового вагона, позволили установить следующее.

- Движение порожнего вагона в кривой радиусом 650 м со значениями динамических показателей в рамках нормативных значений проектных показателей возможно:
- до скорости 80 км/ч только с завышением клина, обусловленным равномерным износом элементов гасителя, до 4 мм (износ по 1,2 мм на поверхность);

- до скорости 65 км/ч только с завышением клина, обусловленным равномерным износом элементов гасителя, до 10 мм (износ по 3 мм на поверхность).
- 2. Подтверждена недопустимость эксплуатации вагона с зазорами между скользунами по диагонали, равными нулю при любых значениях остальных двух зазоров.
- 3. Наихудшее влияние на безопасность движения порожнего грузового вагона в кривой радиусом 650 м при несимметричных зазорах в тележке (с внутренней стороны — ноль) имеет заниженное значение (менее 80 мм) возвышения наружного рельса, чем завышенное значение, т. е. более 120 мм.
- 4. Увеличение продольных зазоров в буксовых узлах приводит к увеличению износа колеса и рельсовой колеи в кривых при входе в кривую с заранее перекошенной колесной парой, а также к увеличению вероятности схода порожних вагонов при вписывании по причине вкатывания гребня колеса на головку рельса.

В связи с этим рекомендуется ограничить продольные зазоры в буксовом узле в интервале от 3 до 9 мм (на одну сторону) исходя из значений коэффициента запаса устойчивости от вкатывания колеса на гребень рельса, а также значений выбранного критерия схода.

## Литература

1. Павлюков А.Э. Прогнозирование нагруженности ходовых частей грузового вагона повышенной грузоподъемности методами имитационного моделирования: дис. ... д-ра техн. наук // Екатеринбург: УрГУПС, 2002.

2. Нормы для расчета и проектирования вагонов железных дорог МПС колеи 1520 мм (несамоходных). М.: ГосНИИВ-ВНИИЖТ, 1996.

3. Ушаков В.Ф., Резников Л.М., Редько С.Ф. Статистическая динамика рельсовых экипажей. Киев: Наукова думка, 1982. 369 с.

4. РД 32.68-96. Расчетные неровности железнодорожного пути для использования при исследованиях и проектировании пассажирских и грузовых вагонов. М.: ВНИИЖТ, 1996. 17 с.

5. Пермяков А.А. Безопасность движения вагона в кривых участках пути при различных технических состояниях системы вагон — путь: дис. ... канд. техн. наук. Екатеринбург: УрГУПС, 2004.

6. Устименко Н.М., Сергеев Н.И., Дергунов Н.П. Использование информационных технологий для ликвидации причин вкатывания колес на головку рельса и снижения износа гребней колес и поверхности рельса // Ресурсосберегающие технологии на железнодорожном транспорте: тр. IV науч.-практ. конф. 7-8 июня 2001 года. М.: Изд-во МИИТ, 2001. С. III-63 — III-66.

7. РД 32 ЦВ 052-2005. Ремонт тележек грузовых вагонов / ПКБ ЦВ ОАО «РЖД». М., 2005.

8. Взаимосвязь перекоса колесных пар в рельсовой колее и технического состояния ходовых частей грузовых вагонов в эксплуатации / Зыков Ю.В., Ромен Ю.С., Харитонов Б.В. // Проблемы механики железнодорожного транспорта: Динамика, надежность и безопасность подвижного состава: тезисы докладов X Междунар. конф. Днепропетровск: Арт-пресс, 2000. С. 75 — 76.

## References

1. Pavlyukov A.E. Prognozirovaniye nagruzhennosti khodovykh chastei gruzovogo vagona povyshennoi gruzopodemnosti metodami imitatsionnogo modelirovaniya: dis. d-ra techn. nauk [Prediction of loading of heavy-duty freight car running gear using simulation methods: DSc in Engineering Thesis] // Ekaterinburg: USURT, 2002.

2. Normy dlya rascheta i proektirovaniya vagonov zheleznykh dorog MPS kolei 1520 mm (nesamokhodnykh) [Standards for calculation and design of railway cars (non-self-propelled) MPS for 1520 mm gauge] Moskva: GosNITV-VNIIZhT, 1996.

3. Ushkalov V.F., Reznikov L.M., Redko S.F. Statisticheskaya dinamika rельsovikh ekipazhey. [Statistical dynamics of railway vehicles.] Kiev: Naukova dumka, 1982. 369 p.

4. RD 32.68-96 Raschetnye nerovnosti zheleznodorozhnnogo puti dlya ispolzovaniya pri issledovanijakh i proektirovaniyu passagirskikh i gruzovykh vagonov [Calculated irregularities of railway track for use in research and design of passenger and freight cars] M.: VNIIZhT, 1996, 17 p.

5. Permyakov A.A. Bezopasnost dvizhenija vagona v krivykh uchastkah puti pri razlichnykh tekhnicheskikh sostojaniyah sistemy vagon — put: dis. ... kand. tekhn. nauk [Car traffic safety in curve track sections at various technical conditions of carriage-way system: PhD in Engineering Thesis] // Ekaterinburg: USURT, 2004.

6. Ustimenko N.M., Sergeev N.I., Dergunov N.P. Ispolzovanie informatsionnykh tekhnologiy dlya likvidatsii prichin vkatyvaniya koles na golovku relsa i snizheniya iznosa grebney koles i poverkhnosti relsa. [The use of information technology to eliminate the causes of wheels rolling-in on rail head and reduce wear of wheel flanges and rail surface.] // Resursosberegayushchie tekhnologii na zheleznodorozhnom transporte: [Resource-saving technologies for rail transport] Proceedings of the IV Scientific and Practical Conference, June 7-8, 2001. MIIT Publishing House 2001, p. III-63 - III-66.

7. Remont telezhek gruzovykh vagonov [Repair of freight car trucks]: RD 32 CV 052-2005 / PKB CV JSC RZD. Moskva, 2005.

8. Vzaimosvyaz perekosa kolesnykh par v relsovoy kolee i tekhnicheskogo sostoyaniya khodovykh chastei gruzovykh vagonov v ekspluatatsii [The relationship between skew of wheel sets in rail track and technical condition of running gear of freight cars in operation] / Zykov Yu.V., Romen Yu.S., Kharitonov B.V. // Problemy mehaniki zheleznodorozhnogo transporta: Dinamika, nadezhnost i bezopasnost podvizhnogo sostava [Problems of Railway Transport Mechanics: Trends, reliability and safety of rolling stock] Theses of reports of the X International Conference, Dnepropetrovsk: Art-press, 2000. p. 75 — 76.

УДК 656.212.5

Петр Алексеевич Козлов, доктор технических наук, профессор, президент научно-производственного холдинга СТРАТЕГ (Современные транспортные технологии государства),  
 Виталий Сергеевич Колокольников, ассистент кафедры «Управление эксплуатационной работой» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС)

## ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ГИБКОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ СТАНЦИЙ В УЗЛЕ

Petr A. Kozlov, DSc in Engineering, Professor, President of the Research and Production Holding STRATEG (Modern transportation technologies of the state),  
 Vitaly S. Kolokolnikov, Assistant of the Chair "Management of Exploitation Work", USURT

## Theoretical Basis Of Flexible Interaction Of Stations Within A Transport Hub

### Аннотация

Станции в узле взаимодействуют через потоки, при этом важную роль играет не только их величина, но и параметры. Предлагается процессы переработки потоков представлять как активное преобразование их свойств или понижение дезорганизации, сопровождающей естественным образом все станционные процессы. Формулируется строгая постановка задачи структурно-технологического распределения работы между станциями в среднем и гибкого перераспределения в меняющейся ситуации для сокращения суммарных резервов в узле.

**Ключевые слова:** поток, гибкое взаимодействие, станция, свойство, преобразование, резервы.

### Abstract

Stations in knot co-operate through streams, thus an important role play not only their size, but also parameters. It is offered to represent processes of processing of streams as active transformation of their properties or fall of the disorganisation accompanying naturally all station processes. Strict statement of a problem of structurally-technological distribution of work between stations on the average and flexible redistribution in a changing situation for reduction of total reserves in knot is formulated.

**Key words:** stream, flexible interaction, station, property, transformation, reserves.

### Поток и его преобразование

Поставщики и потребители взаимодействуют между собой через потоки. Через потоки взаимодействуют между собой и станции. Характер взаимодействия определяет не только величина потока, но и его свойства [1].

На пути от поставщика к потребителю поток проходит ряд устройств, которые принято называть каналами обслуживания или просто каналами. В каналах происходит преобразование потока, т. е. изменение его свойств,

$$\{\rho^j\} \Rightarrow \{\rho'^j\}. \quad (1)$$

Преобразование потока может быть активным и пассивным. Активное — это улучшение вполне определенного свойства с затратой энергии и использованием специальной технологии и соответствующих устройств. Пассивное — это попутное ухудшение некоторых свойств как следствие переработки потока. Следовательно, активное преобразование — это процессы организации, а пассивное — дезорганизации. Будем считать  $\rho^j > 0$  — дезорганизация присутствует,  $\rho^j = 0$  — дезорганизация отсутствует,  $\rho^j < 0$  — присутствует организация.

Для продвижения потока требуется в общем случае выполнение условия

$$\forall_j |\rho^j| \leq \bar{\rho}^j, \quad (2)$$

где  $\bar{\rho}^j$  — допустимое значение  $\rho^j$ .

Если это условие не выполняется, то должно присутствовать преобразование типа

$$\rho^j - \Delta \tilde{\rho}^j \leq \bar{\rho}^j, \quad (3)$$

где  $\Delta \tilde{\rho}^j$  — активное преобразование, т. е. улучшение  $j$ -го свойства до приемлемого значения.

### Отображение свойств потока в виде параметров $\rho^j$

$\rho$  — неравномерность или случайные колебания величины потока. Неравномерность требует либо резерва пропускной способности канала, либо предварительного ее уменьшения.

$\rho^*$  — неупорядоченность в потоке. Она проявляется, если структура потока не соответствует структуре сети. Отсутствие в потоке соответственно выделенных струй требует его преобразования.

## Случайная неравномерность потока $\rho$ и процессы преобразования $\Delta\tilde{\rho}$

При наличии случайной неравномерности расчет пропускной способности канала ведется не по средней величине потока  $\rho_{cp}$ , а по увеличенному расчетному потоку  $\tilde{\rho}$ . Поток большей пропускной способности отсекается в очередь. То есть перед каналом, как правило, возникает некий бункер, где неравномерность понижается (на железнодорожном транспорте — резервные пути). Именно в бункере идет процесс  $\Delta\tilde{\rho}$ , и чем больше величина  $\Delta\tilde{\rho}$ , тем больше требуется резервных путей.

## Структура очереди в системе «канал — бункер»

Очередь в бункере состоит из двух частей: очереди, создаваемой дезорганизацией канала, и очереди, создаваемой дезорганизацией потока.

Это можно показать расчетами на простой модели в системе моделирования «Аренда» (рис. 1). Здесь показана динамика при увеличении коэффициента загрузки  $\Psi$  очереди при  $\rho_k > 0$  и  $\rho_n = 0$ , а также очереди при  $\rho_n > 0$  и  $\rho_k = 0$ . Затем проведен эксперимент при  $\rho_k > 0$  и  $\rho_n > 0$ .

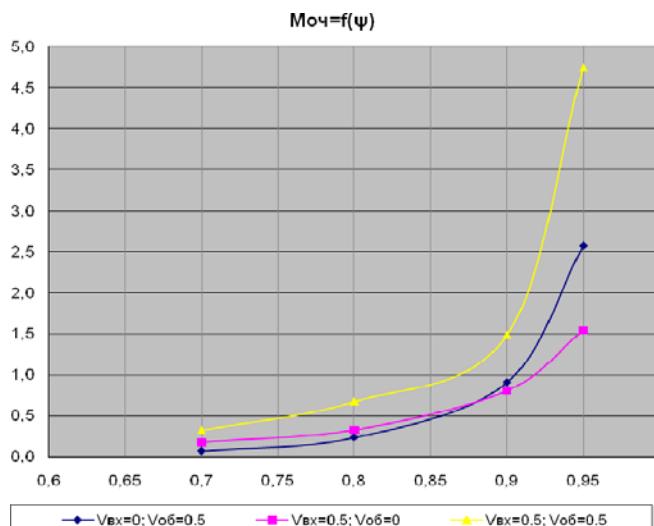


Рисунок 1 — Динамика очереди канала, потока и совместной при возрастании загрузки  $\Psi$

На рис. 2 показано соотношение динамики двух очередей — суммы очередей при отдельном воздействии  $\rho_n > 0$ ,  $\rho_k = 0$  и  $\rho_k > 0$ ,  $\rho_n = 0$  и очереди при их совместном воздействии  $\rho_k > 0$ ,  $\rho_n > 0$ . Как можно увидеть, две кривые практически совпадают.

Значит, очередь в канале действительно четко распадается на две — из-за канала и из-за потока.

Роль бункера сводится к понижению  $\rho_n$ . Сначала идет уменьшение до  $\rho = 0$  (равномерный поток или приравненный к нему). В этом случае остается только очередь, создаваемая каналом. Дальнейшее понижение  $\rho_n$  означает согласование ритма потока с ритмом обслуживания в канале,  $\rho_n$  переходит в отрицательную область. Отрицательное  $\rho_n < 0$  означает, что колебания в потоке управляемые. Управляемый поток нейтрализует очередь, созданную каналом. Если поток полностью управляемый, то суммарная очередь равна нулю (рис. 3).

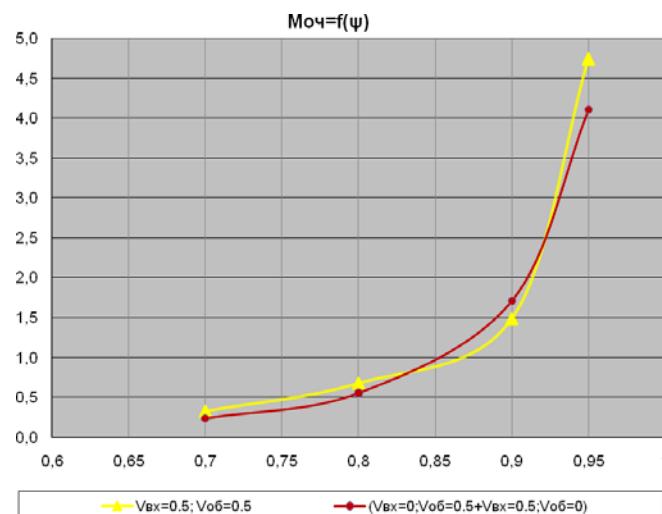


Рисунок 2 — Динамика суммы отдельных очередей и совместной очереди (красный цвет — сумма отдельных очередей, желтый — совместная)

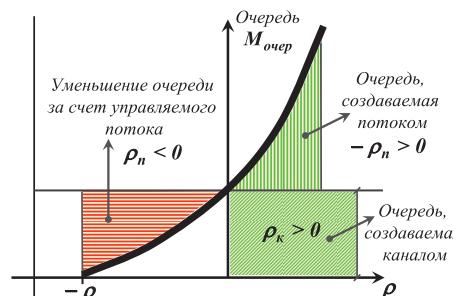
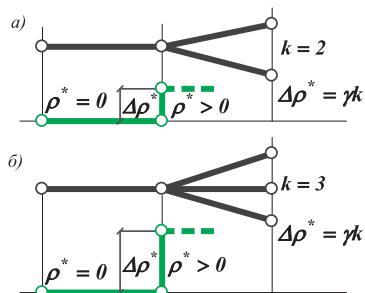


Рисунок 3 — Динамика суммарной очереди из-за канала и потока

Однако неожиданно расчеты показали, что в схеме 2 коэффициент вариации потока из первого бункера во второй не равен нулю. При этом при одном и том же  $\rho = 0$  коэффициент вариации принимал различные значения  $v \geq 0$ . То есть при  $\rho = 0$  может быть либо равномерный поток, либо неравномерный смешанный, где управляемая часть потока как бы нейтрализует случайную. Это весьма важное заключение. Ибо в расчетах транспортных систем колебания потока, как правило, считаются случайными. И, следовательно, при смешанном потоке неправомерно применяется аппарат теории массового обслуживания.

## Параметр «неупорядоченность потока» $\rho^*$

Другим видом дезорганизации является внутренняя неупорядоченность потока. В отличие от параметра  $\rho$ , который характеризует количественную сторону дезорганизации, параметр  $\rho^*$  отображает его качественную сторону. В потоке могут быть разные струи, которые следуют к различным получателям. В потоке эти струи могут быть выделены, тогда поток будем считать качественно организованным, а могут быть перемешаны, в этом случае поток будет дезорганизованным. Проявляется это в момент прохождения потоком развилки (рис. 4).

Рисунок 4 — Изменение  $\rho^*$  при возникновении разветвления

Будем считать, что поток может следовать, если  $\rho^* \leq 0$ . При появлении разветвления параметр  $\rho^*$  увеличивается на величину  $\Delta\rho^*$ , которая отображает необходимость работы по переформированию составов. Эта работа может быть больше или меньше в зависимости от того, на сколько струй делится поток (см. рис. 4). В общем случае будем считать, что

$$\Delta\rho^* = \gamma k, \quad (4)$$

где  $k$  — число выходящих с разветвления струй;  
 $\gamma$  — коэффициент трудоемкости.

Работу по восстановлению упорядоченности обозначим как  $\tilde{\Delta}\rho$  (активная работа). Тогда динамику параметра  $\rho^*$  в разветвленном потоке можно записать (рис. 5)

$$\rho_{\text{вых}}^* = \rho_{\text{вх}} + \Delta\rho^* - \tilde{\Delta}\rho,$$

при этом  $\rho_{\text{вых}}^* \leq 0$ .

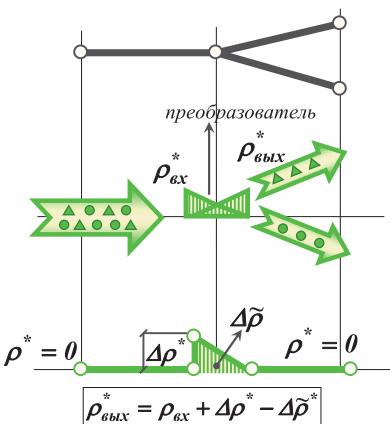


Рисунок 5— Восстановление упорядоченности потока в пункте разветвления

Как и в случае с параметром  $\rho$ , параметр  $\rho^*$  может также принимать отрицательное значение (это понимается как избыток организации, создание организации большей, чем минимально необходимо по сети).

### Организация гибкого взаимодействия станций в узле

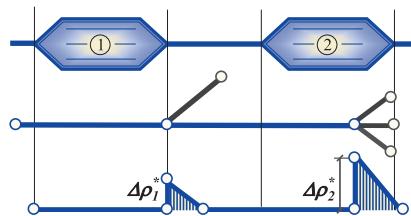
Гибкое взаимодействие двух станций означает согласованное преобразование потока на двух станциях по параметрам  $\rho$  и  $\rho^*$  (рис. 6). В зависимости от распределения работы по параметру  $\rho^*$  между станциями выбираются средние пропускные способности каналов на двух станциях. Чем более детальная переработка потока по струям на станции 1, тем меньше необходима работа на станции 2, соответственно увеличивается канал на станции 1 и уменьшается на станции 2. Но это в

среднем. Резервы же каналов будут зависеть от соотношения бункеров на станции 1 и 2. Чем больше бункер на станции 1, тем более управляемый поток поступает на станцию 2 и тем самым меньшая величина бункера потребуется на станции 2.



Рисунок 6 — Процессы гибкого взаимодействия станций в узле

Процесс пассивного и активного взаимодействия станций в узле по параметру  $\rho^*$  выглядит следующим образом. Пассивное — это когда каждая станция выполняет минимально необходимую работу для возможности продвижения потока (рис. 7). То есть когда  $\rho_{\text{вых}}^* = 0$ .

Рисунок 7 — Пассивное взаимодействие станций в узле по параметру  $\rho^*$ 

Активное взаимодействие — это управляемое преобразование потока. И степень преобразования определяется сложившейся ситуацией. Допустим, станция 1 — сортировочная, которая готовит передаточные поезда на станцию 2. Та, в свою очередь, осуществляет подформирование вагонопотока по фронтам выгрузки. Минимально необходимая работа для станции 1 — это формирование одногруппных поездов на станцию 2. Однако при трудном положении на станции 2 она может готовить и двухгруппные, и трехгруппные. В этом случае выходящий со станции 1 поток будет иметь  $\rho_{\text{вых}}^* \leq 0$  (рис. 8).

Меняя параметр выходного потока от  $\rho_{\text{вых}}^* = 0$  до  $|\rho_{\text{вых}}^*| = \Delta\rho_2^*$ , станция 1 осуществляет гибкое взаимодействие со станцией 2. Вариант взаимодействия выбирается по минимуму затрат с учетом возможных ограничений.

Итак, например, станция 1 — это сортировочная, станция 2 — терминальная, обслуживающая 4 грузовых фронта (рис. 9). В зависимости от условий и затрат сортировочная станция может осуществлять более или менее детальную подборку по фронтам — в варианте I отправляется одногруппный поезд, в варианте II — двухгруппный (выделена группа для одного из фронтов, где самая мощная струя), в варианте III — готовится поезд из IV групп. Естественно, для такого распределения сортировочной работы нужно выбирать параметры каналов  $U_{\text{cp}1}$  и  $U_{\text{cp}2}$ .

Взаимодействие станций по параметру  $\rho$  заключается в выборе согласованной емкости бункеров и резервов каналов. Различные виды взаимодействия показаны на рис. 10.

В случае I бункера на станциях 1 и 2 частично погашают случайные колебания потока. В случае II поток со станции 1 выходит с  $\rho=0$ . И резерв канала на станции 2 нужен лишь для  $\rho_k$ .

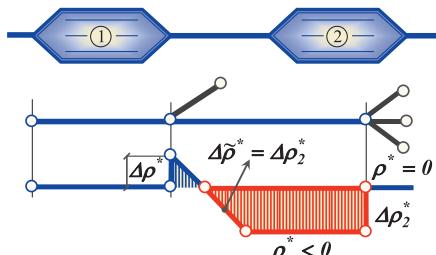


Рисунок 8 — Активное взаимодействие станций в узле по параметру  $p^*$

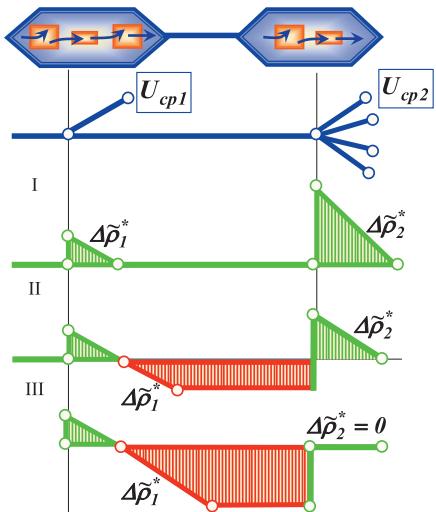


Рисунок 9 — Варианты взаимодействия станций по параметру  $p^*$

В варианте III со станции 1 идет сильно управляемый поток, что позволяет иметь канал на станции 2 практически без резервов.

Но гибкость заключается не только в согласованном выборе структурных параметров. Дело в том, что в реальной работе может складываться трудная ситуация либо на одной, либо на другой станции. И тогда станции могут оперативно переходить на один из возможных вариантов взаимодействия, рациональный в данной ситуации [2]. Например, сортировочная станция в обычных условиях готовит одногруппный поезд, а в трудных для станции 2 — многогруппный.

Таким образом, оптимальное структурно-технологическое распределение работы между станциями будет иметь вид

$$c_1 \Delta \tilde{p}_1 + c_1^* \Delta \tilde{p}_1^* + c_2 \Delta \tilde{p}_2 + c_2^* \Delta \tilde{p}_2^* \rightarrow \min \quad (5)$$

при ограничениях

$$\Delta \tilde{p}_1 \leq R_1, \Delta \tilde{p}_1^* \leq R_1^*, \Delta \tilde{p}_2 \leq R_2, \Delta \tilde{p}_2^* \leq R_2^*, \quad (6)$$

## Литература

- Козлов П.А., Владимирская И.П. Закономерности преобразования потока в транспортных структурах // Транспорт Урала. 2009. № 1. С. 37—39.
- Козлов П.А., Козлова В.П. Расчет параметров проектируемых транспортных узлов // Железнодорожный транспорт. 2008. № 7. С. 36—38.

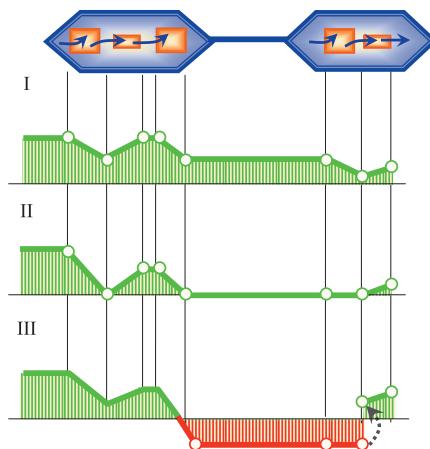


Рисунок 10 — Варианты взаимодействия станций в узле по параметру  $p$

$$\forall_i \forall_j | \rho_i^j = \bar{\rho}_i^j + \Delta \rho_i^j - \Delta \tilde{\rho}_i^j, \quad (7)$$

$$\forall_i \forall_j | \rho_i^j \leq \bar{\rho}_i^j, \quad (8)$$

где  $R, R^*$  — предельная возможность выполнения работ  $\Delta \tilde{\rho}$  и  $\Delta \tilde{\rho}^*$  соответственно;

$\rho_i^j$  —  $j$ -е свойство потока, поступающего на  $i$ -й канал;  
 $\Delta \rho_i^j$  — пассивное увеличение дезорганизации в некотором процессе;

$\bar{\rho}$  —  $\rho$  входного потока, поступающего в переработку;

$\bar{\rho}$  — допустимое значение  $\rho$ , определяемое резервом канала.

Гибкое взаимодействие должно учитывать изменяющуюся ситуацию, т. е. меняться могут свободные емкости, и тогда резерв  $R_i$  превращается в  $R_i(t)$ ; могут уменьшаться возможности переработки потоков, и тогда  $R_i^* \rightarrow R_i^*(t)$ , а также стоимостные параметры  $c_i \rightarrow c_i(t), c_i^* \rightarrow c_i^*(t)$ .

И тогда функционал будет иметь вид

$$\sum_i \sum_t c_i(t) \Delta \tilde{\rho}_i(t) + \sum_i \sum_t c_i^*(t) \Delta \tilde{\rho}_i^*(t) \rightarrow \min \quad (9)$$

с соответствующими изменениями в ограничениях.

Итак, сущность гибкого взаимодействия представляется здесь как перераспределение активной работы по понижению дезорганизации между станциями в узле. Это позволяет снизить суммарные резервы станций. Практическое доказательство этого лучше осуществлять на имитационных моделях.

## References

- Kozlov P.A., Vladimirskaya I.P. Zakonomernosti preobrazovaniya potoka v transportnykh strukturakh [Patterns of flow transformation in transport structures] // Transport Urala. 2009. No.1. p.37—39.
- Kozlov P.A., Kozlova V.P. Raschet parametrov proektiruemых transportnykh uzlov [Calculation of parameters of designed transport hubs] // Zheleznodorozhny transport. 2008. No. 7. p. 36—38.



УДК 656.2.078

Ольга Юрьевна Портнова, аспирант кафедры «Станции, узлы и грузовая работа» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС)

## О НЕКОТОРЫХ ПРОБЛЕМАХ И СДЕРЖИВАЮЩИХ ФАКТОРАХ РАЗВИТИЯ РЕГИОНАЛЬНОГО РЫНКА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ ПЕРЕВОЗОК

Olga Yu. Portnova, postgraduate student of the Department "Stations, Junctions and Freight Work" of Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg

### On Some Problems And Limiting Factors Of Development Of The Regional Railway Services Market

#### Аннотация

Рассматриваются факторы и недостатки, оказывающие непосредственное воздействие на функционирование всей железнодорожной транспортной системы и сдерживающие развитие регионального рынка грузовых перевозок. Данные факторы приводят к экономическим и производственным потерям всех участников перевозочного процесса: как грузоотправителей и грузополучателей, так и ОАО «РЖД» и собственников подвижного состава.

**Ключевые слова:** избыточный парк вагонов, рост числа операторов, процент порожнего пробега, сдвоенные операции, встречное перемещение порожнего состава, взаимодействие производства и транспорта, промышленные предприятия, пути необщего пользования, неравномерность вагонопотоков, подвижной состав, сверхнормативные простоя вагонов, неравномерное прибытие сырья, неравномерное прибытие порожних вагонов.

#### Abstract

The factors and disadvantages having a direct impact on operation of the entire rail transport system and hampering the development of a regional freight services market are considered. These factors lead to economic and production losses of all participants of transportation process: both shippers, consignees, and JSC «Russian Railways» and rolling stock owners.

**Keywords:** excess car fleet; increase in the number of operators, percentage of empty runs, dual operations, counter-movement of empty fleet, the interaction of production and transport, industrial enterprises, non-public tracks, uneven car traffic volumes, rolling stock, excessive car downtime, uneven arrival of raw materials, uneven arrival of empty cars.

**Б** Российской Федерации (далее — РФ) железнодорожный транспорт является государствообразующей и жизнеобеспечивающей отраслью экономики. Широкомасштабное географическое положение страны, гигантские расстояния, необжитость многих регионов — все это только подчеркивает основную роль железнодорожного транспорта в России. Действительно, грузооборот железнодорожной транспортной системы в РФ составляет около 42% — практически половину от общего показателя.

В 2012 г. грузооборот на сети железных дорог РФ достиг максимального за последние 20 лет значения и составил 1230 млрд т. км. При этом сеть Российских железных дорог является одной из самых грузонапряженных транспортных систем в мире, опережая по этому показателю США в 1,7 раза, Европейский союз — в 17 раз.

От состояния и качества работы железнодорожного транспорта зависят не только перспективы дальнейшего социально-экономического развития, но и возможности государства эффективно выполнять важнейшие функции, такие как защита национального суверенитета и безопасности страны, обеспечение потребности граждан в перевозках, создание условий для выравнивания социально-экономического развития регионов [1].

В начале XXI в. перевозочный процесс на железнодорожном транспорте РФ обеспечивается в условиях существенных технологических изменений, связанных с реформированием, с реализацией целевой модели рынка грузовых перевозок. В этот период завершается создание конкурентного рынка предоставления транспортных услуг.

Развитие рынка железнодорожных транспортных услуг на основе либерализации государственного регулирования отрасли и стремительное развитие принципиально новых механизмов привели к тому, что традиционные, устоявшиеся схемы работы и управления не отвечают изменившимся условиям.

Цель настоящей статьи — выявить факторы и недостатки, оказывающие непосредственное воздействие на функ-

ционирование железнодорожной транспортной системы и сдерживающие развитие регионального рынка грузовых перевозок. Ликвидация данных недостатков позволит повысить экономические и качественные показатели работы предприятий, железнодорожных грузовых станций, на которых осуществляют свою деятельность предприятия и ОАО «РЖД» в целом.

Подчеркнем, что процесс реформирования начался с 2001 г. и составляет четыре этапа:

I этап реформы (2001 — 2003 гг.) — учреждено открытое акционерное общество «Российские железные дороги» (ОАО «РЖД»);

II этап (2003 — 2005 гг.) — создание ДЗО ОАО «РЖД», осуществляющих открытые для конкуренции виды деятельности;

III этап (2006 — 2010 гг.) — переход большей части (60% и более) парка грузовых вагонов в частную собственность;

IV этап (2011 — 2015 гг.) — создание Целевой модели рынка грузовых перевозок.

На завершающем этапе структурной реформы обострились следующие ключевые проблемы отрасли:

- инфраструктурные ограничения экономического роста, которые выражаются в увеличении протяженности узких мест инфраструктуры и дефиците отдельных типов подвижного состава;
- недостаточная адаптированность действующей системы тарифообразования к текущим рыночным потребностям;
- недостаточное финансирование обновления и развития основных фондов железнодорожного транспорта;
- отставание темпов развития железнодорожного транспорта Российской Федерации по сравнению с ведущими железными дорогами мира;
- снижение конкурентоспособности железнодорожного транспорта во внутреннем сообщении по сравнению с другими видами транспорта (в первую очередь с автомобильным).

В вышеперечисленных ключевых проблемах следует выделить факторы, влияющие на снижение качества предоставления транспортных услуг в последние несколько лет, это:

- избыточный парк вагонов;
- рост числа операторов;
- увеличение процента порожнего пробега вагонов;
- снижение количества сдвоенных операций;
- увеличение встречного перемещения однотипного порожнего подвижного состава.

Значительно усложняет процесс функционирования железнодорожного транспорта тот факт, что проводимые реформы опережают развитие законодательной базы: последние изменения, регламентирующие отношения между субъектами транспортного рынка, в законодательную базу были внесены более 10 лет назад, когда вступил в силу Устав железнодорожного транспорта Российской Федерации (Федеральный закон от 10 января 2003 г. № 18-ФЗ, опубликован в «Российской газете» 18 января 2003 г.) [2].

Избыточный парк, рост числа операторов и формирование у них идеологии извлечения максимальной прибыли без учета возможностей инфраструктуры негативно сказались на качестве эксплуатационной работы [3].

С конца 2010 г. и вплоть до середины 2012 г. на рынке наблюдается искусственно созданный дефицит вагонов вследствие неэффективного управления со стороны операторов разрозненными парками, а также недостатка тяги. В этот период спрос на вагоны превышает предложение, а потому ситуацию можно характеризовать как рынок продавца. Операторы диктуют грузоотправителям удобные для них условия: выбирают направления, на которые согласны направлять свои вагоны, поднимают ставки и устанавливают цену на свои услуги, исходя из собственных интересов. В ряде случаев складывалась ситуация, когда грузовладельцы не в состоянии были оплачивать услуги операторов. Это касается грузов, имеющих низкую стоимость на рынке и высокую транспортную составляющую.

В отсутствие конкуренции и механизма сдерживания ставок оператор пользовался ситуацией и извлекал максимальную прибыль. Оператор оптимизирует решение только своих локальных задач, не учитывая технические и технологические возможности инфраструктуры ОАО «РЖД» общего пользования.

Во втором полугодии 2012 г. ситуация с наличием и доступностью вагонов на рынке изменилась, максимальную роль в данном процессе сыграло создание парка привлеченных вагонов (ВСП). Парк ВСП, находящийся в оперировании у ОАО «РЖД», стал для грузовладельцев и операторов своего рода ценовым индикатором, как был в свое время инвентарный парк.

Со второй половины 2012 г. ситуацию на железнодорожном рынке можно характеризовать как рынок покупателя: возникает профицит подвижного состава, конкуренция операторов подвижного состава за клиента усиливается. Вследствие этого меняется ценовая политика операторов. В итоге грузовладельцы получили возможность выбирать наиболее приемлемый для себя подвижной состав.

С середины 2012 г. проблем с наличием и доступностью вагонов на рынке нет, но улучшения эксплуатационной обстановки на сети не происходит. Главная проблема остается — неэффективная организация работы приватного парка грузовых вагонов.

В сложившихся рыночных условиях управления ОАО «РЖД» не только выполняет свои прямые задачи — обеспечение организации и управления процессом перевозок грузов, но и занимается вопросами оптимизации работы как грузоотправителей, так и операторов подвижного состава, а также вопросами упорядочения логистических схем движения груженых и порожних вагонопотоков.

В целях улучшения транспортного обслуживания предприятий, осуществляющих отгрузку своей продукции железнодорожным транспортом, созданы региональные и межрегиональные координационные советы [4]. Для стабилизации эксплуатационной обстановки на железных дорогах сформированы рабочие группы по оптимизации логистических схем доставки грузов.

Но не все грузоотправители — промышленные предприятия и операторы подвижного состава занимаются решением вопросов по оптимизации вагонопотоков и включают их в рабочий процесс. Однако для любого предприятия транспорт и производство — две неразрывные части. Нарушение связи ведет к потерям в обеих частях либо требует перестройки их работы [5]. Поэтому на данном этапе весьма важное значение приобретает проблема повышения эффективности взаимодействия производства и транспорта.

В [6] проведен подробный анализ работы промышленных предприятий УрФО и выявлены общие недостатки взаимодействия предприятий с железнодорожным транспортом. На основе проведенного анализа были выделены следующие проблемные вопросы, препятствующие улучшению транспортного обслуживания.

1. Увеличение количества подвижного состава, используемого грузоотправителями в производственном процессе.

С появлением множества операторов грузовых вагонов увеличилось количество прибывающих на предприятие порожних вагонов: сырье на предприятие прибывает в вагонах одной собственности, а вывоз продукции, как правило, происходит в вагонах уже других транспортных компаний (рис. 1, 2).

В сложившихся рыночных условиях управления коэффициент сдвоенных операций по большинству промышленных предприятий не превышает 20%, хотя может при эффективной работе достигать 80%, что вызывает многократное увеличение объема местной работы на участках и полигонах. Происходит значительный рост порожнего пробега.

Таким образом, нагрузка на инфраструктуру увеличилась, что, безусловно, не могло не сказаться на пропускных способностях и скоростях доставки грузов и порожних вагонов.

2. Неразвитость инфраструктуры подъездных путей необщего пользования.

По данным Свердловской железной дороги (СвЖД), общая протяженность железнодорожных путей необщего пользования в области составляет 6 734,23 км. Свердловской железной дорогой обслуживаются 1229 промышленных предприятий, имеющих 1 318 железнодорожных путей необщего пользования, примыкающих к 240 станциям, с которыми заключены 1 139 договоров на эксплуатацию железнодорожных путей необщего пользования и договоров на подачу и уборку вагонов [7].

Пути необщего пользования должны обеспечивать маневровую и сортировочную работу в соответствии с объемом перевозок, ритмичную погрузку и выгрузку грузов. В случае если подъездные пути перестают удовлетворять условиям и не осваивают возросших объемов прибывающих на предприятие грузов, не обеспечивают нужный технологический уровень отправки готовой продукции, собственник должен принимать меры для их развития.

Однако предприятия не занимаются развитием подъездных путей необщего пользования. В 2011 г. из 1 224

предприятий, находящихся в зоне обслуживания Свердловской железной дороги, только 14% (170 предприятий) представили 363 мероприятия по развитию промышленного транспорта необщего пользования. Выполнено 305 мероприятий (84% от запланированных). При этом в 2012 г. мероприятия по развитию промышленного транспорта необщего пользования представили 12% предприятий (150 из 1 229) [8].

3. Проблема сверхнормативных простоев вагонов на подъездных путях промышленных предприятий.

Согласно [8], за 2012 г. общее время нахождения вагонов на ответственности организаций на станциях назначения при технологической норме 12 ч составило 57 ч, в том числе на железнодорожных путях необщего пользования — 55,72 ч.

#### 4. Неравномерное прибытие сырья.

Первопричина нарушения равномерного продвижения вагонопотоков состоит в несовершенстве логистической системы планирования перевозок: на промышленных предприятиях происходит выделение служб снабжения и сбыта в обособленные подразделения (самому предприятию остаются функции закупки прочих товаров, производства готовой продукции и сбыта отходов производства). На предприятиях отсутствует единый координирующий орган, управляющий всей цепью поставок сырья и порожнего подвижного состава под погрузку [9].

Ниже приведены фактические данные поставок вагонов с сырьем на подъездные пути (далее — п/п) промышленного предприятия А в течение календарного месяца (рис. 3, 4).

Статистические показатели движения вагонов на п/п промышленного предприятия А в течение календарного месяца показывают скачкообразный вид амплитуды, непериодичность и колебательный характер производственного процесса.

Выделим объемы прибытия на п/п предприятия А только сырья (лом черных металлов) и проанализируем их.

Прибытие сырья на предприятие А за рассматриваемый период осуществлялось без учета перерабатывающей способности п/п самого предприятия и без учета перерабатывающей способности станции. Из-за неравномерного, а в отдельные периоды и сверхнормативного прибытия груженых сырьем вагонов в адрес предприятия А на железнодорожной станции и на подходах к ней неоднократно происходили скопления критического объема вагонов, создающего проблемы в организации пропуска вагонопотока для других получателей дороги на данной железнодорожной станции. В существующих рыночных условиях подобная ситуация стала типичной практически для всех крупных и средних промышленных предприятий сети.

5. Неравномерное прибытие порожнего подвижного состава для осуществления вывоза готовой продукции.

Выделим прибытие только порожнего подвижного состава в адрес другого получателя УрФО — предприятия С (рис. 5).

Прибытие порожнего подвижного состава, следующего в адрес предприятия С, в течение календарного месяца варьировалось от 0 до 90 вагонов в сутки. Порожний под-

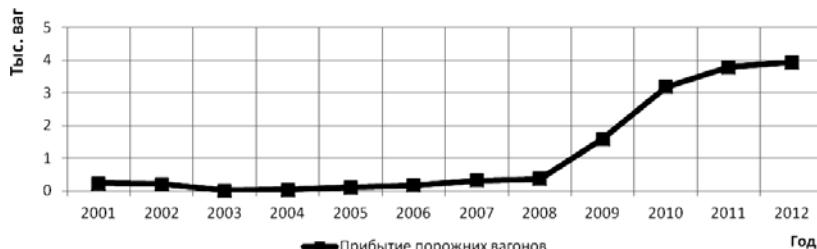


Рисунок 1 — Динамика прибытия порожних вагонов в адрес предприятия А



Рисунок 2 — Динамика прибытия порожних вагонов в адрес предприятия В



Рисунок 3 — График вагонооборота на п/п промышленного предприятия А в течение календарного месяца



Рисунок 4 — График поставок сырья на п/п промышленного предприятия А в течение календарного месяца

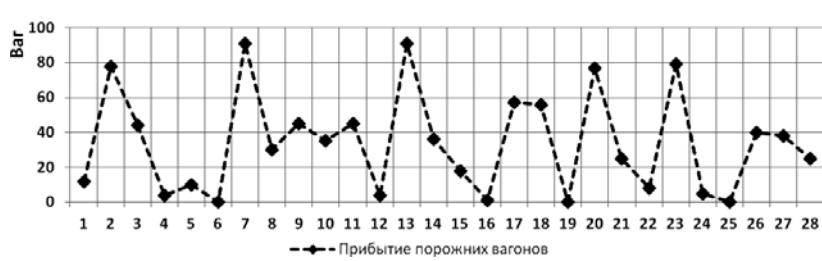


Рисунок 5 — График прибытия порожних вагонов в адрес промышленного предприятия С в течение календарного месяца

вижной состав для осуществления вывоза продукции в адрес предприятия С прибывает с различных станций, число которых в отдельные месяцы превышает 90—100 станций. Удаленность данных станций варьируется от 30 до 2 500 км — спрогнозировать среднесуточное количество прибытия порожнего подвижного состава на станцию назначения с такого обширного полигона практически невозможно, что, в свою очередь, делает невозможным планирование и распределение маневровой работы на станции и участке в целом.

Сегодня очень часто наблюдаются случаи принятых управленческих решений, при реализации которых в этом процессе возникают особенности типа катастроф — когда подача порожних вагонов превышает перерабатывающую способность предприятия и возникают большие простой вагонов либо их подача минимальна в некоторый промежуток времени.

Факторы, проанализированные выше, — это только часть из множества факторов, которые влияют на работу промышленного и магистрального железнодорожного транспорта, осложняют ее и снижают уровень качества транспортного обслуживания предприятий. Данные факторы были выделены и рассмотрены подробнее ввиду того, что в последние несколько лет степень влияния их на возникновение задержек в переработке вагонопотоков на п/п предприятия и увеличения оборота подвижного состава резко возросла.

Перечисленные выше факторы (табл. 1) и аналитически рассмотренные недостатки оказывают непосредственное воздействие на функционирование всей железнодорожной транспортной системы и сдерживают развитие регионального рынка грузовых перевозок, приводят к экономическим и производственным потерям всех участников перевозочного процесса — как грузоотправителей и грузополучателей, так и ОАО «РЖД» и собственников подвижного состава.

### Выводы

Резюмируя высказанные, можно заключить: сегодня в условиях существенных технологических изменений на железнодорожном транспорте именно совместное адресное взаимодействие грузоотправителей и дороги становится одним из эффективнейших инструментов регионального управления подвижным составом.

**Таблица 1 — Сдерживающие факторы развития регионального рынка железнодорожных перевозок**

Уровень	Фактор	Составляющие факторов
Государственный	Финансово-организационный	Отсутствие необходимых условий (недостаточная привлекательность и рискованность) для привлечения частных вложений и инвестиций в развитие железнодорожной отрасли, в том числе в строительство железнодорожных линий, развитие перевозочной, экспедиторско-логистической деятельности и развитие сервисного обслуживания
	Нормативно-правовой	Отсутствие необходимой нормативно-правовой базы, соответствующей современным условиям рынка грузовых перевозок: отсутствие законодательного закрепления деятельности операторов (установление их статуса, прав и обязанностей, возложение на них публичной обязанности представлять вагоны под погрузку, а в особых случаях — для обеспечения срочных воинских и государственных социально значимых железнодорожных перевозок, обязательность членства в саморегулируемых организациях операторов и обязательность страхования гражданской ответственности операторов за причинение вреда)
Общеотраслевой	Технический	Дефицит пропускных и провозных способностей основных грузонапряженных направлений — увеличение протяженности узких мест инфраструктуры; значительные территориальные диспропорции в развитии железнодорожной сети в целом
	Технологический	Бесконтрольный рост приватного вагонного парка в условиях существующей мощности инфраструктуры Рост количества операторов подвижного состава и формирование ими идеологии извлечения максимальной прибыли Непроизводительное использование путей общего пользования вагонами приватного парка в ожидании заадресовки под погрузку  Потеря эффективности управления вагонным парком: высокий коэффициент встречного пробега однородного порожнего подвижного состава; падение процента сдвоенных операций; рост процента порожнего пробега и оборота вагонов
Общеотраслевой	Нормативно-правовой	Отсутствие системы организации взаимодействия ОАО «РЖД» с грузовладельцами и компаниями-операторами Отсутствие системы стимулирования собственников и операторов подвижного состава для максимального увеличения использования вагонов приватного парка под сдвоенные операции Отсутствие законодательного закрепления ответственности за неэффективное занятие инфраструктуры общего пользования операторами подвижного состава и др.
	Организационный	Отсутствие показателей, реально оценивающих эксплуатационные результаты в условиях приватного парка Отсутствие общей технологии управления перевозками, соответствующей современным условиям рынка грузовых перевозок Недостаточная адаптированность действующей системы тарифообразования к текущим рыночным потребностям
Финансовый	Материально-технический	Дефицит тягового подвижного состава Дефицит отдельных типов подвижного состава
	Финансовый	Недостаток собственных средств на инвестиции: нехватка средств на развитие инфраструктуры (под возрастающие объемы перевозок); нехватка средств на покупку локомотивов (под возрастающие объемы перевозок) Недостаточное финансирование обновления и развития основных фондов железнодорожного транспорта
Внутрипроизводственный	Организационно-производственный	Отсутствие мероприятий и планов по развитию транспортного хозяйства Отсутствие единого органа, управляющего всей цепью поставок и координирующего ее Выделение служб снабжения и сбыта в функционально обособленные подразделения или передача данных функций в наемные компании, которые обеспечивают предприятие потребными объемами сырья без учета особенностей работы и технологических возможностей самого предприятия Сверхнормативные простоя вагонов на подъездных путях промышленных предприятий
	Материально-технический	Неразвитость инфраструктуры подъездных путей необщего пользования Низкая перерабатывающая способность грузовых фронтов Низкая наличная пропускная способность линий промышленного железнодорожного транспорта Отсутствие потребного количества погрузочно-разгрузочных механизмов Отсутствие необходимого уровня автоматизации производства
Внутрипроизводственный	Технологический	Несовершенство логистической системы планирования перевозок: некачественное планирование прибытия сырья — без учета перерабатывающей способности фронтов погрузки и перерабатывающей способности путей необщего пользования; отсутствие планирования прибытия порожнего подвижного состава: планирование происходит в зависимости от производственных планов — по потребности предприятия на определенный период (месяц/декаду), без учета удаленности станций, с которых происходит заадресовка порожнего подвижного состава, т. е. без учета срока доставки данных вагонов и без планирования посutoчного прибытия количества порожних вагонов на предприятие

Грузоотправители (промышленные предприятия), со своей стороны, должны включаться в работу железнодорожной отрасли и заниматься вопросами упорядочения логистических схем движения груженых и порожних вагонопотоков, а не переносить полностью данные функции на перевозчика. Особенno важно изменить отношение и подход к планированию прибытия как сырья/груженого подвижного состава, так и порожнего подвижного состава в адрес предприятия; более детально просчитывать возможности промышленного транспорта по переработке вагонооборота, учитывать перерабатывающую способность путей необщего пользования и

фронтов погрузки/выгрузки в соответствии с планированием вагонооборота.

На предприятии транспорт и производство — две неразрывные части, нарушение связи между ними ведет к потерям в обеих частях. Нерациональное использование вагонов в условиях ограниченных возможностей инфраструктуры ведет к значительному осложнению эксплуатационной обстановки, нерациональному использованию технических средств, к задержкам в продвижении грузов, сокращению пропускной способности дороги, снижению участковой скорости, росту сроков доставки груженых и порожних вагонов.

## Литература

1. О Стратегии развития железнодорожного транспорта в Российской Федерации до 2030 года: распоряжение Правительства РФ от 17.06.2008 № 877-р (вместе с Планом мероприятий по реализации в 2008 — 2015 годах Стратегии развития железнодорожного транспорта в Российской Федерации до 2030 года) // Собрание законодательства РФ. 2008. № 29 (ч. II).
2. Устав железнодорожного транспорта Российской Федерации: федеральный закон от 10.01.2003 № 18-ФЗ // Российская газета. 2003. 18 янв.
3. Степанченко С. Прогресс — на первый путь // Российская газета. 2012. 29 ноября.
4. «РЖД» создадут межрегиональные координационные советы по взаимодействию в области перевозок [Электронный ресурс]. URL: <http://www. http://press.rzd.ru> (дата обращения: 02.11.2011).
5. Трофимов С.В., Рахмангулов А.Н., Корнилов С.Н. Методы развития систем промышленного железнодорожного транспорта в изменяющихся условиях деятельности предприятий: монография. Магнитогорск: МГТУ, 2004.
6. Портнова О.Ю. Факторы, сдерживающие взаимодействие промышленных предприятий с железнодорожным транспортом // Транспорт: наука, техника и управление. 2013. № 10. С. 13 — 25.
7. Трона А. Непутевая ситуация // Тематическое приложение к газете «Коммерсантъ». 2012. 25 окт.
8. 11 мая в Екатеринбурге под руководством начальника Свердловской железной дороги Алексея Миронова состоялось заседание регионального координационного совета по обеспечению эффективной организации железнодорожных грузоперевозок [Электронный ресурс]. URL: <http://www. http://press.rzd.ru> (дата обращения: 02.11.2011).
9. Туранов Х.Т., Чуев Н.П., Портнова О.Ю. Математическое моделирование движения грузовых вагонов на подъездных путях предприятия // Наука и техника транспорта. 2013. № 1. С. 26 — 42.

## References

1. O strategii razvitiya zheleznodorozhnogo transporta v Rossiijskoj Federatsii do 2030 goda [On the Strategy of Development of Railway Transport of the Russian Federation up to 2030 "Order NO. 811-r of the Government of the Russian Federation of 17.06.2008 (together with the "Action Plan for implementation in the 2008 - 2015 of the Strategy for the Development of Rail Transport in the Russian Federation up to 2030")] // Collected Legislation of the Russian Federation. July 21, 2008. No. 29 (Part II). - Art. 3537).
2. Ustav zheleznodorozhnogo transporta Rossiijskoj Federatsii [Russian Federation Railway Transport Charter]: Federal Law No. 18-FZ of 10.01.2003 // Rossiyskaya Gazeta. 2003. January 18.
3. Stepanchenko P. Progress – na pervuy put [Progress on the first track] // Rossiyskaya gazeta: Ekonomika URFO. 2012. 29 Nov. No. 5948.
4. "RZD" sozdadut mezhregionalnye koordinatsionnye sovety po vzaimodeystviyu v oblasti perevozok ["Russian Railways" to create inter-regional coordination councils for cooperation in the field of transportation] [Electronic resource]: URL: <http://www. http://press.rzd.ru> (date accessed: 02.11.2011).
5. Trofimov P.V., Rakhamangulov A.N., Kornilov S.N.. Metody razvitiya sistem promyshlennogo zheleznodorozhnogo transporta v izmenyayushchikhsya usloviyah deyatelnosti predpriyatiy [Methods of development of industrial rail transport in a changing environment of activity of businesses] Monograph. Magnitogorsk: MGTU, 2004.
6. Portnova O.Yu. Faktory, sderzhivayushchie vzaimodeystvie promyshlennyh predpriyatiy s zheleznodorozhnym transportom [Factors restraining interaction of industrial enterprises with rail transport] // Transport: nauka, tekhnika i upravlenie. 2013. No. 10. p. 13–25.
7. Tronina A. Neputevaya situatsiya [Useless situation] // Thematic supplement to the newspaper "Kommersant". 2012. 25 October. No. 201 (4983).
8. Proceedings of the meeting of the regional coordinating council for effective organization of rail freight services. [Electronic resource]: URL: <http://www. http://press.rzd.ru> (date accessed: 02.11.2011).
9. Turanov Kh.T., Chuev N.P., Portnova O.Yu. Matematicheskoe modelirovaniye dvizheniya gruzovykh vagonov na podezdnnykh putyakh predpriyatiya [Mathematical modeling of freight traffic on access way of an enterprise] // Nauka i tekhnika transporta. 2013. No. 1. p. 26–42.

УДК 656.025

Дмитрий Вадимович Бондарчук, аспирант кафедры «Высшая и прикладная математика» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС),  
 Галина Адольфовна Тимофеева, доктор физико-математических наук, профессор, заведующая кафедрой «Высшая и прикладная математика» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС)

## МЕТОДЫ МОНИТОРИНГА ПАССАЖИРОПОТОКОВ

Dmitriy V. Bondarchuk, postgraduate student of the Chair "Higher and Applied Mathematics", USURT.  
 Galina A. Timofeeva, DSc in Physics and Mathematics, Professor, Head of the Chair "Higher and Applied Mathematics", USURT

## Passenger Traffic Monitoring Methods

### Аннотация

Повышение качества пассажирских перевозок — одна из важнейших задач любого транспортного предприятия. В данном исследовании, во-первых, был предложен метод для анализа пассажиропотоков, во-вторых, разработаны алгоритм и необходимое программное обеспечение. Исследование показало, что применение указанного метода для анализа пассажиропотоков эффективно. Результаты исследования расширяют знания о методах анализа пассажиропотоков и могут быть использованы для формирования количества транспортных средств для освоения заданного маршрута (направления).

**Ключевые слова:** мониторинг пассажиропотоков, матрица корреспонденций, диаграмма загруженности маршрута.

### Abstract

Improving the quality of passenger services is one of the most important tasks of any transportation company. In this study, firstly, a method was proposed for analyzing passenger traffic; secondly, algorithm and the required software were developed. The study showed that this method can be efficiently used for the analysis of passenger traffic. Results of the study extend the knowledge about the methods of passenger traffic analysis and can be used to form a number of vehicles for the development of a given route (direction).

**Keywords:** passenger traffic monitoring, matrix of correspondence, route utilization chart.

### Введение

Повышение эффективности пассажирских перевозок — одна из важнейших задач любого транспортного предприятия. На территории Свердловской области пассажирские перевозки главным образом осуществляются железнодорожным транспортом и пассажирскими автобусами. Функции по организации и регулированию маршрутной сети возлагаются на органы исполнительной власти.

Анализ организации маршрутной сети пригородных и междугородных пассажирских автобусов Свердловской области показывает, что важными проблемами являются:

- низкая наполняемость и малая экономическая эффективность сети вследствие перераспределения пассажиропотоков между частными предприятиями-перевозчиками [1];
- несбалансированное использование и развитие различных видов транспорта (автобусного, железнодорожного) из-за отсутствия обратной связи между организаторами транспортного процесса (органы исполнительной власти) и процессами перевозки [2];
- сложность оптимизации вследствие недостаточного качества планирования, трудности выполнения прогноза пассажиропотоков, слабого изучения спроса пассажиров на услуги компаний-перевозчиков.

Повышение эффективности работы междугородного и пригородного пассажирского автомобильного транспорта требует системного подхода к организации маршрутной сети и должно опираться на современные методы учета и прогнозирования пассажиропотоков.

При использовании современных информационных технологий в транспортной индустрии руководители транспорта и административные органы получают достаточно оперативные и объективные данные о работе рассматриваемой транспортной сети, а также возможности оперативно контролировать и прогнозировать работу отдельной транспортной подсистемы. Автоматизация транспортных систем на данный момент в большей степени направлена на улучшение учета проданных билетов, в то время как анализу эффективности использования пассажирского транспорта, оптимизации маршрутной сети и расписания, учету взаимо-

мосвязей между различными видами транспорта уделяется существенно меньше внимания.

В современных условиях возникает необходимость в создании единой методики учета статистических характеристик пассажиропотоков независимо от их ведомственной принадлежности. Разработка соответствующего программного обеспечения даст возможность прогнозировать пассажиропотоки и выбирать оптимальные варианты организации маршрутной сети. В статье предлагается описание программного продукта, осуществляющего первичный анализ, статистическую обработку и прогнозирование пассажиропотоков.

## 1. Анализ и обработка данных

Для анализа пассажиропотока используются следующие данные (показатели):

- количество перевезенных пассажиров (число пассажиров, приобретших билеты на подлежащее учету маршрутное транспортное средство);
- объем посадки (высадки) на промежуточной остановке (количество пассажиров, приобретших билеты на подлежащее учету маршрутное транспортное средство до определенной станции);
- вместимость подлежащего учету маршрутного транспортного средства;
- корреспонденции пассажиропотоков (реальное число пассажиров, зафиксированное камерой видеонаблюдения, установленной в подлежащем учету маршрутном транспортном средстве, на определенной станции);
- расписание движения;
- маршрутное расписание (упорядоченный список остановочных пунктов, проезжаемых маршрутным транспортным средством с обязательным указанием времени остановки).

Для выполнения расчетов статистических характеристик пассажиропотоков, необходимых для вычислений, связанных с оптимизацией маршрутной сети, требуется создание общей базы данных. В базе данных целесообразно хранить характеристики рассматриваемых пассажиропотоков, получаемых с помощью различных способов мониторинга:

- автоматизированного способа (использование камер видеонаблюдения в салонах транспортных средств и иных подобных устройств) [3];
- натурных обследований (использование работников, производящих подсчет пассажиров в транспортных средствах);
- отчетно-статистического метода (использование данных, предоставляемых транспортными предприятиями, полученных на основе проданных билетов).

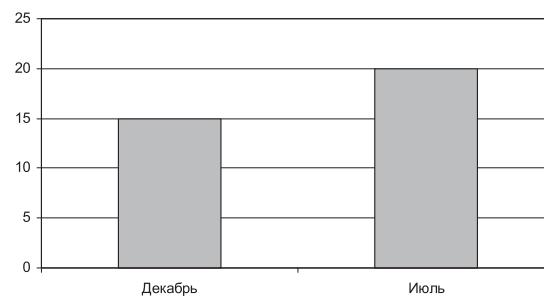
**Таблица 1 — Данные, получаемые на основании количества проданных билетов**

	Екатеринбург	Серов	Краснотурьинск	Карпинск	Североуральск
Екатеринбург	0	4	2	2	1
Серов	0	9	1	3	2
Краснотурьинск	0	0	0	1	2
Карпинск	0	0	0	0	1
Североуральск	0	0	0	0	0

При этом следует упомянуть, что данные, предоставленные камерами видеонаблюдения, и данные, получаемые на основании количества билетов, хотя и несут схожую информацию, значительно отличаются по своей структуре. Возможная структура данных по количеству билетов и с камер видеонаблюдения представлена в табл. 1 и 2 соответственно. Технология распознавания образов с камер видеонаблюдения, которое проводится с помощью специализированного программного обеспечения, использующего методы теории распознавания образов, является важной частью системы сбора информации о пассажиропотоках и рассмотрена в статье [3].

Данные с камер видеонаблюдения изначально имеют несколько иной вид, чем тот, который указан в табл. 2. В своем исходном виде они представляют собой пары вида «дата, время съемки — количество пассажиров», показывающие реальное число пассажиров, проезжающее в салоне подлежащего учету маршрутного транспортного средства в определенный промежуток времени. Зная маршрутное расписание, дату и время съемки, с помощью специально разработанного программного обеспечения можно в автоматизированном режиме выявить проезжаемые остановочные пункты, тем самым приведя данные к виду, указанному в табл. 2.

Необходимо учитывать, что на объем пассажиропотока существенным образом влияют время суток, день недели и сезон. Так, например, для Екатеринбурга, как, впрочем, и для любого другого крупного города, характерно по будним дням в утренние часы значительное увеличение количества пассажиров, въезжающих в город из пригородов, в вечерние же часы наблюдается обратная ситуация. Также характерным является увеличение пассажиропотока в летние месяцы по выходным и предвыходным дням, поскольку большое количество людей стремится выехать за город. Эти факты можно отследить на основании статистических данных о пассажиропотоке, например, по маршруту Екатеринбург — Двуреченск.



**Рисунок 1 — Средний пассажиропоток по месяцам**

**Таблица 2 — Данные, получаемые с камер видеонаблюдения**

Екатеринбург	2
Серов	4
Краснотурьинск	1
Карпинск	2
Североуральск	4

На рис. 1 изображена сравнительная диаграмма среднего пассажиропотока по маршруту Екатеринбург — Двуреченск в зимний и летний месяцы.

Для учета всех вышеперечисленных факторов необходимо иметь возможность ручного варьирования набора данных в разрабатываемом программном обеспечении, на основании которого осуществляется планирование. На рис. 2 изображена упрощенная схема разрабатываемого программного обеспечения.

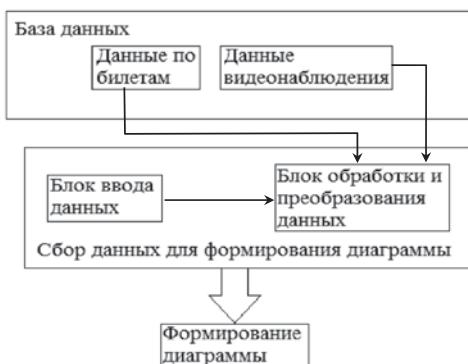


Рисунок 2 — Инфраструктура программного обеспечения

## 2. Формирование диаграммы загруженности маршрута

После того как вся информация обработана и сохранена в базе данных, можно приступить к формированию диаграммы загруженности маршрута. При этом необходимо привести данные видеонаблюдения и данные по билетам к общему виду. Данные видеонаблюдения в обычном виде представляют собой корреспонденции, которые не требуют предварительной обработки и сразу пригодны для формирования диаграммы. Данные по билетам необходимо привести к такому же виду (количество пассажиров, проезжающих между остановочными пунктами). Например, чтобы из табл. 1 определить количество пассажиров, проезжающих между Екатеринбургом и Серовом, необходимо просуммировать все значения первой строки.

Диаграмма загруженности маршрута представляет собой гистограмму. На ее горизонтальной оси изображаются остановочные пункты, а по вертикали над каждым участком маршрута между остановочными пунктами указывается количество человек, которое необходимо перевезти на этом промежутке для удовлетворения требуемого объема перевозок на данном маршруте.

На рис. 3 показан возможный вид диаграммы среднесуточной загруженности автобусного маршрута 818 Екатеринбург — Североуральск по понедельникам.

Требуемый объем перевозок по некоторому маршруту определяется следующей формулой:

$$V_{\text{общ}} = k \cdot V_{\text{бил}},$$

где  $V_{\text{общ}}$  — общий пассажиропоток по заданному маршруту;  $V_{\text{бил}}$  — пассажиропоток на основании данных по билетам;  $k$  — корректирующий коэффициент, рассчитываемый на

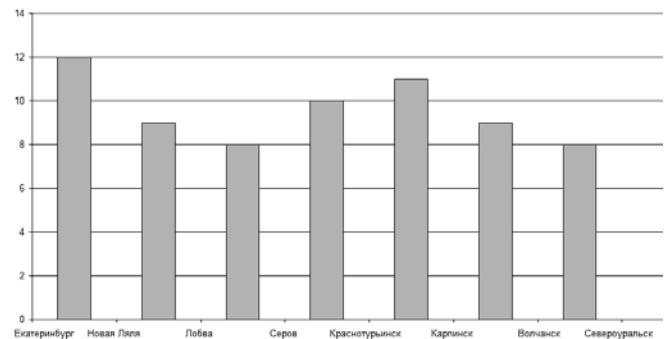


Рисунок 3 — Диаграмма загруженности маршрута

основе данных по билетам и данных видеонаблюдения. Методика расчета данного коэффициента требует отдельного исследования и основана на использовании статистических закономерностей. Расчет общего пассажиропотока, полученного с помощью различных методов мониторинга, описан в [4].

Диаграмма загруженности маршрута является частным случаем диаграммы загруженности по направлению, в которую может укладываться несколько маршрутов. Возможный вид диаграммы средней загруженности по направлению приведен на рис. 4. В данном случае различными цветами выделены среднесуточные пассажиропотоки различных маршрутов.

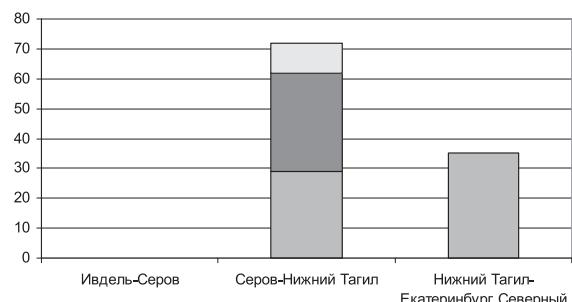


Рисунок 4 — Возможный вид диаграммы загруженности по направлению

Вышеуказанные виды диаграмм отличаются только набором входных данных, а именно количеством выбранных рассматриваемых маршрутов.

После того как диаграмма сформирована, можно приступить к выработке рекомендаций по освоению востребованного пассажиропотока. Назначение транспортных средств на маршрут осуществляется последовательно:

- по величине суммарного пассажиропотока на участке между остановочными пунктами определяется количество условных транспортных средств из условия освоения всего пассажиропотока на данном участке и уровня средней наполняемости на направлении;
- по количеству условных транспортных средств на маршруте определяются транспортные средства, обес-

печивающие наибольшую вместимость. Причем назначение такого транспортного средства происходит только в случае его рациональной загрузки, в противном случае это будет невыгодно для компании-перевозчика;

- затем по количеству оставшихся условных транспортных средств назначаются автобусы средней вместимости;
- остатки пассажиропотока осваиваются последовательно транспортными средствами малой вместимости.

Оптимальное количество транспортных средств каждого вида может быть найдено по алгоритмам, указанным в [1].

## Выводы

В статье рассмотрены проблемы разработки программного обеспечения мониторинга пассажиропотоков, такие как создание инфраструктуры программного обеспечения для осуществления исследований; исследование пассажиропотока на основе использования различных способов мониторинга.

По результатам исследований, рассмотренных в статье, было разработано программное обеспечение, позволяющее повысить эффективность сбора информации о пассажиропотоках. Более полная информация об интенсивности потоков дает основу для улучшения планирования пригородных и междугородних пассажирских перевозок и оптимизации пригородной и междугородной автобусной сети.

## Литература

1. Васильев А.Г., Ковалев Р.Н *Методика расчета количества автобусов для обеспечения потребностей перевозки пассажиров междугородных рейсов* // *Транспорт Урала*. 2011. № 1 (28). С. 19—24.
3. Брусянин Д.А., Вихарев С.В., Шека А.С. *Интеллектуальная система анализа пассажиропотоков с использованием технического зрения* // *Транспорт Урала*. 2012. № 2 (33). С. 86—89.
2. Брусянин Д.А., Казаков А.Л., Маслов А.М. *Оптимизация региональной маршрутной сети пригородных и междугородних пассажирских перевозок с использованием логистических принципов* // *Транспорт Урала*. 2012. № 1 (32). С. 106—109.
4. Брусянин Д.А., Казаков А.Л. *Определение интегрального пассажиропотока на территории региона* // *Транспорт Урала*. 2012. № 2 (33). С. 90—93.

## References

1. Vasiliev A.G., Kovalev R.N *Metodika rascheta kolichestva avtobusov dlya obespecheniya potrebnostey perevozki passazirov mezhdugorodnykh reysov* [Method of calculation of the number of buses to meet the needs of intercity passenger transportation] // *Transport of the Urals*. 2011. No. 1(28). p.19 - 24.
2. Brusyanin D.A., Vikharev S.V., Sheka A.S. *Intellektualnaya sistema analiza passazhiropotokov s ispolzovaniem tekhnicheskogo zreniya* [Smart passenger traffic analysis system with the use of engineering vision] // *Transport of the Urals*. 2012. No. 2 (33). p. 86 - 89.
3. Brusyanin D.A., Kazakov A.L., Maslov A.M. *Optimizatsiya regionalnoy marshrutnoy seti prigorodnykh i mezhdugorodnikh passazhirskikh perevozok s ispolzovaniem logisticheskikh printsipov* // [Optimization of regional route network of suburban and intercity passenger services using logistics principles] *Transport of the Urals*. 2012. No. 1 (32). p.106 – 109.
4. Brusyanin D.A., Kazakov A.L. *Opredelenie integralnogo passazhiropotoka na territorii regiona* [Determining integral passenger traffic in the region] // *Transport of the Urals*. 2012. No. 2(33). p. 90 - 93.

УДК 656.224

Ксения Евгеньевна Герасимчук, старший преподаватель кафедры «Станции, узлы и грузовая работа» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС)

## ВЛИЯНИЕ УРОВНЯ НАСЕЛЕННОСТИ ЭЛЕКТРОПОЕЗДА НА РАЗМЕРЫ И ГРАФИК ДВИЖЕНИЯ ПОЕЗДОВ

Ksenia E. Gerasimchuk, Senior Lecturer of the Chair "Stations, Junctions and Freight Work", Ural State University of Railway Transport (USURT)

### Effect Of Train Occupancy Levels On Train Set And Schedule

#### Аннотация

Дан анализ населенности пригородных электропоездов на основе отчета о НИР по обследованию пассажиропотока и формированию маршрутной сети пригородного транспорта с применением методов логистики. После определения «неэффективных» электропоездов с критическим уровнем населенности предложены рекомендации по оптимизации графика движения на исследуемом участке за счет уменьшения составности электропоездов и изменения маршрута движения.

Анализ проведен по существующей классификации уровня населенности электропоезда и представлен в виде диаграмм населенности по отдельным электропоездам с разбивкой по видам дней недели (рабочий, предвыходной, выходной). На основе проведенного анализа сделаны выводы об уровне комфорта перевозки пригородных пассажиров.

**Ключевые слова:** населенность электропоезда, график движения, пригородное сообщение, размеры движения, уровень комфорта.

#### Abstract

The analysis of occupancy of suburban electric trains on the basis of research report on passenger traffic survey and formation of commuter transport route network with the use of logistics methods is offered. After determining the «inefficient» trains with critical occupancy level, recommendations are given to optimize train schedule on the section under review by reducing train set and rerouting traffic.

The analysis is performed on the existing classification of train occupancy level and represented as occupancy graphs for individual electric trains with breakdown by type of days of the week (working days, pre-weekend, weekend/holiday). Based on the analysis, conclusions are made on the level of comfort of commuter transportation.

**Keywords:** electric train occupancy; train schedule; commuter traffic; traffic dimensions, level of comfort.

**К**омфорт поездки — основной параметр качества транспортной услуги. Для пригородного пассажира этот параметр наиболее значим, так как поездки по различным целям (рабочим, учебным, культурным, бытовым) совершаются жителями пригорода ежедневно. Со стороны перевозчика излишний комфорт, предоставляемый пассажирам в пути следования, увеличивает затраты на организацию пригородных перевозок. Оптимальным считается вариант с приемлемыми для пассажиров условиями перевозки (уровнем комфорта) и относительно минимальными совокупными издержками на перевозку пригородного пассажиропотока для перевозчика [1, 2].

Для выявления объема пассажиропотока на участке и соответственно уровня комфорта для пассажира в отдельно взятом электропоезде необходимо регулярно проводить обследования пригородных пассажиропотоков. В России разработано несколько способов обследования пассажиропотоков (талонный, приближенный, непосредственный, или натурный, с использованием отчетных материалов). Рассмотрим результаты одного из таких обследований, проведенного натурным способом в 2012 г. в Свердловской области (в направлении Екатеринбург — Нижний Тагил — Екатеринбург).

В данном обследовании подсчет пригородных пассажиров производился непосредственно счетчиками в вагонах электропоездов и на платформах. Параллельно с натурным обследованием был проведен социологический опрос пассажиров. Результаты обработки анкет счетчиков в поездах были сведены в таблицы. В этих таблицах содержатся данные о количестве вошедших и вышедших пассажиров по каждой станции пригородного участка по каждому поезду. На основании исходных данных для каждого дня рассчитывается густота пассажиропотока по каждому перегону пригородного участка [3]. Густота пригородного пассажиропотока по перегонам между пригородными остановочными пунктами для отдельно взятого электропоезда и есть населенность этого электропоезда по длине участка

$$\Gamma_i = \sum_{i=1}^n A_i^{\text{вх}} - \sum_{i=1}^n A_i^{\text{вых}} = a_i \text{ пасс./поезд},$$

где  $i$  — порядковый номер остановочного пункта (станции) посадки и высадки пригородного пассажира, а также поряд-

ковый номер перегона, следующего за этим пунктом в сторону движения пассажиропотока,  $i = 1 \dots n$ ;

$A_i^{\text{вх}}$  — количество вошедших пассажиров в поезд по  $i$ -й станции посадки, пасс.;

$A_i^{\text{вых}}$  — количество вышедших пассажиров из поезда по  $i$ -й станции высадки, пасс.

Для анализа населения и уровня комфорта в электропоезде разные авторы предлагают неоднозначные системы оценок. Воспользуемся условной системой оценок С.М. Резера, позволяющей подразделить населенность электропоездов на высокую, допустимую, умеренную и критическую.

Под высокой будем понимать населенность, при которой количество находящихся в вагоне пассажиров превышает величину, установленную нормативами для перевозки пассажиров в пригородном сообщении (табл. 1). В соответствии с этими нормами в электропоездах должен быть исключен проезд стоящих пассажиров, за исключением головного участка пригородной зоны, в пределах которого продолжительность поездки не превышает 30 мин (20—30 км). На данном участке допускается проезд пассажиров стоя, если при этом населенность увеличивается не более чем в 1,5 раза по отношению к суммарному числу мест для сидения [1].

Под допустимой будем понимать населенность, которая близка к высокой (9/10 сидячих мест занято).

Под нормальной понимается населенность, при которой абсолютное большинство сидячих мест занято, но практически всегда остаются свободные места, т. е. нормальная населенность не может трансформироваться в высокую. В качестве нижней границы для нормальной населенности следует принимать величину, равную 2/3 всех сидячих мест в вагоне электропоезда.

Умеренной следует считать населенность в пределах от 2/3 до 1/6 количества сидячих мест в вагоне.

Критической (предельно низкой) следует считать населенность, при которой в среднем в каждом вагоне находится менее 16 человек, а в 10-вагонном электропоезде менее 172 пассажиров [1].

Таблица 1 — Оценка населения электропоездов

Населенность электропоезда	Количество пассажиров, находящихся в 6-вагонном электропоезде		Количество пассажиров, находящихся в 8-вагонном электропоезде	
	В пределах участка 20—30 км	В пределах участка 150—170 км	В пределах участка 20—30 км	В пределах участка 150—170 км
			В пределах участка 20—30 км	В пределах участка 150—170 км
Высокая	933 и более	Более 622	1244 и более	Более 830
Допустимая	622—932	622	830—1243	830
Нормальная	415—621	415—621	553—829	553—829
Умеренная	104—414	104—414	138—552	138—552
Критическая	103 и менее	103 и менее	137 и менее	137 и менее

Проанализировав анкеты, заполненные счетчиками в процессе обследования, получаем диаграммы (рис. 1—3).

Из диаграмм рис. 1—3 видно, что на рассматриваемом участке есть электропоезда с допустимым, нормальным, умеренным и критическим уровнем населения. По длине участка различный уровень населения объясняется показателем средней дальности поездки (на исследуемом участке

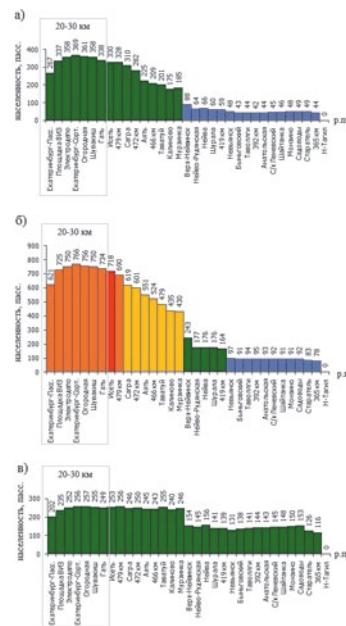


Рисунок 1 — Диаграмма населения электропоезда № 6457 на участке Екатеринбург-Пассажирский — Нижний Тагил (обследование в сентябре 2012 г.):  
а — рабочий день; б — предвыходной день;  
в — выходной день

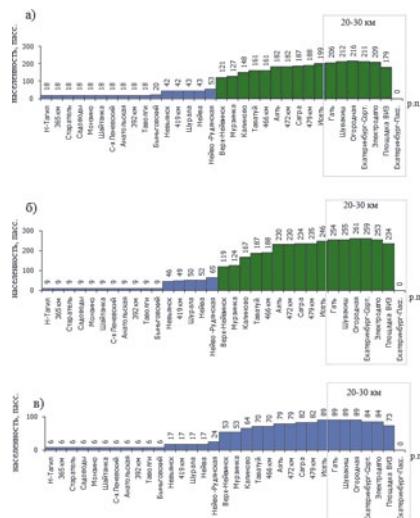
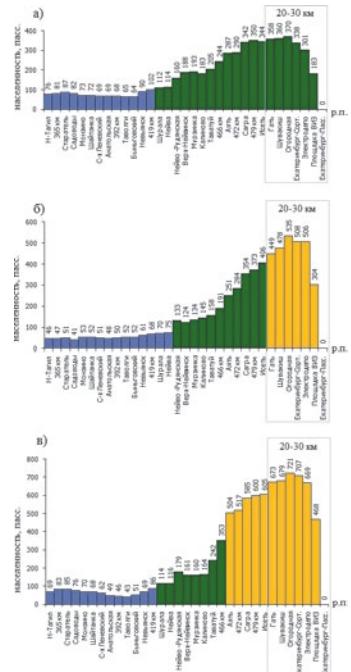


Рисунок 2 — Диаграмма населения электропоезда № 6450 на участке Нижний Тагил — Екатеринбург-Пассажирский (обследование в сентябре 2012 г.):  
а — рабочий день; б — предвыходной день;  
в — выходной день

#### Условные обозначения:

- высокая населенность
- допустимая населенность
- нормальная населенность
- умеренная населенность
- критическая населенность



**Рисунок 3 — Диаграмма населения электропоезда № 6460 на участке Нижний Тагил — Екатеринбург-Пассажирский (обследование в сентябре 2012 г.):**  
а — рабочий день; б — предвыходной день;  
в — выходной день

составляет 78 км). Также на уровень населенности электропоездов оказывает влияние внутринедельная и внутрисуточная неравномерность пассажиропотока. Например, электропоезд № 6457 в рабочий и выходной день на головном участке пригородной зоны имеет умеренный уровень населенности, в предвыходной день — допустимый, а за границей головного участка — высокий уровень.

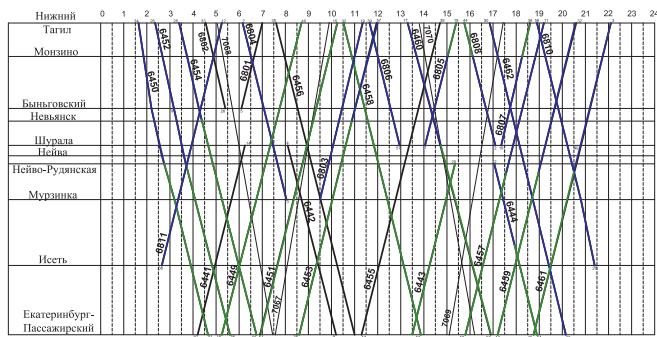
Анализ населения электропоездов позволяет регулировать уровень комфорта при использовании пассажирами пригородного железнодорожного транспорта. При высокой населенности резко ухудшаются условия комфортности проезда в электропоездах, усложняется, а в ряде случаев становится невозможной реализация и проверка проездных документов, снижается привлекательность поездки на железнодорожном транспорте. Поэтому при высокой населенности следует принимать меры к ее снижению путем назначения дополнительных электропоездов, увеличения составности, изменения очередности отправления поездов, изменения режима остановок.

При допустимой населенности меры по ее снижению при наличии факторов, ограничивающих технологические возможности, можно не принимать. Но следует иметь в виду, что среднемесячное предельное значение допустимой населенности может в отдельные дни, а тем более в летний период трансформироваться в высокую населенность [1].

При умеренной населенности рекомендуются меры по ее форсированию, например, за счет отмены других, менее населенных поездов, следующих вместе с рассматриваемым, или уменьшения количества вагонов в составе электропоезда.

При критической населенности эксплуатация электропоездов нецелесообразна, и такие электропоезда должны быть отменены, за исключением случаев, когда это невозможно по ряду социальных и (или) технологических причин. Например, если электропоезд является последним в течение суток или следует засылом в пригородную зону к началу утреннего часа пик.

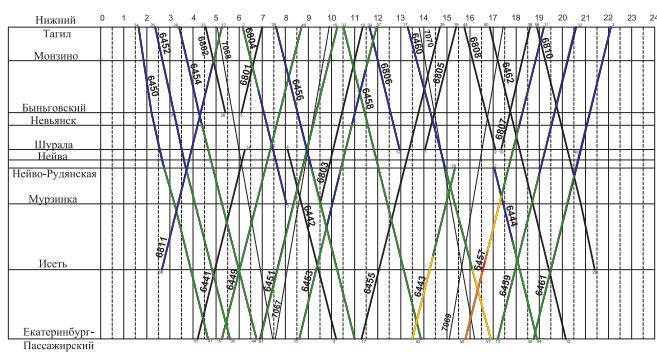
Анализ населения электропоездов проведен по всем типам дней [2]. Для наглядности приведены графики обращения пригородных электропоездов на выбранном участке с разметкой по уровням населения поезда (рис. 4 – 6).



## Примеч

- 1) Поезда № 6441, 6442 курсируют до 27.10 включительно в летний период по выходным и праздничным дням  
2) Поезда № 6801, 6802 курсируют до 27.10 включительно в летний период ежедневно – в период обследования отменены телеграммы  
3) Поезда № 6455, 6466 в рабочий день не обследовались  
4) Поезда № 7067, 7068, 7069, 7070 не входили в график летнего обследования

*Рисунок 4 — График движения электропоездов на участке в рабочие дни*



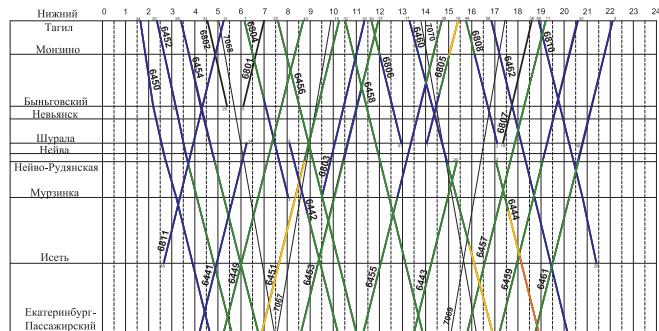
### Примеч

- 1) Поезд № 6441, 6442 курсируют до 27.10 включительно в летний период по выходным и праздничным дням  
2) Поезд № 6801, 6802 курсируют до 27.10 включительно в летний период ежедневно – в период обследования отменены телеграммы  
3) Поезд № 6455, 6803, 6805, 6807, 6808 6810, 6462 в предвыходной день не обследовались  
4) Поезд № 7067, 7068, 7069, 7070 не входили в график летнего обследования

*Рисунок 5 — График движения электропоездов на участке в предвыходные дни*

На исследуемом направлении выявлены в рабочий день три пары электропоездов с преобладающим критическим уровнем населения. Показатели электропоездов с преобладающим критическим уровнем населения влияют на среднюю себестоимость перевозок пригородных пассажиров на направлении в целом. Однако отменять все «критические» электропоезда нельзя по ряду социальных и технологических причин.

Например, электропоезда № 6810/6811 используются для подвоза рабочих к началу смены из пригорода в Нижний Та-



## Примечания

- 1) Поезда № 6441, 6442 курсируют до 27.10 включительно в летний период по выходным и праздничным дням
- 2) Поезд № 6801, 6802 курсирует до 27.10 включительно в летний период ежедневно – в период обследования отменены телеграммы
- 3) Поезд № 6807 в выходной день не обследовался
- 4) Поезда № 7067, 7068, 7069, 7070 не входили в график летнего обследования

**Рисунок 6 — График движения электропоездов на участке в выходные дни**

гил. Электропоездом № 6811 пользуются учащиеся (социальный фактор) [3]. Сокращение расходов при использовании этой пары электропоездов возможно за счет сокращения плача обращения (Мурзинка—Нижний Тагил—Мурзинка) или за счет уменьшения составности — вместо шестивагонного электропоезда целесообразнее использовать рельсовый автобус (двухвагонный РА2). Рассмотрев график увязки электропоездов на участке, можно сделать вывод, что уменьшение составности электропоезда за счет замены на другой тип подвижного состава гораздо выгоднее на перспективу, так как в графике увязки участвуют также электропоезда с преобладающим критическим уровнем населения (6807, 6808).

На рассматриваемых графиках присутствуют электропоезда с непостоянным внутри недели уровнем населения, например электропоезд № 6450 (см. рис. 2). Наилучшей мерой по эффективности использования этого электропоезда была бы его отмена в выходные дни, но завязка с поездами других участков не позволяет осуществить это мероприятие (технологическая причина). Поэтому рекомендуется применить со-

кращение плача обращения с оборотом по станции Невьянск (№ 6461 Екатеринбург-Пассажирский — Невьянск, № 6450 Невьянск — Екатеринбург-Пассажирский), что позволит повысить общие показатели на участке в целом [2].

Рассмотрим влияние внутринедельной неравномерности на населенность электропоездов с умеренным и нормальным уровнем на примере электропоезда № 6457. Как видно из рис. 1, электропоезд с преобладающей умеренной населенностью в предвыходной день имеет всплеск до высокого уровня. В первую очередь это отражается на уровне комфорта проезда пассажиров и, как следствие, на уровне конкурентоспособности железнодорожного транспорта на рынке пригородных перевозок. При появлении других вариантов пассажир в большинстве случаев выберет более комфортную поездку [4]. Поэтому основным мероприятием в данном случае является присека дополнительных вагонов в предвыходные дни, особенно в летний период.

В целом из анализа представленных диаграмм и графиков можно сделать некоторые выводы.

В первую очередь необходимо принять меры для электропоездов со всплесками населения до допустимого и высокого уровней по отдельным дням недели для повышения привлекательности для пассажира железнодорожного пригородного транспорта.

Далее необходимо обратить внимание на электропоезда с преобладающим критическим уровнем населения и принять меры исходя из социальных и технологических ограничений.

Электропоезда с преобладающим умеренным и нормальным уровнем населения признать эталонными при разработке графика движения на следующие периоды.

Необходимо рассмотреть создание системы, основу которой составляет электропоезд в сочетании с автотранспортом. При этом обслуживание пригородных пассажиропотоков начинается и (или) заканчивается автотранспортом на зонах технических станций для обеспечения возможности оборота электропоездов.

## Литература

1. Резер С.М. Логистика пассажирских перевозок на железнодорожном транспорте. М.: ВИНИТИ РАН, 2007. 516 с.
2. Исследование пассажиропотока на регулярном пассажирском пригородном железнодорожном транспорте: отчет о НИР (заключительный). Шифр СУГР-1. Руководитель: Плахотич С.А. Екатеринбург: УрГУПС, 2012.
3. Плахотич С.А., Чемоданова К.Е. Социально-экономические критерии выбора транспортных средств для обслуживания пассажиров в городском железнодорожном сообщении // Транспорт Урала. 2008. № 2 (17). С. 52—56.
4. Плахотич С.А., Чемоданова К.Е. Перспективы беспересадочного пригородно-городского сообщения в промышленно-городской агломерации // Транспорт Урала. 2010. № 2 (25). С. 17—20.

## References

1. Rezer S.M.. Logistika passazhirskikh perevozok na zheleznodorozhnom transporte. [Passenger rail transportation logistics] M.: VINITI RAS, 2007. 516 p..
2. Issledovanie passazhiropotoka na reguljarnom passazhirskom prigorodnom zheleznodorozhnem transporte [Study of passenger traffic in regular passenger commuter trains.] Research report (final). Code SUGR-1. Research director: Plakhotich S.A. Ekaterinburg: USURT, 2012.
3. Plakhotich S.A., Chemodanova K.E. Sotsialno-ekonomicheskie kriterii vybora transportnykh sredstv dlya obsluzhivaniya passazhirov v gorodskom zheleznodorozhnem soobshchenii [Socio-economic criteria for selecting vehicles for passenger service in the urban rail transport] // Transport of the Urals. 2008. No. 2(17). p. 52—56.
4. Plakhotich S.A., Chemodanova K.E. Perspektivy besperesadchno-prigorodno-gorodskogo soobscheniya v promyshlenno-gorodskoy aglomeratsii [Prospects of direct commuter transportation in industrialized urban agglomeration] // Transport of the Urals. 2010. No. 2(25). p. 17—20.

УДК 629.4.027.4

Дмитрий Александрович Потахов, аспирант кафедры «Технология металлов», ассистент кафедры «Автоматизированное проектирование» Петербургского государственного университета путей сообщения (ПГУПС)

## МЕТОД ЛИНЕЙНОГО ПРОГРАММИРОВАНИЯ ПРИ РАСЧЕТЕ РЕЖИМОВ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ПРОФИЛЯ ПОВЕРХНОСТИ КАТАНИЯ КОЛЕСНЫХ ПАР

Dmitriy A. Potakhov, postgraduate student of the Chair "Metal Technology", Assistant Professor of "Computer-Aided Design" Chair of St. Petersburg State University of Railways (FGBOU VPO PGUPS)

### Linear Programming Method For Calculation Of Wheelset Tread Surface Profile Recovery

#### Аннотация

Рассмотрена методика расчета режимов процесса обточки железнодорожных колесных пар различной твердости на основе метода линейного программирования и даны рекомендации по выбору рациональных режимов восстановления. Приведены уравнения и неравенства, отражающие взаимосвязь между основными техническими ограничениями процесса восстановления колеса. В результате получена система, описывающая оптимизацию режима восстановления профиля поверхности катания колеса на станке КЗТС 1836 и обеспечивающая наименьшее машинное время обработки при различных значениях твердости и глубины резания.

**Ключевые слова:** колесная пара, режущий инструмент, твердый сплав, восстановление поверхности катания, линейное программирование.

#### Abstract

The article describes calculation method for machining of rail wheel sets with different hardness, based on linear programming method, and provides recommendations on the selection of rational recovery modes. The equations and inequalities reflecting the relationship between the main technical limitations of the wheel recovery process are specified. The result is a system that describes optimization of recovery modes of wheel tread surface profile using KZTS 1836 machine and provides the smallest machining time at different hardness and cutting depth values.

**Keywords:** wheelset, cutting tools, carbide, tread surface recovery, linear programming.

#### Введение

Механическая обработка необходима для восстановления профиля поверхности катания изношенных в процессе эксплуатации колесных пар подвижного состава. Эффективность этого процесса во многом зависит от правильно назначенного режима восстановления, т. е. величин глубины, подачи и скорости резания. Эти параметры находятся во взаимной функциональной связи, устанавливаемой различными аналитическими и эмпирическими зависимостями, которые учитывают их влияние на силы резания, период стойкости (время работы) инструмента и качество обработанной поверхности. При этом не все параметры процесса восстановления одинаково влияют на стойкость инструмента и эффективность процесса в целом. При увеличении глубины резания и подачи стойкость инструмента снижается в меньшей мере, чем при увеличении скорости резания, а с точки зрения сокращения машинного времени одинаково выгодно увеличивать любой из элементов [1]. Выбор режима резания можно выполнить методом оптимизации по различным критериям либо на основе общемашиностроительных норм с использованием справочников [2—4] и другой литературы [5].

В настоящей статье рассматривается методика выбора оптимального режима восстановления на основе одного из методов исследования операций [6], а именно метода линейного программирования [7, 8]. Под оптимальным режимом восстановления в дальнейшем будем полагать режим, который обеспечивает наименьшее машинное время на обработку одной колесной пары с требуемыми параметрами качества ее поверхности.

#### 1. Суть метода исследования операций

В исследовании операций нет единого общего метода решения всех математических моделей, которые встречаются на практике. Вместо этого выбор метода решения диктуют тип и сложность изучаемой математической модели. К наиболее известным и эффективным методам исследования операций относятся методы линейного программиро-

вания, когда целевая функция и все ограничения являются линейными функциями. Для решения математических моделей других типов предназначены методы [6]:

- целочисленного программирования (если все переменные должны принимать только целочисленные значения);
- динамического программирования (где исходную задачу можно разбить на меньшие подзадачи);
- нелинейного программирования (когда целевая функция и/или ограничения являются нелинейными функциями).

Перечисленные методы составляют только часть большого количества самых разнообразных доступных методов исследования операций.

Для нахождения оптимального решения при большом числе взаимосвязанных переменных, подчиняющихся определенным ограничивающим условиям, широко используется линейное программирование. Постановку задачи линейного программирования [7, 8] можно сформулировать следующим образом. Имеется некоторая величина, например себестоимость, производительность, капиталоемкость и т. п., являющаяся линейной функцией  $f$  ряда переменных,

$$f = C_1x_1 + \dots + C_nx_n + C_0. \quad (1)$$

Переменные, в свою очередь, должны удовлетворять ограничениям, выраженным в виде системы  $k$  линейных алгебраических уравнений или неравенств с  $n$  переменными  $x_1, x_2, \dots, x_n$  [7]:

$$\left. \begin{array}{l} a_{11}x_1 + \dots + a_{1n}x_n \leq b_1 \\ a_{21}x_1 + \dots + a_{2n}x_n \leq b_2 \\ \dots \dots \dots \\ a_{k1}x_1 + \dots + a_{kn}x_n \leq b_k \end{array} \right\}. \quad (2)$$

Требуется отыскать такие значения переменных, удовлетворяющие системе ограничений (2), при которых величина, являющаяся их линейной функцией (1), принимала бы наименьшее или наибольшее значение. Такое решение будем называть оптимальным решением данной задачи. Таким образом, понятие оптимальности решений определяется с учетом соответствия этого решения множеству ограничений.

## 2. Определение оптимального режима восстановления профиля колеса

Рассмотрим процесс механической обработки при восстановлении профиля поверхности катания железнодорожных колес с использованием режущего инструмента призматической формы из твердого сплава Т14К8 с заданной глубиной резания  $t$  в 5, 9 и 11 мм за один проход. Следовательно, составляемая система алгебраических уравнений или неравенств будет иметь два неизвестных параметра: подачу  $s$  и частоту вращения колесной пары  $n$ . Период стойкости инструмента с учетом экономических факторов и производственного опыта эксплуатации [1] принимаем равным  $T = 30$  мин.

Составляя систему линейных уравнений или неравенств для случая восстановления колеса резанием, в качестве критерия оптимальности принимаем оценочную функцию вида [8]

$$f = \frac{C}{ns},$$

где  $C$  — постоянный коэффициент;  
 $n$  — частота вращения шпинделя;  
 $s$  — подача на оборот.

Наименьшее значение этой функции даст вариант обработки с наименьшим машинным временем. Уравнение, определяющее машинное время восстановления,

$$T_{\text{ маш}} = \frac{L}{ns}, \quad (3)$$

где  $L$  — длина рабочего хода.

Ниже приведены существующие неравенства, отражающие взаимосвязи между основными техническими ограничениями процесса восстановления колеса на станке К3ТС 1836 и элементами режима резания  $n, s$  и  $t$ , на основе которых составляется система линейных неравенств.

1. Режущие возможности инструмента, определяемые кинематикой станка [8],

$$n \cdot s^{y_v} = \frac{C_v K_v \cdot 1000}{T^m \pi D \cdot t^{x_v}}, \quad (4)$$

где  $C_v$  — постоянный коэффициент, учитывающий условия резания;

$K_v$  — общий поправочный коэффициент на скорость резания;

$m$  — показатель степени влияния периода стойкости режущего инструмента на скорость резания;

$x_v$  — показатель степени влияния глубины резания на скорость резания;

$y_v$  — показатель степени влияния подачи на скорость резания;

$D$  — диаметр обрабатываемой поверхности катания.

2. Мощность электродвигателя привода главного движения станка

$$s^{y_p} n^{n_p+1} = \frac{975 \cdot 2 \cdot 1000 \cdot 1000^{n_p} N_{\text{эд}} \eta}{C_p K_p D (\pi D)^{n_p} t^{x_p}}, \quad (5)$$

где  $C_p$  — постоянная для данных условий восстановления;

$K_p$  — общий поправочный коэффициент на силу резания;

$y_p, x_p, n_p$  — показатели степени влияния  $s, t, v$  на силу резания;

$N_{\text{эд}}$  и  $\eta$  — мощность и коэффициент полезного действия электродвигателя станка.

3. Наименьшее возможное число оборотов, допускаемое кинематикой станка или режущими свойствами инструмента,

$$n \geq \max \left( \frac{1000 v_{\min}}{\pi D}; n_{cm, \min} \right). \quad (6)$$

4. Наибольшее возможное число оборотов, допускаемое кинематикой станка или режущими свойствами инструмента,

$$n \leq \min\left(\frac{1000v_{\max}}{\pi D}; n_{cm.\max}\right) \quad (7)$$

где  $n_{cm.\min}$  — минимальная частота вращения шпинделя станка;

$n_{cm.\max}$  — максимальная частота вращения шпинделя станка.

5. Параметры процесса обработки, определяемые требованиями к шероховатости поверхности,

$$s^2 \leq R_z \cdot 8r, \quad (8)$$

где  $r$  — радиус при вершине инструмента;

$R_z$  — шероховатость обработанной поверхности катания колеса.

6. Наименьшая подача, определяемая кинематикой станка,

$$s \geq s_{cm.\min}. \quad (9)$$

7. Наибольшая подача, определяемая кинематикой станка,

$$s \leq s_{cm.\max}, \quad (10)$$

где  $s_{cm.\min}$  — наименьшая подача станка;

$s_{cm.\max}$  — наибольшая подача станка.

Ограничения по жесткости инструмента и колеса не рассматриваем, так как полагаем, что отклонения по этим параметрам незначительны. Для приведения критерия оптимальности (3) и неравенств технических ограничений (4) — (10) к линейным формам необходимо их логарифмировать. При этом приняты следующие обозначения:

$$\ln n = x_1, \ln s = x_2, \ln\left(\frac{C_v K_v 1000}{T'' \pi D \cdot t^{x_v}}\right) = b_1, K_v = k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 \cdot k_4 \cdot k_5 \cdot k_6;$$

$$\ln\left(\frac{975 \cdot 2 \cdot 1000 \cdot 1000^{n_p} N_{\text{ЭД}} \eta}{C_p K_p D (\pi D)^{n_p} t^{x_v}}\right) = b_2, K_p = k_7 \cdot k_8 \cdot k_9 \cdot k_{10} \cdot k_{11};$$

$$\ln\left(\max\left(\frac{1000v_{\min}}{\pi D}; n_{cm.\min}\right)\right) = b_3;$$

$$\ln\left(\min\left(\frac{1000v_{\max}}{\pi D}; n_{cm.\max}\right)\right) = b_4; \ln(R_z \cdot 8r) = b_5;$$

$$\ln(s_{cm.\min}) = b_6, \ln(s_{cm.\max}) = b_7, \ln(f) = f_0, \ln(C) = C_0.$$

Подставляя введенные обозначения в приведенные ранее неравенства технических ограничений и критерия оптимальности, получаем систему, которая является математической моделью оптимального режима восстановления профиля поверхности катания колеса на станке КЗТС 1836,

$$\begin{cases} x_1 + y_v x_2 = b_1 \\ (1+n_p)x_1 + y_p x_2 \leq b_2 \\ x_1 \geq b_3 \\ x_1 \leq b_4 \\ 2x_2 \leq b_5 \\ x_2 \geq b_6 \\ x_2 \geq b_7 \end{cases} \quad (11)$$

$$f_0 = C_0 - x_1 - x_2,$$

где  $x_1, x_2$  — управляемые переменные;

$b_1 \dots b_7$  — правые части (свободные члены) неравенств;

$C_0$  — постоянный коэффициент;

$f_0$  — линейная функция.

Последовательность решения системы (11) следующая.

1. Вычисляются правые части неравенств.

2. Проверяется совместность системы, т. е. согласованность между собой технических ограничений в виде исходных данных на предмет учета реальных возможностей станка или инструмента, особенностей обрабатываемого колеса и т. п.

Система задана свободными членами  $b_1, b_2, b_3, b_4, b_5, b_6, b_7$  и коэффициентами при неизвестных  $x_p, y_p, n_p, x_v, y_v$ . Этой системе в двухмерном пространстве соответствует ряд линий, которые, пересекаясь, образуют выпуклый многоугольник, одна из вершин которого и соответствует оптимальному решению (рис. 1). Находим координаты точек пересечения граничных прямых системы, т. е. выделяем вершины многоугольника. Ими будут точки, удовлетворяющие всем неравенствам системы. Это можно записать в виде

$$\begin{cases} x_1^i + y_v x_2^i = b_1 \\ (1+n_p)x_1^i + y_p x_2^i \leq b_2 \\ x_1^i \geq b_3 \\ x_1^i \leq b_4 \\ 2x_2^i \leq b_5 \\ x_2^i \geq b_6 \\ x_2^i \geq b_7 \end{cases} \quad (12)$$

Если имеется хотя бы одна точка, образующая вершину многоугольника, т. е. удовлетворяющая всем без исключения неравенствам системы (12), то система совместна.

Каждое неравенство делит плоскость  $(x_1, x_2)$  на два полупространства, расположенные по обе стороны прямой, которая, как показано ниже, соответствует определенному неравенству. Точки плоскости, расположенные по одну сторону прямой, удовлетворяют неравенству (допустимое полупространство), а точки, лежащие по другую сторону, — нет. На рис. 1 допустимые полупространства показаны стрелочками.

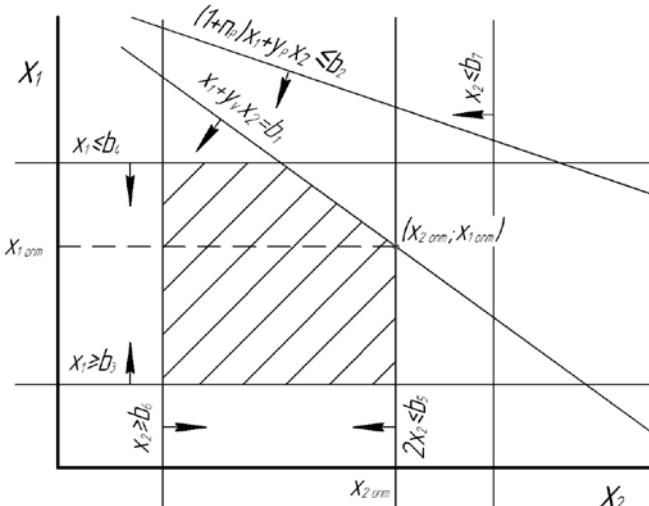


Рисунок 1 — Графическое решение системы (12)

Любая точка, расположенная внутри или на границе заштрихованной области (см. рис. 1), ограниченной ломаной линией, полученной пересечением областей полупространств, является допустимым решением системы (12) с учетом принятых технических ограничений. Горизонтальные линии соответствуют предельным значениям чисел частоты вращения шпинделя станка КЗС 1836. Крайние вертикальные линии соответствуют предельным значениям подач по кинематике станка, а средняя — по требованию шероховатости обработанной поверхности. Первая из оставшихся наклонных линий ограничивает режимы резания по мощности, затрачиваемой на процесс восстановления профиля поверхности катания колеса, другая вводит ограничение по стойкости режущего инструмента.

Для всех точек, не удовлетворяющих системе, принимаем

$$x_1^i = 0; x_2^i = 0.$$

3. Определяется оптимальное решение среди всех точек, находящихся в вершинах многоугольника.

Система совместна, вершины многоугольника решений системы выделены. Находим точку оптимума

$$f_i = x_1^i + x_2^i, f_{\text{опт}} = \max(f_i).$$

Если  $f_{\text{опт}} = f_{i^0}$ , то  $x_{1\text{опт}} = x_1^{i^0}, x_{2\text{опт}} = x_2^{i^0}$ .

4. Определяются элементы оптимального режима восстановления.

Имеем  $x_{1\text{опт}}, x_{2\text{опт}}$ .

Находим

$$n_{\text{опт}} = e^{x_{1\text{опт}}} \text{ и } s_{\text{опт}} = e^{x_{2\text{опт}}}.$$

Графическое решение системы (12) для значений твердости колесных сталей 255, 300, 340 и 380 НВ при глубинах резания в 5, 9 и 11 мм показано на рис. 2. В результате ее

анализа получены следующие координаты точки оптимума, например, при глубине резания  $t = 5\text{мм}:$

- для 255 НВ:  $x_{1\text{опт}} = 2,99, x_{2\text{опт}} = 0,13;$
- для 300 НВ:  $x_{1\text{опт}} = 2,65, x_{2\text{опт}} = 0,13;$
- для 340 НВ:  $x_{1\text{опт}} = 2,46, x_{2\text{опт}} = 0,13;$
- для 380 НВ:  $x_{1\text{опт}} = 2,30, x_{2\text{опт}} = 0,13.$

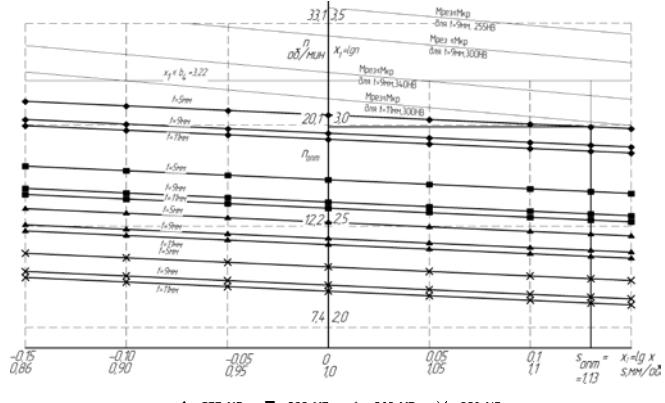


Рисунок 2 — Определение оптимального режима восстановления профиля колеса

Как видно из рис. 2, а также из приведенных численных результатов в табл. 1, оптимальное значение подачи определяется требованиями по шероховатости обработанной поверхности катания и для всех значений твердости составляет 1,13 мм/об. Ограничение по мощности, затрачиваемой на процесс восстановления, не оказывает существенного влияния на выбор режимов резания. Главенствующую роль играет ограничение по режущим возможностям инструмента, так как на пересечении этой прямой, описывающей влияние  $t, s, n$  на период стойкости, и прямой, отражающей влияние подачи на шероховатость поверхности, находится точка оптимума. Как с увеличением глубины резания, так и с ростом твердости колесной стали значение оптимальной частоты вращения колеса снижается.

Для назначения режимов восстановления профиля в зависимости от твердости колесной стали при механической обработке железнодорожных колес на основании расчетов получены результаты, сведенные в табл. 1.

Таблица 1 — Рекомендованные режимы резания

Твердость, НВ	Режимы резания						
	Подача $s$ , мм/об	при глубине $t = 5\text{мм}$		при глубине $t = 9\text{мм}$		при глубине $t = 11\text{мм}$	
		Частота вращения $n$ , об/мин	Скорость $v$ , м/мин	Частота вращения $n$ , об/мин	Скорость $v$ , м/мин	Частота вращения $n$ , об/мин	Скорость $v$ , м/мин
250	1,13	19,89	59,76	18,17	54,61	17,64	53,00
300	1,13	14,15	42,53	12,94	38,87	12,55	37,72
340	1,13	11,70	35,17	10,80	32,47	10,49	31,51
380	1,13	9,97	29,97	9,12	27,39	8,85	26,58

## Заключение

1. Приведена система, описывающая оптимизацию режима восстановления профиля поверхности катания колеса на станке КЗТС 1836 и обеспечивающая наименьшее машинное время обработки при различных значениях НВ,  $t$ ,  $s$  и  $n$ .

2. Анализ результатов оптимизации показывает:

- применяемые в настоящее время режимы [9, 10] назначены без учета возможных изменений твердости поверхности катания, предусмотренных ГОСТ 10791-2011;

- значение оптимальной подачи при обработке главным образом определяется требованием по шероховатости поверхности катания;
- изменение твердости колесной стали от 250 до 380 НВ приводит к заметному изменению расчетных величин вращения колеса;
- различие в глубинах резания также сказывается на величине оптимальной частоты вращения колесной пары, но ее влияние уступает влиянию изменения твердости.

## Литература

1. Фельдштейн Е.Э., Корниевич М.А. Режущий инструмент. Эксплуатация: учебное пособие. Минск: Новое знание; М.: ИНФРА-М, 2012. 256 с.
2. Справочник технолога-машиностроителя. В 2-х т. / под ред. А.Г. Косиловой и Р.К. Мещерякова. М.: Машиностроение, 1986. 656 с.
3. Общемашиностроительные нормативы режимов резания: справочник в 2-х т. / Локтев А.Д., Гущин И.Ф., Батуев В.А. и др. М.: Машиностроение, 1991. 640 с.
4. Обработка металлов резанием: справочник технолога / Панов А.А., Анкин В.В., Бойм Н.Г. и др.; под общ. ред. А.А. Панова. М.: Машиностроение, 2004. 784 с.
5. Силин С.С. Метод подобия при резании материалов. М.: Машиностроение, 1979. 152 с.
6. Хемди А. Таха. Введение в исследование операций. М.: Издательский дом Вильямс, 2005. 912 с.
7. Лунгу К.Н. Линейное программирование. Руководство к решению задач. М.: Физматлит, 2005. 128 с.
8. Горанский Г.К. Расчет режимов резания при помощи электронно-вычислительных машин. Минск: Государственное издательство БССР, 1963. 192 с.
9. Иванов И.А., Урушев С.В. Оптимизация параметров режимов резания цельнокатанных колес // Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, Seria Transport, z. 15. Gliwice. 1990. Nr 1094. P. 79—91.
10. Оценка возможностей процессов восстановления профиля поверхности катания колесных пар / Воробьев А.А., Иванов И.А., Кононов Д.П., Урушев С.В. // Вісник СНУ ім В. Даля. 2011. № 12 (166). С. 77—84.

## References

1. Feldshteyn E. E., Kornievich M. A. Rezhushchiy instrument. Ekspluatatsiya: uchebnoe posobie. [Cutting tools. Operation: manual.] Minsk: Novoe znanie; M.: INFRA-M, 2012. 256 p.
2. Spravochnik tekhnologa-mashinostroityelya. [Manual for mechanical and process engineers] 2 volumes. / Edited by A.G. Kosilov and R.K. Meshcheryakov. M.: Mashinostroenie, 1986. 656 p.
3. Obshchemashinostroitelnye normativy rezhimov rezaniya [General standard cutting modes in mechanical engineering industry] Reference book in 2 volumes / A.D. Loktev, I.F. Gushchin, V.A. Batuev et al. M.: Mashinostroenie, 1991. 640 p.
4. Obrabotka metallov rezaniem: Spravochnik tekhnologa [Metal cutting: reference book for process engineer] / A.A. Panov, V.V. Ankin, N.G. Boym et al.; General editor: A.A. Panova. M.: Mashinostroenie, 2004. 784 p.
5. Silin S.S. Metod podobiya pri rezaniyu materialov. [The method of similarity in material cutting] M.: Mashinostroenie, 1979. 152 p.
6. Khemdi A. Takha. Vvedenie v issledovanie operatsiy. [Introduction to Operations Research.] M.: Publishing House Williams, 2005. 912 p.
7. Lungu K. N. Lineynoe programmirovaniye. Rukovodstvo k resheniyu zadach. [Linear programming. Guide to solving problems.] M.: Fizmatlit, 2005. 128 p.
8. Goranskiy G. K. Raschet rezhimov rezaniya pri pomoschi elektronno-vychislitelnykh mashin. [Calculation of cutting modes using computers.] Minsk.: State Publishing House BSSR, 1963. 192 p.
9. Ivanov I. A., Urushev S.V.. Optimizatsiya parametrov rezhimov rezaniya tselnokatannykh koles [Optimization of cutting parameters for rolled wheels] // Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, Seria Transport z.15.: Gliwice, 1990. Nr 1094. p. 79-91.
10. Otsenka vozmozhnostey protsessov vosstanovleniya profilya poverkhnosti kataniya kolesnykh par [Assessment of the possibility of recovery of wheelset tread surface profile] / A.A. Vorobyov, I.A. Ivanov, D.P. Kononov, S.V. Urushev // Visnik SNU im V. Dalja Lugansk. 2011. No.12 (166). p. 77-84.

УДК 681.51

Алексей Тарасович Когут, доктор технических наук, профессор кафедры «Автоматика и системы управления» Омского государственного университета путей сообщения (ОмГУПС)

## СИНТЕЗ АЛГОРИТМОВ УПРАВЛЕНИЯ КОЛЕБАНИЯМИ ПРИ ВИБРОДИАГНОСТИЧЕСКОМ КОНТРОЛЕ МЕХАНИЧЕСКИХ УЗЛОВ ПОДВИЖНОГО СОСТАВА

Alexei T. Kogut, DSc in Engineering, Professor of the Chair "Automation and Control Systems", Omsk State Transport University (OmGUPS)

### Synthesis Of Vibration Control Algorithms In Vibrodiagnostic Monitoring Of Mechanical Parts Of Rolling Stock

#### Аннотация

В статье рассматриваются вопросы управления механическими колебаниями в вибродиагностических стендах за счет изменения жесткости пневмо-подвески. Синтез автоматической системы контроля проводится на основе численных методов решения обратной задачи нелинейной динамики. Полученные приближенные алгоритмы используют линеаризацию нелинейной модели объекта, учитывающей первые и вторые производные ряда Тейлора. Алгоритмы управления реализуются в программном обеспечении микроконтроллеров автоматизированного диагностического комплекса. Эффективность разработанной системы управления подтверждается результатами имитационного моделирования.

**Ключевые слова:** техническая диагностика, вибродиагностические стенды, пневматическая подвеска, математическая модель объекта, траекторное управление, линеаризация, приближенные алгоритмы, контроллер, имитационное моделирование.

#### Abstract

The article addresses the issues of mechanical vibration control in vibrodiagnostic stands by changing air suspension stiffness. Synthesis of automatic control system was performed based on numerical methods for solving the inverse problem of nonlinear dynamics. The obtained approximate algorithms employ linearization of the nonlinear model of an object, taking into account the first and second derivatives of the Taylor series. The control algorithms are implemented in the software of automated diagnostic system microcontrollers. The effectiveness of the developed control system is confirmed by simulation modeling results.

**Keywords:** technical diagnostics, vibration diagnostics stands, air suspension, mathematical model of the object, trajectory control, linearization, approximate algorithms; controller; simulation modeling.

**О**беспечение надежности и безопасности являются важнейшими требованиями, предъявляемыми к устройствам железнодорожного транспорта. При ремонте механических узлов подвижного состава достаточно часто необходимо осуществлять вибродиагностический контроль качества продукции [1].

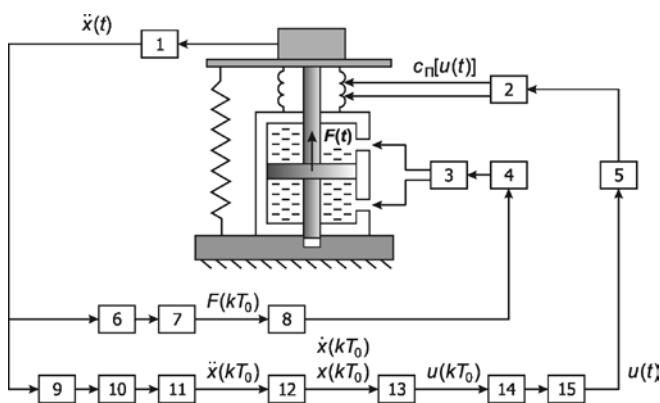
При диагностировании устройств железнодорожного транспорта широко применяется автоматизированный комплекс «Прогноз-1М» [2, 3]. Комплекс «Прогноз-1М» предназначен для определения технического состояния механических узлов (подшипников качения, зубчатых передач редукторных, буксовых, моторных устройств) на основе обработки сигналов вибрации и частоты вращения.

Предлагается использовать аппаратные и программные средства комплекса «Прогноз-1М» для синтеза замкнутой автоматической системы управления вынужденными колебаниями вибродиагностического стенда. Для обеспечения требуемой формы колебаний (например, гармонической) применяется пневматическая подвеска (пневмооболочка). Структурная схема предлагаемой системы приведена на рис. 1.

В систему входят усилитель мощности 4 и гидроусилитель 3 для формирования усилия  $F(t)$  в поршне и перемещения инерционной массы вибростенда в соответствии с заданным законом изменения координаты  $x(t)$ .

Сигнал, пропорциональный ускорению вертикальных перемещений от вибродатчика 1 подается на коммутатор 9 и блок управления и фильтрации 10. После дискретизации аналого-цифровым преобразователем 11 значения  $\ddot{x}(kT_0)$  поступают в порты сигнального процессора 12, где вычисляются дискретные значения  $\dot{x}(kT_0)$  и  $x(kT_0)$ . Для формирования воздействия  $F(t)$  сигнал  $\ddot{x}(t)$  подается на аналого-цифровой преобразователь 6, сигнальный процессор 7 и цифроаналоговый преобразователь 8.

В программном обеспечении персонального компьютера 13 необходимо реализовать соответствующие алгоритмы управления. Дискретный сигнал  $u(kT_0)$  подается на цифроаналоговый преобразователь 14 и блок усиления и фильтрации 15, а непрерывный сигнал управляющего воз-



**Рисунок 1 — Структурная схема системы автоматического управления вибродиагностическим стендом:** 1 — датчик; 2 — исполнительный механизм регулирования жесткости пневмоподвески; 3 — гидравлический усилитель; 4, 5 — усилители мощности; 6 — аналого-цифровой преобразователь; 7 — сигнальный процессор; 8 — цифроаналоговый преобразователь; 9 — коммутатор; 10 — блок усиления и фильтрации; 11 — аналого-цифровой преобразователь; 12 — сигнальный процессор; 13 — персональный компьютер; 14 — цифроаналоговый преобразователь; 15 — блок усиления и фильтрации

действия  $u(t)$  поступает на вход усилителя мощности 5, где он усиливается до уровня необходимого для функционирования исполнительного механизма изменения жесткости пневмоподвески вибродиагностического стенда.

При определении алгоритма управления  $u(t)$  необходимо получить математическую модель электромеханического объекта подвижной части стенда, которую можно записать в виде дифференциального уравнения колебательного звена [4]

$$m \ddot{x}(t) + b \dot{x}(t) + c_0 x(t) + c_{\Pi}[u(t)] x(t) = F(t), \quad (1)$$

где  $F(t)$  — входное механическое воздействие от гидроцилиндра;

$m$  — масса подвижной части вибростенда;

$b, c_0$  — суммарные коэффициенты вязкого и жесткого трения всех упругих пружин.

В уравнении (1) жесткость пневмооболочки  $c_{\Pi}[u(t)]$  представим следующим образом:

$$c_{\Pi}[u(t)] = f(u). \quad (2)$$

Рассмотрим определение алгоритма  $u(t)$  с помощью методов траекторного управления [5], если вибродиагностический контроль осуществляется при моногармоническом воздействии. Требуемая траектория движения имеет вид

$$g(t) = g_m \sin \omega_b t, \quad (3)$$

где  $g_m, \omega_b$  — заданные значения амплитуды и частоты синусоидальных колебаний соответственно.

Введем переменные состояния  $x_1(t) = x(t)$ ,  $x_2(t) = \dot{x}(t)$  для модели объекта (1) и  $g_1(t) = g(t)$ ,  $g_2(t) = \dot{g}(t)$  для желаемой траектории (3). Дифференциальные уравнения модели запишутся в виде:

$$\dot{x}_1(t) = x_2(t); \quad (4)$$

$$\dot{x}_2(t) = -\frac{1}{m} [b x_2(t) + c_0 x_1(t) + c_{\Pi}[u(t)] x_1(t) - F(t)]. \quad (5)$$

При траекторном управлении [5] должны быть выполнены равенства

$$\dot{x}_1(t) = \dot{g}_1(t); \quad \dot{x}_2(t) = \dot{g}_2(t).$$

В этом случае вместо уравнения (5) будем иметь выражение

$$\dot{g}_2(t) = -\frac{1}{m} [b \dot{g}_1(t) + c_0 x_1(t) + c_{\Pi}[u(t)] x_1(t) - F(t)]$$

или, учитывая аналитические формулы для  $\dot{g}_1(t)$  и  $\dot{g}_2(t)$ , в виде

$$c_{\Pi}[u(t)] = -c_0 + x_1^{-1}(t) mg_m \omega^2 \sin \omega t - x_1^{-1}(t) [bg_m \omega \cos \omega t - F(t)]. \quad (6)$$

Зададим входное воздействие следующим образом:

$$F(t) = [bg_m \omega] \cos \omega t, \quad (7)$$

тогда с учетом обозначения (2) получим равенство

$$F[u(t)] = \varphi[x(t), g(t)]. \quad (8)$$

Здесь

$$\varphi[x(t), g(t)] = -c_0 + x_1^{-1}(t) mg_m \omega^2 \sin \omega t \quad (9)$$

$$\text{и } x(t) = x_1(t).$$

Выберем релейный алгоритм траекторного управления [4, 5], но будем использовать гладкую аппроксимацию

$$f[u(t)] = c_m \operatorname{th}[\beta u(t)] \text{ при } \beta \rightarrow \infty. \quad (10)$$

При аппроксимации (10) возможно аналитическое решение обратной задачи динамики, и алгоритм формирования управляющего воздействия запишется в виде

$$u(t) = (\beta c_m)^{-1} \operatorname{arctanh}[\varphi(t)]. \quad (11)$$

Результаты имитационного моделирования аналитического решения обратной задачи динамики представлены на рис. 2 и 3.

Анализируя рисунки, видно, что для обеспечения заданных колебаний  $x(t)$  (см. рис. 2) необходим автоколебательный характер переходных режимов для процесса изменения жесткости пневмоподвески (см. рис. 3), поэтому обратимся к алгоритмам, рассмотренным в работе [6].

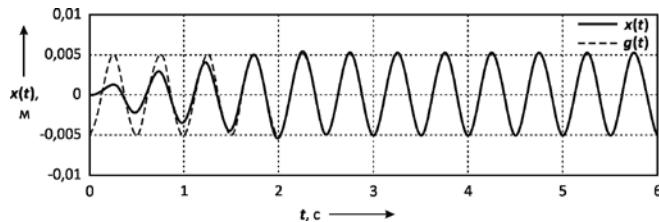


Рисунок 2 — Переходный процесс в системе с релейным алгоритмом обратной динамики

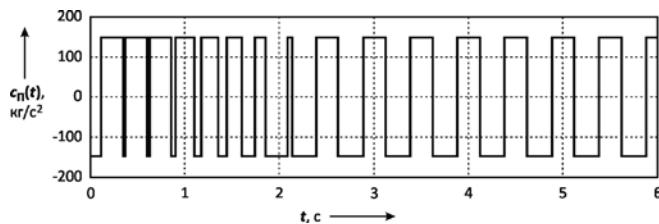


Рисунок 3 — Процесс изменения жесткости пневмоподвески в системе

Приближенные алгоритмы, основанные на схемах линеаризации, разработаны для класса дискретных моделей, поэтому введем дискретное время  $t = kT_0$ , где  $T_0$  — шаг дискретизации. Вместо выражения (9) и модели объекта управления будем иметь:

$$\varphi[x(kT_0), g(kT_0)] = -c_0 + x^{-1}(kT_0)mg_m\omega^2 \sin(\omega kT_0); \quad (12)$$

$$x(kT_0) = x[(k-1)T_0] - \frac{T_0}{m} \{bg_m\omega \cos(\omega(k-1)T_0) + c_0x[(k-1)T_0] + f[u[(k-1)T_0]] \times x[(k-1)T_0] - bg_m\omega \cos[\omega(k-1)T_0]\}. \quad (13)$$

Нелинейную функцию  $f(\cdot)$  заменим аппроксимацией рядом Тейлора второго порядка

$$f[u(kT_0)] = f_{k-1} + f'_{k-1}\Delta u + 0,5f''_{k-1}\Delta u^2, \quad (14)$$

$$\text{где } f_{k-1} = f(u); f'_{k-1} = \frac{\partial f(u)}{\partial u}; f''_{k-1} = \frac{\partial^2 f(u)}{\partial u^2} \text{ при } u = u[(k-1)T_0].$$

Аналитические выражения для первой и второй производных имеют вид

$$f'(u) = c_m\beta \operatorname{ch}^{-2}(\beta u); f''(u) = -2c_m\beta^2 \operatorname{sh}(\beta u).$$

В формуле (14) разность

$$\Delta u = u(kT_0) - u[(k-1)T_0]. \quad (15)$$

Выражение (14) является нелинейным относительно  $\Delta u$ . Применим подход, предлагаемый в работе [6], и запишем на основе формулы (14) приближенную линейную аппроксимацию второго порядка

$$f[u(kT_0)] = f_{k-1} + [f'_{k-1} + 0,5f''_{k-1}\delta_{k-1}]\Delta u, \quad (16)$$

где значение разности  $\delta_{k-1}$  известно и является постоянной величиной.

Используя дискретный аналог выражения (8) и формулы (12), (16) и (15), получим рекуррентный алгоритм второго порядка

$$u(kT_0) = u[(k-1)T_0] - [f'_{k-1} + 0,5f''_{k-1}\delta_{k-1}]^{-1} [c_0 - x^{-1}(kT_0)mg_m\omega^2 \sin(kT_0\omega)]. \quad (17)$$

Численное значение разности  $\delta_{k-1}$  может быть определено на основе линейной аппроксимации (14) и имеет вид

$$\delta_{k-1} = -(f'_{k-1})^{-1} [c_0 - x^{-1}(kT_0)mg_m\omega^2 \sin(kT_0\omega)]. \quad (18)$$

Результаты имитационного моделирования приближенного алгоритма управления (17) при  $u(0) = 0,07$  и уравнения модели объекта (13) при  $x(0) = -0,012$  в виде процесса изменения жесткости подвески  $c_n(t)$  приведены на рис. 4. Переходный режим становится затухающим, и в системе устраняются автоколебания.

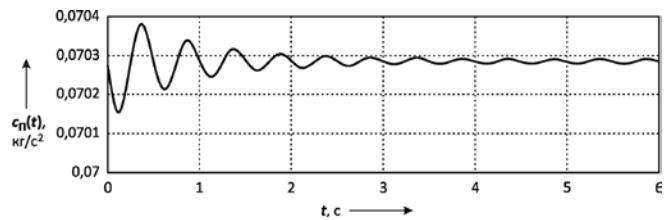


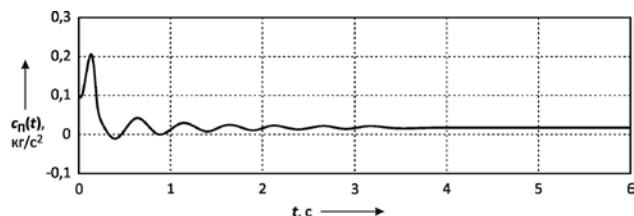
Рисунок 4 — Процесс изменения жесткости пневмоподвески в системе с алгоритмом второго порядка

На основе выражения (18) можно построить приближенный алгоритм траекторного управления первого порядка в виде следующей рекуррентной формулы:

$$u_1(kT_0) = u[(k-1)T_0] - (f'_{k-1})^{-1} [c_0 - x^{-1}(kT_0)mg_m\omega^2 \sin(kT_0\omega)]. \quad (19)$$

Предлагается двуступенчатая вычислительная схема реализации приближенного алгоритма второго порядка (17). На первой ступени вычисляются значения  $u_1(kT_0)$  и  $\delta_{k-1}$ , а на второй по выражению (17) определяется управляющее воздействие  $u(kT_0)$ , и если ошибка в системе достаточно большая, то  $u(kT_0)$  подается на вход объекта. При этом в формуле (17) вместо  $u[(k-1)T_0]$  используется значение  $u_1(kT_0)$ . Если ошибка достаточно мала, то применяется только регулятор первого порядка (19). Двуступенчатая процедура позволяет более эффективно использовать приближенные алгоритмы первого и второго порядков.

Результаты имитационного моделирования приближенного алгоритма управления первого порядка (19) для тех же значений  $u(0)$  и  $x(0)$  приведены на рис. 5.



**Рисунок 5 — Процесс изменения жесткости пневмоподвески в системе с алгоритмом первого порядка**

Алгоритмы управления первого порядка также устраняют в системе автоколебания и могут быть использованы как на первой ступени алгоритма (17), так и в виде основного управляющего воздействия  $u(kT_0)$ .

Таким образом, приближенные алгоритмы траекторного управления могут быть реализованы в программном обеспечении микропроцессорной системы вибродиагностического стенда при техническом контроле механических узлов подвижного состава.

## Литература

- Явленский К.Н., Явленский А.К. Вибродиагностика и прогнозирование качества механических систем. М.: Машиностроение, 1983.
- Молчанов В.В., Шахов В.Г. Новые технологии и оборудование контроля и диагностирования железнодорожной техники // Известия Транссиба. 2010. № 4. С. 116 — 120.
- Шахов В.Г. Информационные технологии и алгоритмы в диагностировании железнодорожной техники. Омск: ИЦ «Омский научный вестник», 2010. 158 с.
- Ананьевский И.М., Черноуско Ф.Л., Решмин С.А. Методы управления нелинейными механическими системами. М.: Физматлит, 2006. 328 с.
- Методы классической и современной теории автоматического управления. Синтез регуляторов систем автоматического управления / под ред. К.А. Пупкова, Н.Д. Егупова. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. Т. 3. 616 с.
- Когут А.Т. Полиномиальная аппроксимация в некоторых задачах оптимизации и управления. Омск: Омский гос. ун-т путей сообщения, 2003. 243 с.

## References

- Yavlenskiy K.N., Yavlenskiy A.K. Vibrodiagnostika i prognozirovaniye kachestva mekhanicheskikh sistem. [Vibration diagnostics and forecasting the quality of mechanical systems] M.: Mashinostroenie, 1983.
- Molchanov V. V., Shakhev V. G. Noye tekhnologii i oborudovaniye kontrolya i diagnostirovaniya zheleznyodorozhnoy tekhniki [New technologies and devices for railway equipment monitoring and diagnostics] // Izvestiya Transsiba. 2010. No. 4. p. 116 — 120.
- Shakhev V.G. Informatsionnye tekhnologii i algoritmy v diagnostirovaniy zheleznyodorozhnoy tekhniki. [Information technology and algorithms in railway equipment diagnosis] Omsk: «Omskiy nauchny vestnik» Publishing Center, 2010. 158 p.
- Ananyevskiy I. M., Chernousko F. L., Reshmin S. A. Metody upravleniya nelineynymi mekhanicheskimi sistemami. [Nonlinear mechanical system management techniques] M.: Fizmatlit, 2006. 328 p.
- Metody klassicheskoy i sovremennoy teorii avtomaticheskogo upravleniya. Sintez regulatorov sistem avtomaticheskogo upravleniya [Methods of classical and modern control theory. Synthesis of automatic control systems regulators] / Edited by K. A. Pupkov, N. D. Egupov. M.: MGTU named after N. E. Bauman, 2004. T. 3. 616 p.
- Kogut A. T. Polinomialnaya approksimatsiya v nekotorykh zadachakh optimizatsii i upravleniya. [Polynomial approximation in some optimization and control problems.] Omsk, Omsk State. Univ of Railways, 2003. 243 p.

УДК 621.815

Анатолий Васильевич Бородин, доктор технических наук, профессор кафедры «Теория механизмов и детали машин» Омского государственного университета путей сообщения (ОмГУПС),  
 Георгий Петрович Здор, кандидат технических наук, доцент кафедры «Теория механизмов и детали машин» Омского государственного университета путей сообщения (ОмГУПС),  
 Лилия Владимировна Ярышева, аспирантка кафедры «Теория механизмов и детали машин» Омского государственного университета путей сообщения (ОмГУПС)

## ВЛИЯНИЕ УСЛОВИЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ НА ПРОЧНОСТЬ СОЕДИНЕНИЯ «КОЛЕСНЫЙ ЦЕНТР — БАНДАЖ» КОЛЕСА ТЕПЛОВОЗА

Anatoliy V. Borodin, DSc in Engineering, Professor of the Chair "Theory of Mechanisms and Machines", Omsk State Transport University (OmGUPS),  
 Georgiy P. Zdor, PhD in Engineering, Associate Professor of the Chair "Theory of Mechanisms and Machines", Omsk State Transport University (OmGUPS),  
 Lilia V. Yarysheva, postgraduate student of the Chair "Theory of Mechanisms and Machines", Omsk State Transport University (OmGUPS)

### Effect Of Operating Conditions On The Strength Of “Wheel Center — Band” Connection Of Locomotive Wheel

#### Аннотация

Дана оценка влиянию механических и тепловых факторов на прочность соединения «колесный центр — бандаж» колеса тепловоза. Рассмотрены динамические нагрузки на соединение. Определены крутящие моменты при четырех режимах работы локомотива. Проанализировано влияние повышения температуры колеса при торможении на изменение модуля упругости материалов в соединении. Представлены результаты расчета крутящих моментов при тепловом воздействии на колесо тепловоза. Показано, что определяющим условием снятия натяга в соединении является совместное воздействие механических и тепловых нагрузок.

**Ключевые слова:** колесный центр, бандаж, тепловое воздействие, механические нагрузки, крутящий момент, натяг.

#### Abstract

The influence of mechanical and thermal factors on the strength of «wheel center - band» connection of diesel locomotive wheels is estimated. Dynamic loads on the connection are considered. Torques are defined at four operation modes of the locomotive. The influence of increase in wheel temperature at braking on the change of modulus of elasticity of connection materials is analyzed. The results of calculation of torques during thermal exposure on locomotive wheel are described. It is shown that a prerequisite for the removal of tightness in the joint is the combined effect of mechanical and thermal loads.

**Keywords:** wheel center, band, thermal effects, mechanical load, torque, tightness.

Прочность соединения «колесный центр — бандаж» колеса тепловоза зависит не только от особенностей конструкции деталей, состояния контактирующих поверхностей [1], но и от условий эксплуатации локомотива.

На соединение действуют вес тягового двигателя, окружная и радиальная силы в зацеплении передачи, инерционные силы, обусловленные колебаниями тягового электродвигателя в вертикальной плоскости и поворотом двигателя вокруг оси, проходящей через центр тяжести, динамические составляющие, возникающие в зубчатой передаче вследствие погрешностей шага зацепления, реакции при прохождении колесом стыка рельсов. Известно, что динамические нагрузки в соединении велики и иногда превосходят статические в несколько раз. Рассмотрим их совместное действие на прочность соединения бандажа с колесным центром.

Сила веса тягового двигателя  $Q_m$  направлена вертикально и распределяется на два моторно-осевых подшипника, на кронштейн двигателя (рис. 1) и далее через ось передается на колеса [2].

Уравнения равновесия системы «колесная пара — тяговый двигатель — рама тележки»

$$\left. \begin{array}{l} \sum P_z = 0; \quad \sum P_z = R_{AQ} + R_{BQ} + R_{CD} - Q_m = 0; \\ \sum M_x = 0; \quad \sum M_x = R_{AQ}c + Q_m e + R_{BQ}(\ell - c) = 0; \\ \sum M_y = 0; \quad \sum M_y = R_{CQ}L + Q_m(A - f) = 0; \end{array} \right\}. \quad (1)$$

Решая совместно уравнения (1), определяют реакции в опорах, которые через ось колесной пары передаются на бандаж:

$$R_{AQ} = \frac{Q_m}{L\ell} [\ell(L - A + f) - c(L - A + f) - Le]; \quad (2)$$

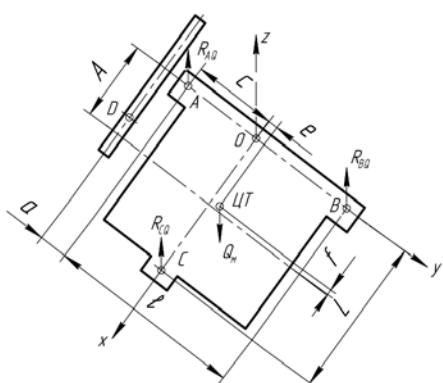


Рисунок 1 — Схема распределения веса тягового двигателя

$$R_{BQ} = \frac{Q_M}{\ell} \left[ e + c \left( 1 - \frac{A - f}{L} \right) \right]. \quad (3)$$

Окружная сила  $F_{tem}$  в зацеплении направлена вдоль оси Z в зависимости от направления движения тепловоза (рис. 2)

$$F_{tem} = \frac{2M}{d_1}, \quad (4)$$

где  $M$  — длительный момент тягового электродвигателя, Нч;  $d_1$  — делительный диаметр шестерни, м.

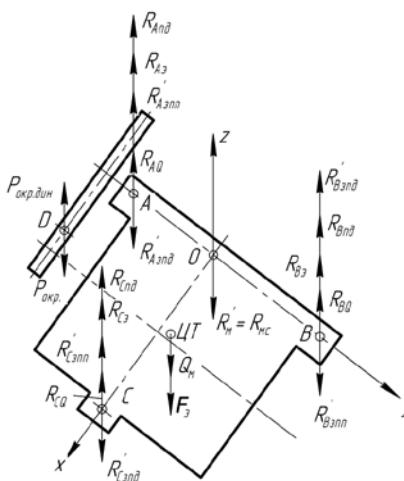


Рисунок 2 — Схема нагрузок на опоры тягового двигателя для случая движения колесной пары двигателем вперед с положительным ускорением

Опорные реакции моторно-осевых подшипников от действия окружной силы определяются из уравнений статики:

$$R'_{azp} = F_{tem} \frac{\ell + a}{\ell}; \quad (5)$$

$$R'_{vzp} = F_{tem} \frac{a}{\ell}. \quad (6)$$

Динамическая инерционная сила от вертикального перемещения ТЭД приложена в его центре тяжести и равна

$$F_d = -\frac{Q_M}{g} \cdot \frac{L - \ell_{at}}{L} \cdot \ddot{z}, \quad (7)$$

где  $\ddot{z}$  — вертикальное полное ускорение оси колесной пары,  $\text{м}/\text{с}^2$ ;

$g$  — ускорение силы тяжести,  $\text{м}/\text{с}^2$ .

Ускорение  $\ddot{z}$  определяется по эмпирической формуле С.С. Зольникова при прохождении стыков

$$\ddot{z} = (2 + 0,13 \sqrt[3]{Q_H^2}) g, \quad (8)$$

где  $g$  — скорость движения локомотива,  $\text{км}/\text{ч}$ ;

$Q_H$  — вес инерционных частей, приходящихся на одну ось.

Динамическая инерционная сила приложена в центре тяжести двигателя, поэтому нагрузки на колеса находятся по (2).

Сила, возникающая от поворота тягового двигателя вокруг оси, проходящей через центр тяжести,

$$F_{pid} = -\frac{J_{kd}}{L^2} \cdot \ddot{z}, \quad (9)$$

где  $J_{kd} = 410 \text{ кгм}^2$  — момент инерции корпуса ТЭД.

На колесах от силы  $F_{pid}$  возникают реакции:

$$R_{azp} = -\frac{J_{kd}}{L^2} \cdot \ddot{z} \cdot \left( \frac{\ell - c}{c} \right); \quad (10)$$

$$R_{vzp} = -\frac{J_{kd}}{L^2} \cdot \ddot{z} \cdot \frac{c}{\ell}. \quad (11)$$

Окружное динамическое усилие, действующее на зубья шестерен,

$$F_{okr.din.} = \frac{J_{y}(i+1)}{L r_{III}} \ddot{z}, \quad (12)$$

где  $J_y = 26,3 \text{ кгм}^2$  — момент инерции якоря ТЭД.

Реакции на колесах от действия окружной динамической силы в зацеплении:

$$R'_{azp} = F_{okr.din.} \cdot \left( \frac{\ell + a}{\ell} \right); \quad (13)$$

$$R'_{vzp} = F_{okr.din.} \cdot \frac{a}{\ell}. \quad (14)$$

Дополнительные динамические усилия на зубья шестерен определяются, вводя динамический коэффициент. Этот коэффициент учитывает дополнительные динамические нагрузки, возникающие вследствие ошибок шага зацепления. На его величину оказывают влияние степень точности зубчатой передачи и окружная скорость

$$K_d = 0,4 + 0,1 c_t + 0,025 v_{okr}, \quad (15)$$

где  $c_t$  — порядковый номер степени точности зубчатой передачи;  $v_{okr}$  — окружная скорость,  $\text{м}/\text{с}$ .

Окружная сила с учетом коэффициента динамики рассчитывается по формуле

$$F_t = K_d F_{tem}. \quad (16)$$

Полные реакции на колеса тепловоза от окружной силы с учетом коэффициента динамики находятся по выражениям:

$$R'_{azp} = R'_{azp} K_d; \quad (17)$$

$$R'_{vzp} = R'_{vzp} K_d. \quad (18)$$



В работе рассмотрены и определены динамические нагрузки для четырех режимов работы тепловоза:

- 1) колесная пара перемещается двигателем вперед с положительным ускорением;
- 2) колесная пара перемещается двигателем вперед с отрицательным ускорением;
- 3) колесная пара перемещается осью вперед с положительным ускорением;
- 4) колесная пара перемещается осью вперед с отрицательным ускорением.

Составляющие радиальных нагрузок складываются в разные комбинации в зависимости от режима работы локомотива. Это определяет их суммарные значения, действующие в соединении «колесный центр — бандаж» колеса тепловоза [2]. При первом режиме работы локомотива суммарные реакции на оси колесной пары равны

$$\left. \begin{aligned} R'_A &= R_{AQ} + R'_{AZPP} + R_{AE} + R_{APD} - R'_{AZPD} \\ R'_B &= R_{BQ} - R'_{BZPP} + R_{BE} + R_{BPD} + R'_{BZPD} \end{aligned} \right\}. \quad (19)$$

В режиме торможения действующие окружные силы и сила инерции двигателя изменили направления действия на обратные. Тогда реакции определяются из выражений

$$\left. \begin{aligned} R'_A &= R_{AQ} + R'_{AZPP} + R_{AZPD} - R_{APD} - R'_{AZPD} \\ R'_B &= R_{BQ} - R'_{BZPP} - R_{BE} - R_{BPD} - R'_{BZPD} \end{aligned} \right\}. \quad (20)$$

С учетом изменения направления движения, расположения двигателя относительно оси колесной пары, разгона или торможения реакции определяются по формулам:  
режим 3

$$\left. \begin{aligned} R'_A &= R_{AQ} - R'_{AZPP} + R_{AE} + R_{APD} - R'_{AZPD} \\ R'_B &= R_{BQ} + R'_{BZPP} + R_{BE} + R_{BPD} + R'_{BZPD} \end{aligned} \right\}; \quad (21)$$

режим 4

$$\left. \begin{aligned} R'_A &= R_{AQ} - R'_{AZPP} - R_{AE} - R_{APD} + R'_{AZPD} \\ R'_B &= R_{BQ} + R'_{BZPP} - R_{BE} - R_{BPD} - R'_{BZPD} \end{aligned} \right\}. \quad (22)$$

Результаты расчетов представлены в табл. 1.

**Таблица 1 — Динамические нагрузки в соединении «колесный центр — бандаж» колеса тепловоза, обусловленные воздействием ТЭД**

Режимы работы тепловоза	Нагрузка, кН	Скорость, км/ч			
		70	90	110	130
1	$R'_A$	-76,5	-105,9	-129,1	-155,7
	$R'_B$	-36,4	-42,8	-49,6	-56,4
2	$R'_A$	299,2	340,5	379,8	420,6
	$R'_B$	25,2	29,6	33,8	38,2
3	$R'_A$	-279,5	-320,8	-360,1	-400,7
	$R'_B$	-3,0	-7,4	-11,6	-16,0
4	$R'_A$	96,2	124,9	148,8	115,4
	$R'_B$	58,6	65	71,8	78,6

Наибольшее воздействие соединение «колесный центр — бандаж» колеса тепловоза испытывает при втором режиме работы локомотива. В этом случае к нагрузке, действующей на колесные пары в статике, добавляются динамические реакции, обусловленные прохождением колесом стыка рельсов.

При этом происходит вертикальное перемещение двигателя и его поворот вокруг оси, проходящей через центр тяжести.

Если нагрузка на колесо тепловоза 2ТЭ116 в статике составляет 113 кН [3], то при движении тепловоза со скоростью 70 км/ч при втором режиме работы возникают динамические добавки, превышающие нагрузку на колесо в статике в 2,6 раза.

Из пяти слагаемых, определяющих эти нагрузки, наибольшую долю составляют полные реакции от окружной силы с учетом коэффициента динамики — 33,9% и реакции от действия окружной силы в зацеплении — 38,3%. Это создает предпосылки для ослабления прочности соединения «колесный центр — бандаж» колеса тепловоза и возможности проворота.

#### Сила тяги

$$F_{k_{\max}} \leq P_{\text{сц}} \psi_k, \quad (23)$$

где  $P_{\text{сц}}$  — сцепной вес тепловоза, кН;  
 $\psi_k$  — расчетное значение коэффициента сцепления,

$$\psi_k = 0,25 + \frac{8}{100 + 209}, \quad (24)$$

где  $\vartheta$  — скорость движения тепловоза, км/ч.

Крутящий момент, необходимый для реализации силы тяги,

$$M_t = F_{k_{\max}} \frac{D_k}{2}, \quad (25)$$

где  $D_k$  — диаметр колеса тепловоза по кругу катания, м.

Момент, приведенный к поверхности сопряжения бандажа и колесного центра тепловоза,

$$M_{t,p} = M_t \cdot \frac{d}{D_k}, \quad (26)$$

где  $d$  — диаметр посадочной поверхности бандажа, м.

Крутящий момент, под действием которого бандаж может повернуться относительно центра колеса, равен [4]

$$M_{\max} = \frac{1}{2} \cdot \mu p_k \pi d^2 \ell, \quad (27)$$

где  $\mu$  — коэффициент Пуассона;

$p_k$  — удельное контактное давление, МПа;

$d$  — диаметр посадочной поверхности, мм;

$\ell$  — ширина бандажа.

Для бандажа тепловоза, имеющего толщину  $B = 75$  мм,  $d = 900$  мм,  $d_1 = 835$  мм,  $d_2 = 1050$  мм,  $\ell = 112$  мм,  $\mu = 0,3$ ,  $E_1 = E_2 = 22 \cdot 10^4$  МПа, натяг  $\delta = 1,45$  мм, крутящий момент  $M_{\max} = 761$  кН·м.

В табл. 2 представлены результаты расчета крутящего момента  $M_{\max}$ , при котором бандаж может повернуться относительно центра колеса, и моментов  $M_{t,p}$ , действующих в зоне посадки бандажа на центр. При расчете учтены динамические нагрузки в соединении «колесный центр — бандаж» колеса тепловоза. Расчет выполнен для случая, когда модули упругости материалов соединяемых деталей одинаковы.

В интервале толщин бандажа от 33 до 75 мм при скоростях движения 70—130 км/ч момент  $M_{t,p}$ , действующий в зоне посадки бандажа на колесный центр, меньше момента  $M_{\max}$ , при котором возможен проворот бандажа. Следовательно, соединение при указанных условиях эксплуатации будет работать надежно, вероятность проворота бандажа исключена.

**Таблица 2 — Расчетные значения крутящих моментов в соединении «колесный центр — бандаж» колеса тепловоза при  $E/E_o = 1$**

$B, \text{мм}$	75		33	
$\delta, \text{мм}$	1,45		1,45	
$v, \text{км/ч}$	70	130	70	130
$P_{ct} + P_{\text{доп}}, \text{кН}$	3151	3878	3151	3878
$M_f, \text{кН}\cdot\text{м}$	422	515	388	473
$M_{\max}, \text{кН}\cdot\text{м}$	761	761	550	550
$M_{\tau_{II}}, \text{кН}\cdot\text{м}$	362	441	361	440

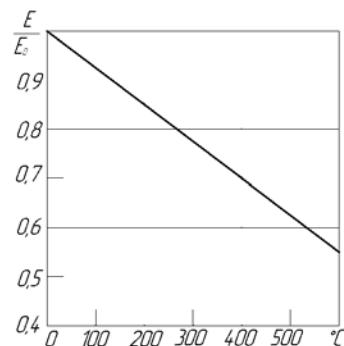
Рассмотренные выше эксплуатационные нагрузки являются механическими. При колодочном торможении локомотива на колесо воздействуют тепловые нагрузки. Нагрев тормозных колодок и колес приводит к постепенному тепловому расширению бандажа и уменьшению натяга формирования. Неравномерный нагрев колеса приводит к перепаду температур в зоне контакта бандажа и колесного центра. Температура бандажа через 6—7 торможений повышается до 350—550°C, в колесном центре в месте посадки бандажа — до 130—200°C [5].

Повышение температуры оказывает влияние на величину модуля упругости  $E$  [6]. На рис. 3 приведена зависимость безразмерного модуля упругости  $E/E_o$  для углеродистой стали от температуры ( $E_o$  — модуль упругости материала детали при температуре окружающей среды,  $E$  — при повышенной температуре детали).

При повышении температуры бандажа до 500°C модуль упругости материала снижается до  $13,68 \cdot 10^4$  МПа, что вызывает уменьшение удельного контактного давления примерно на 22%. Это приводит к уменьшению величины крутящего момента, при котором может произойти проворот бандажа. Из табл. 3 следует, что для бандажа, имеющего толщину 33 мм, погоженного с натягом 1,45 мм при  $E/E_o = 0,63$ , момент  $M_{\max} = 428$  кН·м. При скорости движения 130 км/ч момент, необходимый для реализации силы тяги, приведенный к поверхности сопряжения бандажа и центра колеса тепловоза,  $M_{\tau_{II}} = 442$  кН·м, т. е.  $M_{\max} < M_{\tau_{II}}$ . В этом случае возможен проворот бандажа.

## Литература

- Бородин А.В., Здор Г.П., Ярышева Л.В. Анализ прочности соединения «колесный центр — бандаж» колеса тепловоза // Известия Транссиба. 2012. № 1(9). С. 8—12.
- Волков Н.Н., Родзевич Н.В. Подшипники качения колесных пар вагонов и локомотивов. М.: Машиностроение, 1990. 168 с.
- Тепловоз 2ТЭ116 / Филонов С.П., Гибалов А.И., Никитин Е.А. и др. М.: Транспорт, 1996. 334 с.
- Прочность, устойчивость колебания: Т. 2 / под общ. ред. И.А. Биргера, Я.Г. Пановко. М.: Машиностроение, 1968. 831 с.
- К вопросу образования наваров на поверхности катания колеса / Нестеренко В.И., Левандовский В.А., Ажиппо А.Г. и др. // Вісник СМУ ім В. Даля. 2010. № 5 (147). С. 97—101.
- Шапин В.И. Сопротивление материалов. Иваново: Ивановский гос. энергетический ун-т, 2011. 344 с.



**Рисунок 3 — Зависимость модуля упругости от температуры**

**Таблица 3 — Расчетные значения крутящих моментов в соединении «колесный центр — бандаж» колеса тепловоза при  $E/E_o = 0,63$**

$B, \text{мм}$	75		33	
$\delta, \text{мм}$	1,45		1,45	
$v, \text{км/ч}$	70	130	70	130
$P_{ct} + P_{\text{доп}}, \text{кН}$	3151	3878	3151	3878
$M_f, \text{кН}\cdot\text{м}$	421	515	388	474
$M_{\max}, \text{кН}\cdot\text{м}$	542	542	428	428
$M_{\tau_{II}}, \text{кН}\cdot\text{м}$	362	441	361	442

Таким образом, полученные результаты свидетельствуют, что эксплуатационные факторы только механического характера не являются причиной проворота бандажа относительно центра колеса тепловоза.

Проворот бандажа возможен при совместном действии эксплуатационных нагрузок механического и теплового воздействия. Тепловое воздействие при торможении локомотива является определяющим для снятия натяга в соединении.

## References

1. Borodin A. V., Zdor G. P., Yarysheva L. V.. Analiz prochnosti soedineniya «kolyosnyi tsentr — bandazh» kolesa teplovoza [Analysis of strength of “wheel center - band” connection of locomotive wheels] // Izvestiya Transsib. 2012. No.1(9). p. 8 — 12.
2. Volkov N. N., N. V. Rodzovich. Podshipniki kacheniya kolesnykh par vagonov i lokomotivov. [Roller bearings of car and locomotive wheelsets] M.: Mashinostroenie, 1990. 168 p.
3. Teplovoz 2TE116 [Diesel locomotive 2TE116] / S. P. Filonov, A. I. Gibalov, E. A. Nikitin et al. M.: Transport, 1996. 334 p.
4. Prochnost, ustoychivost kolebaniya [Strength, oscillation resistance]: Vol. 2 / General editor: I. A. Birger, Ya. G. Panovko. M.: Mashinostroenie, 1968. 831 p.
5. K voprosu obrazovaniya navarov na poverkhnosti kataniya kolesa / Nesterenko V. I., Levandovskiy V. A., Azhippo A. G. et al. // Visnik SMU im V. Dalja. 2010. No. 5 (147). p. 97 — 101.
6. Shapin V. I. Soprotivlenie materialov. [Strength of Materials.] Ivanovo: Ivanovo State Energy University, 2011. 344 p.



УДК 625.111

**Виталий Алексеевич Бучкин, доктор технических наук, профессор кафедры «Изыскания и проектирование железных дорог» Московского государственного университета путей сообщения (МИИТ),**

**Елена Павловна Ленченкова, аспирант кафедры «Изыскания и проектирование железных дорог» Московского государственного университета путей сообщения (МИИТ),**

**Екатерина Александровна Рыжик, кандидат технических наук, доцент кафедры «Изыскания и проектирование железных дорог» Московского государственного университета путей сообщения (МИИТ)**

## БАЗОВЫЙ ФУНКЦИОНАЛ САПР ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ

**Vitaliy A. Buchkin, DSc in Engineering, Professor of the Department «Railway Location Survey and Design», Moscow State University of Railway Engineering (MIIT),**

**Elena P. Lenchenkova, postgraduate student of the Department «Railway Location Survey and Design», Moscow State University of Railway Engineering (MIIT),**

**Ekaterina A. Ryzhik, PhD in Engineering, Associate Professor of the Department «Railway Location Survey and Design», Moscow State University of Railway Engineering (MIIT)**

## Basic Functionality Of CAD For Railway Industry

### Аннотация

Выявлены и сформулированы необходимые и достаточные компоненты базового функционала программных комплексов для проектирования железных дорог, приведено их описание, а также раскрыта актуальность присутствия данных элементов в программном комплексе.

Приведены результаты сравнительного анализа реализации базового функционала САПР железных дорог в программных комплексах, используемых в проектных институтах. Представлен требуемый и желаемый уровень реализации функционала. Данна оценка перспектив развития функционального потенциала программных комплексов.

**Ключевые слова:** базовый функционал, нормативная база, библиотека типовых решений, геометрический конструктор для создания и редактирования элементов, неправильный пикет/километр.

### Abstract

The necessary and sufficient components of the basic functionality of software systems for the design of railways are identified, formulated and described, and the relevance of the presence of these elements in the software package is shown.

The results of the comparative analysis of implementation of the basic functionality of CAD for railways in the software systems used by design institutes are provided. The required and desired level of implementation of the functionality is presented. Prospects for the development of functional potential of software systems are assessed.

**Keywords:** base functionality, regulatory framework, library of standard solutions, geometric designer for creating and editing elements, wrong picket / kilometer.

Программные комплексы (ПК) Credo (НПО «Кредо-Диаглог», Беларусь), «Robur — Железные дороги» («Топоматик», Россия), MXRail (Bentley Systems, Inc, США), Geonics ЖЕЛДОР (CSoftDevelopment, Россия), Card/1 (IB&T GmbH, Германия), AutoCAD Civil 3D (Autodesk, Inc., США), САПР КРП (Иркутскжелдорпроект, Россия), Ferrovia (CGS plus d.o.o., Словения) не обеспечивают полную автоматизацию разработки комплексных проектов железных дорог. Основным и, как правило, единственным объектом автоматизированного проектирования во всех ПК является трасса железнодорожного пути, проект реализуется более или менее полно по следующим разделам:

- план и продольный профиль (направление и общее очертание трассы с размещенными раздельными пунктами считаются заданными);
- земляное полотно (конструкция, объемы работ);
- верхнее строение пути (объем материалов);
- станции и узлы (план и продольный профиль станционных путей, размещение устройств соединений и пересечений путей).

Единственным исключением является MXRAIL, включающий ПК BentleyRailOverheadLine и BentleySubstation, предназначенные в интеграции с ПК BentleyRailTrack для проектирования электрификации железных дорог.

Для входа в линейку программных продуктов для проектирования железных дорог ПК должен располагать некоторым минимальным (базовым) проектным функционалом, включающим следующие компоненты:

1. Поддержка российской (национальной) нормативной базы.
2. Поддержка российских (национальных) стандартов оформления выходных документов.
3. Библиотеки типовых решений по земляному полотну, малым водопропускным сооружениям, верхнему строению пути и т. п.

4. Геометрический конструктор для создания и редактирования элементов плана линии.
5. Геометрический конструктор для создания и редактирования элементов продольного профиля.
6. Автоматическое отображение зависимости «пикет-смещение» (графики сдвигов, габаритов, междупутий).
7. Проектирование железнодорожных кривых (возвышение наружного рельса, уширение колеи, балластной призмы, земляного полотна, габаритное уширение, отводы возвышения и уширений).
8. Отображение, размещение и редактирование специальных объектов железнодорожного пути (стрелочных переводов, съездов и т. п.).
9. Ведение пикетажа (километража).
10. Автоматическое получение существующего (черного) и геометрический конструктор проектного (красного) по-перечника.
11. Автоматический расчет объемов работ и материалов.
12. Проектирование дополнительных главных (станционных) путей.

Не все ПК, позиционируемые на рынке в качестве программных средств для проектирования железных дорог, поддерживают его в полном объеме.

## 1. Поддержка российской нормативной базы

Подключение национальной, в том числе российской, нормативной базы во всех ПК носит формальный характер. Программное обращение к нормативной базе не предусмотрено. Все нормы проектирования явно задаются проектировщиком, и контроль за их соблюдением полностью лежит в сфере его ответственности.

При проектировании плана и продольного профиля железных дорог — объектов, геометрией которых проектировщик управляет в интерактивном режиме, соблюдение норм проектирования действительно контролируется системой, и в случае выхода параметров элементов плана или продольного профиля за предельные значения выводится соответствующее предупреждение.

Однако это не подключение национальной нормативной базы. Ограничения предельных (верхних и нижних) значений величин радиусов круговых кривых, длин и крутизны уклонов элементов продольного профиля должны быть реализованы всегда, на всех железных дорогах. Национальные нормативы различаются лишь по значениям этих ограничений. В России, например, они нормируются в зависимости от категории железной дороги по нормам проектирования и полезной длины приемо-отправочных путей, но этих данных в системе нет, и правильность использования нормативов ею не контролируется.

Единственное исключение — в систему обычно вводятся данные о габарите подвижного состава, очертание которого отображается на поперечных профилях. Наличие данных о габарите подвижного состава можно считать единственным системным обращением к нормативной базе во всех ПК.

## 2. Поддержка российских стандартов оформления выходных документов

Задача проектировщика — создание цифрового прототипа (модели) объекта проектирования с обеспечением всех

требований его эксплуатационной надежности, безопасности и бесперебойности движения поездов и т. п. При этом обеспечение соответствия отображения этого прототипа на чертежах тем или иным стандартам оформления не является задачей проектировщика — это другая предметная область.

Если полноценное подключение нормативной базы программно не реализовано ни в одном из известных ПК, то база стандартов оформления выходной документации во всех известных ПК программно реализована — это трудоемкая, но несложная задача.

Обычно именно подключение базы стандартов оформления выходной документации, прежде всего чертежей, и определяется в сертификатах как подключение национальной нормативной базы.

## 3. Библиотеки типовых решений

Единственным реальным объектом проектирования во всех ПК для проектирования железных дорог в настоящее время является трасса железнодорожного пути (план, продольный и поперечные профили).

В проектах применяются следующие виды поперечных профилей земляного полотна:

- типовые — нормальные и специальные;
- специальные (региональные);
- индивидуальные;
- групповые.

Типовые нормальные поперечные профили земляного полотна принимают без расчетов. Производится их привязка к местным условиям.

Специальные типовые поперечные профили применяются аналогично нормальным, но отличаются от них тем, что являются типовыми лишь для определенных районов — распространения подвижных песков, лессов, скальных пород, болот глубиной до 3—4 м и т. д.

Индивидуальные поперечные профили проектируются для конкретных объектов земляного полотна, обосновываются данными детальных инженерно-геологических обследований и необходимыми расчетами; они используются для устройства земляного полотна в сложных геологических условиях, при разработке выемок взрывами и всегда при высоте откосов более 12 м.

Групповые поперечные профили занимают промежуточное положение между индивидуальными и типовыми. Они разрабатываются для участков со сложными, но многократно повторяющимися на данной линии природными условиями и требуют индивидуального обоснования.

Желательно включение в состав ПК библиотек шаблонов типовых решений по поперечным профилям земляного полотна, малым водопропускным сооружениям, а также по конструкциям балластной призмы и т. п.

Для автоматизированного проектирования индивидуальных поперечных профилей (и проверки применимости типовых) необходимы специальные программные средства — расчет на прочность и устойчивость, расчет осадки насыпи на слабом основании и др. Единственный ПК, в котором такие расчеты выполняются в единой информационной среде с проектированием трассы, — это система Credo. В этой системе можно также подобрать типы и размеры малых водопропускных сооружений. В других ПК такого функционала нет.

#### **4. Геометрический конструктор для создания и редактирования элементов плана линии**

В ПК необходимо наличие геометрического конструктора для создания модели плана и корректировки параметров его элементов во всем многообразии комбинаций последовательностей прямых, круговых и переходных кривых (клоид), а также корректировки композиции данных элементов (дление, объединение, вставка, удаление). В большинстве ПК такой конструктор реализован.

В рамках функционала работы с проектом трассы должны быть обеспечены следующие возможности:

- редактирование трасс;
- ввод и отслеживание контурных ограничений;
- редактирование трасс при блокировке параметров их отдельных элементов;
- вписывание произвольных фрагментов трасс при блокировке элементов (с указанием условий вписывания) как средства решения на этой основе множества прикладных задач проектирования.

Расчет параметров элементов плана существующих железнодорожных путей — одна из наиболее трудоемких и массовых задач в практике проектирования реконструкции (модернизации) железных дорог, ремонтов пути. Данная функция более или менее успешно поддерживается во всех ПК для проектирования железных дорог.

Подбор параметров элементов плана — первый шаг в технологической цепочке разработки проекта реконструкции трассы железных дорог, ремонтов пути. От уровня реализации данного функционала существенно зависит общая оценка проектировщиками любого ПК для проектирования реконструкции железных дорог.

#### **5. Геометрический конструктор для создания и редактирования элементов продольного профиля**

При создании конструктора продольного профиля железных дорог следует учитывать специфику проектирования железных дорог (для части ПК это актуально). Вертикальные кривые устраиваются на железных дорогах (в отличие от автодорог) за счет профилирования балластной призмы.

Проектирование продольного профиля новых железных дорог ведется в уровне бровки земляного полотна, и вертикальные кривые здесь не учитываются. Проектирование продольного профиля при реконструкции железных дорог, ремонтах пути ведется в уровне головки рельса, и вертикальные кривые учитываются, но лишь при условии, что поправка от вертикальной кривой превышает 0,01 м. Это условие должно соблюдаться автоматически.

Многие ПК имеют встроенный функционал для автоматической укладки проектной линии продольного профиля железных дорог.

#### **6. Автоматическое отображение зависимости «пикет-смещение» (графики сдвигов, габаритов, междупутий)**

На железных дорогах каждый путь — объект (можно считать объектом и каждую рельсовую нить). На станциях таких объектов может быть десятки и сотни. Расположение железнодорожных путей должно удовлетворять нормативным требованиям по междупутьям, горизонтальным и вертикальным габаритам.

При реконструкции железных дорог проектируемый путь располагается в крайне узком коридоре, определяемом вертикальными и горизонтальными габаритами, а также междупутьями. Смещения пути (сдвиги в вертикальной и горизонтальной плоскостях) не должны выходить за пределы этого коридора и должны постоянно контролироваться.

В проектах реконструкции железных дорог, ремонтов пути данный функционал должен автоматически поддерживаться для множества трасс и обеспечивать возможность отображения этих данных в системе координат трассы.

#### **7. Проектирование железнодорожных кривых**

Чтобы предотвратить чрезмерные силовые воздействия на пассажиров и путь, а также обеспечить более равномерное воздействие подвижного состава на рельсы обеих нитей, на круговых кривых пути устраивается возвышение наружного рельса над внутренним.

На смежных путях в кривых междупутье увеличивается на величину габаритного уширения, зависящего от радиуса кривой, возвышений наружного рельса и их разности. Начиная с некоторого радиуса, увеличивается ширина внешнего плеча балластной призмы и основной площадки земляного полотна.

Исходными данными для расчета возвышения наружного рельса и многих других геометрических параметров рельсовой колеи являются скорости движения поездов. Возможность подключения и анализа данных о скоростях движения поездов реализована только в ПК Card/1 (Германия). Включение в состав ПК модуля для выполнения тягового расчета крайне желательно.

#### **8. Отображение, размещение и редактирование специальных объектов железнодорожного пути**

В ПК для проектирования железных дорог должна поддерживаться работа со специальными объектами, применяемыми в железнодорожных путях, — стрелочными переводами и съездами.

Большинство ПК для проектирования железных дорог поддерживает функцию вставки стрелочного перевода. В этих ПК имеется встроенная библиотека стандартных стрелочных переводов.

Большинство ПК для проектирования железных дорог поддерживает функцию вставки съезда.

При проектировании реконструкции плана существующих железных дорог возникает необходимость описания угловых соединений прямых — сопряжения прямых под углом без устройства круговой кривой (при малых углах поворота). На большинстве железных дорог мира угловое соединение прямых — элемент плана линии. Функционал для работы с угловым соединением прямых как с элементом плана реализован только в САПР КРП (Россия).

#### **9. Ведение пикетажа (километража)**

В ПК для проектирования железных дорог должно поддерживаться ведение пикетажа с учетом неправильных пикетов (их длина не равна стандартным 100,00 м), причем в соответствии с практикой, принятой в национальной (российской) школе проектирования.

Во всех ПК принят формат расстояний по оси пути — «пикет + плюс». Поддержка учета неправильных пикетов обычно реализуется.

В организациях, эксплуатирующих железнодорожные пути, например ОАО «РЖД», пикетажные привязки имеют формат «километр + пикет + плюс». Все базы данных Российской железной дороги используют такой формат пикетажа (километра). Это связано с тем, что на дорогах кроме неправильных пикетов, длина которых не равна стандартным 100 м, имеются и неправильные километры, длина которых не равна стандартным 1000 м (рис. 1). В неправильном километре число пикетов не равно 10 (0—9).

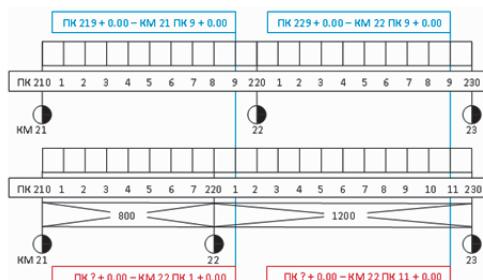


Рисунок 1 — Неправильные километры

Поддержка ведения пикетажа при наличии неправильных километров во всех ПК отсутствует.

Преобразование проектного пикетажа в эксплуатационный в проектах реконструкции (модернизации), ремонтов пути крайне затруднено.

## 10. Автоматическое получение существующего (черного) и геометрический конструктор проектного (красного) поперечника

Поперечники обычно строятся по нормали к оси пути и определяют конструкцию земляного полотна и верхнего строения пути. Построение таких поперечников должно производиться автоматически в любой точке пути, заданной пикетажем, а также в любом диапазоне пикетов с заданным шагом.

Для отображения продольного профиля объектов, пересекающих путь под углом, строятся косые поперечники. Ось поперечника может представлять собой и ломаную линию. Такие поперечники также должны строиться автоматически по заданному направлению.

Проектный поперечник должен формироваться автоматически с возможной доводкой в интерактивном режиме.

В подавляющем большинстве ПК библиотеки шаблонов типовых конструкций проектных поперечных профилей отсутствуют. Такую библиотеку пользователь создает самостоятельно — одни и те же шаблоны создаются всеми пользователями, с этого начинается работа над проектом.

Создание библиотеки типовых поперечников (и конструкций других элементов железнодорожного пути) в составе ПК — простая задача и должна быть реализована.

## 11. Поддержка автоматического расчета объемов

Автоматический расчет профильных объемов земляного полотна реализован во всех ПК для проектирования новых

железных дорог. Автоматический расчет объемов земляных работ при укладке дополнительных главных (станционных) путей не реализован.

Расчет объемов должен производиться автоматически как на участке в целом, так и на его части, заданной пикетажем границ.

Верхнее строение пути состоит из рельсошпальной решетки, балластной призмы и путевых устройств для скрещения и пересечения путей — стрелочных переводов. В части ПК реализован расчет объемов материалов верхнего строения пути.

## 12. Укладка дополнительных главных и станционных путей

Дополнительный путь укладывается обычно на совмещенном земляном полотне — пристраивается к существующему пути. На отдельных участках возможен вынос трассы дополнительного пути на раздельное земляное полотно. На прямых дополнительный путь располагается параллельно существующему на минимальном междупутье, в кривых — концентрично существующему пути с учетом габаритного уширения междупутья.

Специфическим объектом при проектировании дополнительных путей является переключение сторонности дополнительного пути, которое может выполняться на прямой или на кривой (рис. 2).

Функционал для проектирования трассы дополнительных главных (станционных) путей отсутствует во всех ПК.

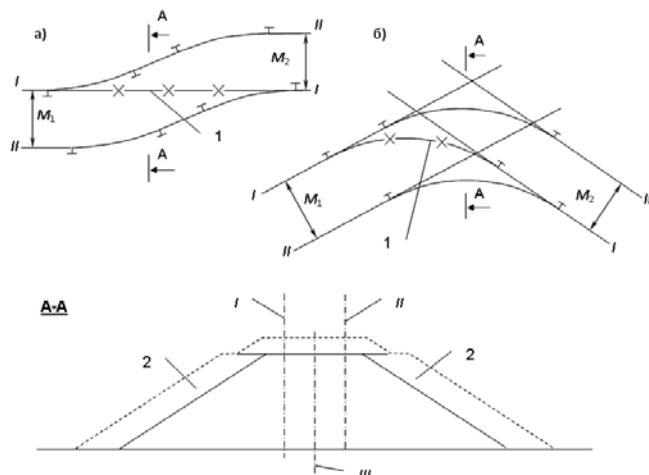


Рисунок 2 — Перемена сторонности второго пути на прямой (а) и на кривой (б): 1 — разбираемый участок существующего пути; 2 — уширение существующего земляного полотна; I и II — положение осей первого и второго путей; III — ось существующего пути; M<sub>1</sub>, M<sub>2</sub> — проектные междупутья

## Заключение

Описан минимальный (необходимый и достаточный) функционал, реализация которого позволяет в основном удовлетворить потребности проектировщика при разработке разделов «Продольный профиль и план пути» и (в меньшей степени) «Земляное полотно» проектов новых и реконструкций (модернизации) существующих железных дорог.

Результаты анализа реализации данного функционала в различных ПК представлены в табл. 1.

Все рассмотренные ПК позволяют создать цифровую модель местности и привязать к ней 3D-модель трассы железнодорожного пути, произвести расчет профильного объема земляных работ, вывести на чертеж план линии, продольный и поперечные профили, визуализировать и анимировать данную 3D-модель.

При этом все элементы конструкции железнодорожного пути принимаются без расчета, и никаких гарантий эксплуатационной надежности их применения в пределах функционала ПК получено быть не может.

Исключением является только ПК Credo, в составе которого имеются расчетные модули.

Исключением также является ПК MXRail, в составе которого имеются модули для проектирования и расчета системы электрификации железных дорог, т. е. впервые реализован выход за пределы работы только с геометрическим образом трассы, частью одного из разделов комплексного проекта железной дороги.

Отсутствие расчетных модулей, типичное в настоящее время для ПК проектирования железных и в меньшей степени автомобильных дорог, не распространяется на ПК для проектирования других инженерных сооружений, а также машин и механизмов, где расчетные модули являются обязательным

элементом и реализован выход на уровень цифрового прототипа объекта.

Это, вероятно, связано с несопоставимыми емкостями рынка ПК для проектирования железных дорог и, например, ПК для проектирования промышленных и гражданских зданий. Разработка ПК требует привлечения значительных ресурсов (люди, время, деньги). Затраты должны окупиться. Факт и срок окупаемости зависят от емкости рынка.

Все рассмотренные ПК с пользовательской точки зрения примерно равнозначны. Достигнут определенный предел развития функционала в рамках единой для всех ПК концепции интерактивной работы с трассой линейного объекта. Различие наблюдается только в уровне удобств, предоставляемых пользователю при решении тех или иных частных задач.

Дальнейшее развитие функционала САПР железных дорог требует привлечения стартовых ресурсов, интеллектуальных и материальных, и может происходить по инновационному и/или экстенсивному сценариям.

Продвижения в данном направлении следует прежде всего ожидать от компаний, специализирующихся в области разработки программного обеспечения для проектирования линейных сооружений по прямым заказам проектных организаций, и в меньшей степени от компаний, специализирующихся в области разработки универсального (платформенного) программного обеспечения.

**Таблица 1 — Реализация базового функционала САПР железных дорог в программных комплексах**

№	Элемент функционала	CREDO	MXRAIL	CARD/1	FERROVA	Robur Rail	САПР КРП	Geonics Желдор	AutoCAD Civil 3D
		● - -	● - -	● - -	● - -	● - -	● - -	● - -	● - -
1	Поддержка нормативной базы	● - -	● - -	● - -	● - -	● - -	● - -	● - -	● - -
2	Поддержка стандартов оформления выходных документов	● ● ●	● ● ●	● ● ●	● ● ●	● ● ●	● ● ●	● ● ●	● ● ●
3	Поддержка библиотек типовых решений по земляному полотну и малым водопропускным сооружениям	● - -	● - -	● - -	● - -	● - -	● - -	● - -	— - -
4	Поддержка геометрического конструктора для создания и редактирования элементов плана линии: - проекты новых линий - проекты реконструкции существующих линий	● ● ● ● ● -	— - -	● ● ● ● ● -	● - -				
5	Поддержка геометрического конструктора для создания и редактирования элементов продольного профиля: - интерактивный режим - автоматический режим	● ● - ● - -	● ● ● ● ● -	● ● - ● - -	● ● - ● - -				
6	Поддержка автоматического отображения зависимости «пикет-смещение» (графики сдвигов, габаритов, междупутий)	● - -	● ● ●	● ● ●	● ● ●	● ● ●	● ● ●	● ● ●	— - -
7	Расчет возвышения наружного рельса и сопряженные расчеты	— - -	● ● ●	● ● ●	● ● ●	● ● ●	● ● ●	● ● ●	— - -
8	Поддержка отображения, размещения и редактирования специальных объектов железнодорожного пути	● - -	● ● ●	● ● ●	● ● ●	● ● ●	● ● ●	● ● ●	— - -
9	Поддержка ведения пикетажа (километража)	● ● -	● ● -	● ● -	● ● -	● ● -	● ● -	● ● -	● ● -
10	Поддержка автоматического получения существующего (черного) и геометрического конструктора проектного (красного) поперечника в проектах реконструкции	● - -	● - -	● - -	● - -	● - -	● ● ●	● ● ●	● - -
11	Поддержка автоматического расчета объемов	● ● -	● ● ●	● ● ●	● - -	● - -	● ● ●	● ● ●	● ● -
12	Укладка дополнительных главных и станционных путей	— - -	— - -	— - -	— - -	— - -	— - -	— - -	— - -
	Использование в России	да	да	нет	нет	да	да	да	да

Уровень реализации: ● ● ● хороший, ● ● удовлетворительный, ● низкий, - - - отсутствует.

УДК 639.4.015

Александр Васильевич Сосновских, ведущий научный сотрудник ЗАО НПП «ТОРМО»,  
 Валерий Викторович Трошков, инженер ЗАО НПП «ТОРМО»,  
 Александр Серафимович Шишмаков, доктор технических наук, профессор, научный консультант ЗАО НПП «ТОРМО»

## РАЗВИТИЕ ВЫСОКОСКОРОСТНОГО ДВИЖЕНИЯ ПОЕЗДОВ И ТЕХНОЛОГИЯ КОНТРОЛЯ СОСТОЯНИЯ СТЫКОВ РЕЛЬСОВ НА ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГАХ РОССИИ

Alexander V. Sosnovskikh, Lead Researcher of CJSC NPP "TORMO",  
 Valeriy V. Troshkov, Engineer of CJSC NPP "TORMO",  
 Alexander S. Shishmakov, DSc in Engineering, Professor, Scientific Adviser of CJSC NPP "TORMO"

## Development Of High-Speed Train Traffic And Rail Joint Monitoring Technology In Russian Railways

### Аннотация

Приведены результаты экспериментального исследования динамического воздействия рельсовых стыков на подвижной состав. Наличие высоких (более 60g) ускорений буксового узла указывает на наличие сверхнормативных отклонений в состоянии пути и сильного динамического действия на рельсы и детали подвижного состава. Для идентификации состояния рельсового пути предложено создать технологию динамического контроля пути на базе имеющихся у авторов разработок и математического аппарата.

**Ключевые слова:** рельсовые стыки, ускорение буксового узла, динамическое воздействие в системе «колесо — стык», технология контроля состояния стыков.

### Abstract

The results of experimental study of dynamic effects of rail joints on rolling stock are provided. The presence of high (more than 60G) accelerations of axle unit indicates the presence of overstandard deviations in track condition and strong dynamic effects on tracks and rolling stock parts. To identify the condition of the track it is suggested to create a dynamic track monitoring technology on the basis of the authors' developments and mathematical apparatus.

**Keywords:** rail joints, acceleration of axle unit, dynamic effects in wheel-joint pair, joint monitoring technology.

Необходимость строительства высокоскоростных магистралей зафиксирована в ряде федеральных и отраслевых стратегий [1], а в ОАО «РЖД» созданы и работают специальные подразделения, которые занимаются реализацией таких проектов, в первую очередь на маршруте Москва — Санкт-Петербург — Хельсинки.

В настоящий момент в стадии предпроектной разработки находится проект ВСМ-2 на маршруте Москва — Нижний Новгород — Казань — Екатеринбург протяженностью 1595 км.

Направление на Екатеринбург проходит по территориям с континентальным климатом, при этом температуры воздуха могут изменяться от  $-50^{\circ}\text{C}$  зимой до  $+40^{\circ}\text{C}$  летом. Осенью и весной порой наблюдаются перепады температуры на  $15 - 20^{\circ}\text{C}$  в течение суток.

Это создает дополнительные трудности при проектировании и эксплуатации железнодорожных магистралей, особенно при укладке бесстыкового пути [2]. В зимний период наблюдается смещение рельс, увеличение зазора в стыках между рельсами, повышение жесткости верхнего строения пути. Учесть все климатические особенности региона и их влияние на путь — самый сложный вопрос при строительстве высокоскоростных магистралей.

Известно [3], что наличие неровностей на рельсовом пути, увеличение стыкового зазора приводят к повышенному динамическому воздействию как на рельсовый путь, так и на детали подвижного состава, что при определенных условиях может вызывать их разрушение.

В статье приведены результаты исследования реального состояния пути и его воздействия на колесные пары вагонов в процессе опытных поездок, проведенных в летний и зимний периоды на маршруте Владивосток — Москва.

Изучение состояния рельсовых стыков проводилось при помощи акселерометров, установленных на буксах пассажирских вагонов, что позволило измерить ускорение буксы при прохождении стыков и стрелочных переводов. Результаты измерений представлены на рис. 1.

В результате исследований было выявлено, что на одних и тех же участках магистралей амплитуда ударов

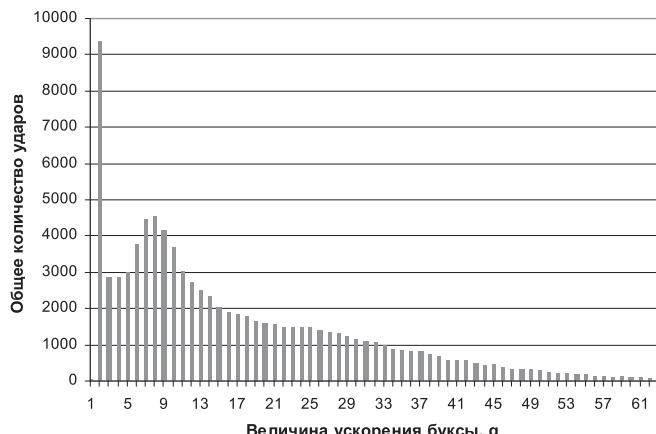


Рисунок 1 — Распределение ускорений буск колесной пары при ударе во время прохождения колесом стыка рельса и стрелочных переводов (на базе 88,5 тыс. ударов)

колеса на стыках зимой возрастает до 5 раз, а максимальные ускорения превышают 60г (сила удара может превышать 400 кН) (рис. 2). Аналогичные данные приводятся в работе [4].

Для оценки динамического воздействия величина ускорения пересчитывалась в величину усилия, приложенного к колесу и передаваемого на боковую раму тележки, по формуле  $F = m \cdot a$ , где  $a$  — измеренное ускорение,  $m$  — неподрессоренная масса, т. е. масса половины колесной пары с буксой (около 650 кг).

Ускорение в 60г соответствует силе 400 кН, приложенной к колесу и рельсу. Аппаратура регистрировала максимальные ускорения до 64г, поэтому реальное значение ускорения при отдельных ударах могло быть значительно больше зарегистрированной величины.

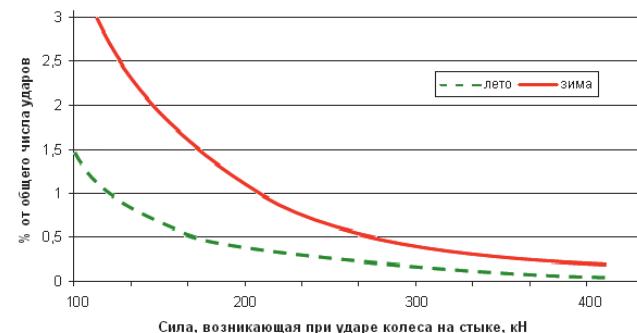


Рисунок 2 — Распределение усилий, возникающих на стыках в зимний и летний периоды

Расчеты, проведенные в работе [3], показали, что при движении колеса по стыковому зазору шириной 5 см возникает ускорение порядка 40г. Следует отметить, что, согласно Инструкции по текущему содержанию железнодорожного пути ЦП-744 [5], на дорогах РФ допускается зазор в стыке не более 26 мм, а высота ступеньки между рельсами — не более 1 мм. Зафиксированные в нашем исследовании зна-

чения ускорения порядка 60г и более свидетельствуют о наличии в стыках рельс сверхнормативных зазоров или ступенек.

Измеренные при исследованиях ускорения колесной пары могут вызывать у тележки грузового вагона, не имеющего первой ступени буксового подвешивания, еще большие усилия, передаваемые на боковую раму.

Рессорный комплект тележки 18-100 под действием nominalной нагрузки должен развивать усилие около 212 кН. Рабочий ход идеального рессорного комплекта рассчитан на усилия до 380 кН. Следовательно, до 0,1% всех ударов колеса по стыкам летом и до 0,25% зимой будут приводить к пробою рессорного комплекта тележки 18-100 и, как следствие, к перегрузкам литых деталей тележки и верхнего строения пути.

Наибольшее увеличение динамического воздействия от стыков рельса зимой происходит на длинных пластинах. На рис. 3 приведен фрагмент диаграммы поездки по Восточно-Сибирской ж.д., на которой зарегистрировано ускорение колеса вагона как при движении по пути на длинных рельсовых пластинах, так и по пути на рельсах стандартной длины.

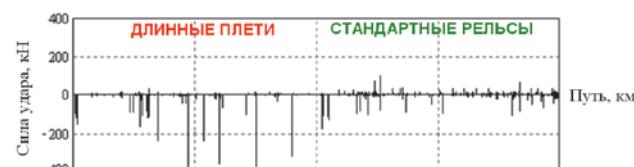


Рисунок 3 — Фрагмент рабочей записи ускорений буксового узла при движении на длинных рельсовых пластинах и стандартных рельсах

При движении по пути на длинных рельсовых пластинах наблюдаются редкие, но интенсивные удары с усилием 400 кН и более. Как показано в работе [6], если измерительная система рельса фиксирует силу удара свыше 450 кН от колесной пары, имеющей ползунки, то такая колесная пара должна быть исключена из эксплуатации для предотвращения разрушения рельсов. В нашем исследовании такие удары о стык наблюдались у колесной пары, не имеющей ползунов.

Сила ударов колеса зависит от массы неподрессоренной части тележки  $m$  и пропорциональна скорости движения вагона  $V$  [7, 8]. У высокоскоростного поезда скорость движения выше в 3 и более раз (250 км/ч и более), чем у грузового. Соответственно на том же стыке сила удара колеса высокоскоростного поезда также будет больше.

Таким образом, обнаружение стыков, оказывающих высокое динамическое действие на узлы и детали подвижного состава, особенно при высокоскоростном движении, является одной из важных задач, решение которой позволит снизить вероятность изломов в процессе эксплуатации и повысить безопасность движения.

Выявить стыки, вызывающие интенсивные удары по колесу вагона, с помощью путеизмерительной тележки невозможно. Эффект мало заметен при измерении геометрии ненагруженного стыка и проявляется только под действием веса вагона в движении. Поэтому контролировать путь необходимо

только акселерометрами, установленными на буксы вагонов или локомотивов.

Измерение при движении локомотива и вагона параметров прохождения неровностей пути и их обработка методами математического моделирования позволит произвести идентификацию отклонений, определить их причины, сделать прогноз развития дефектов и запланировать необходимые ремонтные мероприятия.

Нами накоплен опыт проведения измерений динамики взаимодействия экипажа и рельсового пути, а также раз-

работаны и уже опробованы на практике математические модели динамических процессов движения экипажа. На основании имеющихся наработок мы предлагаем разработать технологию динамического контроля состояния пути, особенно актуальную для пути на длинных рельсовых пластиях.

Предлагаемую технологию контроля и ремонта пути необходимо отрабатывать уже сегодня на существующих путях общего пользования, после чего ее применение перенести на скоростные и высокоскоростные магистрали.

## Литература

- Стратегия инновационного развития ОАО «Российские железные дороги» на период до 2015 года. Белая книга ОАО «РЖД». М., 2010.
- Бессстыковой путь / Альбрехт В.Г., Бромберг Е.М., Зверев Н.Б. и др. М.: Транспорт, 1982. 206 с.
- Коган А.Я., Никитин Д.А., Полещук И.В.. Колебания пути при высоких скоростях движения экипажей и ударном взаимодействии колеса и рельса. М.: Интекст, 2007. 168 с.
- Анисимов П.С. Испытания вагонов. М.: Маршрут, 2004. 197 с.
- Инструкция по текущему содержанию железнодорожного пути ЦП-744 / МПС РФ. М.: Транспорт, 2000.
- Обобщение передового опыта тяжеловесного движения: вопросы взаимодействия колеса и рельса: пер. с англ. / Харрис У.Дж., Захаров С.М., Ландарен Дж. и др. М.: Интекст, 2002. 408 с.
- Абдурашитов А.Ю., Аникеева А.В., Покачкий В.А. и др. Оценка влияния неровностей в зоне сварного стыка рельсов // Железнодорожный транспорт. 2011. № 12. С. 37—39.
- Вериго М.Ф., Коган А.Я. Взаимодействие пути и подвижного состава / под ред. М.Ф. Вериго. М.: Транспорт, 1986. 559 с.

## References

- Strategija innovatsionnogo razvitiya OAO Rossijiske zheleznye dorogi na period do 2015 goda. [The strategy of innovative development of JSC "Russian Railways" for the period up to 2015]. White Paper of "Russian Railways". Moscow, 2010.
- Besstykovoy put [Continuous welded track] / V.G.Albrekht, E.M.Bromberg, N.B.Zverev et al. M.: Transport, 1982, 206s.
- Kogan A.Ya., Nikitin D.A., Poleshchuk I.V.Kolebaniya puti pri vysokikh skorostyakh dvizheniya ekipazhey i udarnom vzaimodeystvii kolesa i relsa. [Track vibrations at train high speeds and impact interaction of wheel and rail.] M.: Intekst, 2007. 168 p.4. Anisimov P.S.. Ispytaniya vagonov. [Cars testing] M.: Marshrut, 2004. 197 p.
- Instruktsiya po tekushchemu soderzhaniju zheleznodorozhnogo puti TsP-744. [Instructions on routine maintenance of railway track CP-744.] MPS RF. M.: Transport, 2000.
- Obobspchenie peredovogo opyta tyazhelovesnogo dvizheniya: voprosy vzaimodeystviya kolesa i relsa: [Compilation of best practices of heavy traffic: issues of interaction between wheel and rail:] translated from English./ W.J. Harris, S.M.Zakharov, J.Landaren et al. M.: Intekst, 2002. 408 p.
- Abdurashitov A.Yu., Anikeeva A.V., Pokatskiy V.A. et al. Otsenka vliyanija nerovnostej v zone svarnogo styka relsov [Assessing the impact of irregularities in welded joint rail zone] // Zheleznodorozhny transport. 2011. No. 12. p. 37—39.
- Verigo M.F., Kogan A.Ya. Vzaimodeystvie puti i podvizhnogo sostava. [Interaction of track and rolling stock.] / Edited by M.F.Verigo. M.: Transport, 1986. 559 p.

УДК 621.317:519.24

Сергей Николаевич Чижма, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Автоматика и системы управления» Омского государственного университета путей сообщения (ОмГУПС),  
 Андрей Александрович Лаврухин, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Автоматика и системы управления» Омского государственного университета путей сообщения (ОмГУПС),  
 Виталий Степанович Циркин, инженер управления информационных технологий, Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС),  
 Евгений Витальевич Евдокимов, аспирант кафедры «Автоматика и системы управления» Омского государственного университета путей сообщения (ОмГУПС)

## МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ АНАЛИЗА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН НА ТЯГОВЫХ И ТРАНСФОРМАТОРНЫХ ПОДСТАНЦИЯХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ

Sergey N. Chizhma, PhD in Engineering, Associate Professor, Head of the Chair "Automation and Control Systems", Omsk State Transport University,

Andrey A. Lavruchin, PhD in Engineering, Associate Professor of the Chair "Automation and Control Systems", Omsk State Transport University

Vitaly S. Tsirkin, Engineer of Information Technology Directorate, Omsk State Transport University,

Evgenny V. Evdokimov, postgraduate student of the Chair "Automation and Control Systems", Omsk State Transport University

## Multifunctional Measuring System For Analysis Of Electric Parameters At Traction And Transformer Substations Of Electric Railways

### Аннотация

В статье описан многофункциональный комплекс для контроля показателей качества электроэнергии (МИК), состоящий из токовых измерительных клещей, измерительного блока и компьютера, предназначенный для анализа электрических величин на тяговых и трансформаторных подстанциях электрических железных дорог.

МИК представляет собой прибор, выполненный на базе переносного малогабаритного компьютера с достаточно простым измерительным блоком, в котором использованы стандартные и оригинальные алгоритмы определения показателей качества электрической энергии, удовлетворяющие требованиям существующих отечественных стандартов. Прибор может быть использован для экспресс-обследования и диагностики тяговых и трансформаторных подстанций электрических железных дорог.

**Ключевые слова:** показатели качества электрической энергии; средства измерений; ток; напряжение; мощность; интергармоники.

### Abstract

The article describes multifunctional complex for controlling quality indexes of electric energy, consisting of current measuring clamp, measuring block and computer, intended for analyzing electric quantities on traction and transformer substations of electric railways.

The multifunctional complex is a device, made on the basis of portable desk-size computer with a simple measuring block in which they are used standard and original algorithms for defining quality indexes of electric energy, satisfying the requirements of existing domestic standards. The device can be used for rapid examination and diagnosis of traction and transformer substations of electric railways.

**Key words:** quality indexes of electric energy; measuring means; current; voltage; power; interharmonic.

Автоматизированные системы коммерческого учета электроэнергии, внедренные в последнее время в сети железных дорог, позволяют решить вопрос учета электроэнергии. Тем не менее важным вопросом остается расширение функций анализа состояния электрических сетей, что решается с помощью приборов контроля качества электроэнергии (КЭ).

Задачи контроля качества электроэнергии определяют конкретные требования к средствам измерения (СИ). Средства контроля КЭ должны соответствовать требованиям стандартов [1—3], но перечень измеряемых параметров КЭ может быть расширен в зависимости от решаемых задач.

Существенной функциональной особенностью СИ, определяющей конструктивные и климатические требования к ним, элементную базу, систему электропитания, возможности хранения и передачи результатов измерений, является вид измерений — непрерывный или периодический.

Существующие нормативы рекомендуют проводить периодический контроль КЭ с различными интервалами между очередными контрольными измерениями. Так, согласно ГОСТ 13109-97, длительность непрерывных измерений КЭ для контроля выполнения требований этого стандарта определяется 24

часами как обязательная и семью сутками как рекомендуемая. Периодичность контроля КЭ, устанавливаемая этим стандартом, составляет в зависимости от вида показателей КЭ от двух раз в год до раза в два года. Такие же рекомендации приведены в «Методических указаниях по контролю и анализу КЭ» [4].

В целом же при определении номенклатуры параметров, измеряемых конкретными СИ, следует исходить из его назначения и области применения. Такой подход позволяет разрабатывать не универсальные приборы, а специализированные на решение определенных задач. В [4] представлено три таких задачи: анализ (или диагностика систем электроснабжения по КЭ), контроль КЭ и коммерческий учет электроэнергии с применением тарифов, зависящих от КЭ.

В [5] выделено три обобщенных цели измерения:

- экспресс-обследования электрической сети (аудит);
- непрерывный контроль за КЭ (мониторинг);
- обследование электрической сети с целью выявления причин снижения качества электропитания и выработки необходимых рекомендаций по ее улучшению.

В [6] выделены три задачи контроля качества электроэнергии: измерение, регистрация и анализ КЭ.

Анализ приведенных требований показывает, что приборы контроля качества электроэнергии можно делить на два типа: переносные и стационарные. Переносные выполняют функции экспресс-обследования и диагностики систем электроснабжения, стационарные позволяют выполнять функции регистрации и мониторинга качества электроэнергии, анализа и диагностики, принимать участие в реализации функций коммерческого учета электроэнергии с применением тарифов, зависящих от КЭ.

Для переносных приборов основные требования — минимальные габариты, надежность, малое потребление электроэнергии, возможность запоминать и хранить массивы данных для последующей передачи данных в компьютерную сеть для анализа.

Таким образом, перечень параметров в первую очередь должен основываться на ГОСТе 13109-97. Для более полного выявления режимов работы электросетей приборы должны определять токи в цепях и соответственно дополнительные параметры. Сформулируем дополнительный перечень параметров, которые совместно с основными практически полностью характеризуют состояние качества электроэнергии в электрических сетях.

Многофункциональный измерительный комплекс (МИК) должен проводить измерения и индикацию таких параметров:

- действующих значений напряжений и токов;
- активной, полной мощностей фаз и трехфазной активной мощности;
- действующих значений для основных гармоник напряжений и токов;
- активной, реактивной и полной мощностей основной частоты по всем трем фазам;
- трехфазной активной, реактивной и полной мощностей основной частоты;
- углов сдвига фаз между первыми гармониками фазных токов и напряжений;
- коэффициентов искажения синусоидальности кривой напряжений и токов;

- коэффициентов несимметрии напряжений по обратной и нулевой последовательностям;
- коэффициента мощности;
- амплитуд, фаз и коэффициентов высших гармоник напряжений и токов;
- векторных диаграмм токов и напряжений основной частоты;
- временных диаграмм токов и напряжений;
- диаграмм спектров напряжений и токов.

МИК должен обеспечивать контроль параметров при различных схемах подключения нагрузок [7].

С учетом сформулированных требований разработан и изготовлен многофункциональный измерительный комплекс, предназначенный для анализа электрических величин на тяговых и трансформаторных подстанциях электрических железных дорог.

Многофункциональный измерительный комплекс в дистанциях электроснабжения позволит оперативно измерять и анализировать электрические величины в цепях учета электрической энергии и релейной защиты, что, в свою очередь, обеспечит проверку правильности включения приборов учета электрической энергии и настройку релейных защит и повысит надежность работы устройств электроснабжения.

Комплекс предназначен для измерения действующих значений напряжений и токов в однофазных и трехфазных сетях переменного тока и проведения анализа кривых напряжений и тока с целью определения их гармонического состава, нахождения активных, реактивных и полных мощностей фаз первой и высших гармоник, коэффициентов искажения кривых напряжения и тока, коэффициентов несимметрии напряжения по обратной и нулевой (в сетях с нулевым проводом) последовательностям.

Дополнительно предусматривается функция контроля правильности включения и оценка исправности приборов учета электрической энергии и ряд других функций, необходимых для наладки и проверки схем защиты в условиях эксплуатации.

Структурная схема МИК приведена на рис. 1, внешний вид МИК — на рис. 2. Входы напряжения МИК подключаются напрямую к цепям 100/220/380 В или к трансформаторам напряжения, входы тока подключаются с помощью токовых клещей типа Fluke i5s в выходную цепь трансформаторов тока. Сигналы напряжений и токов подаются на входной нормализатор, который изменяет их величины до требуемых значений, и через аналоговый мультиплексор поступают на вход аналого-цифрового преобразователя (АЦП).

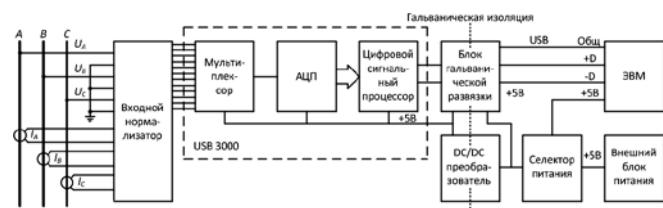


Рисунок 1 — Структурная схема МИК

С выхода АЦП цифровые сигналы передаются на вход цифрового сигнального процессора (ЦСП), выполняющего первичную обработку информации, а с него по интерфейсу USB на компьютер. Мультиплексор, АЦП и ЦСП входят в состав единого блока — восьмиканального АЦП типа USB-3000. Для обеспечения питания МИК используется напряжение 5 В от интерфейса USB или от внешнего блока питания. Выбор используемого источника автоматически осуществляется селектором питания.

Для защиты от повышенного входного напряжения ЭВМ гальванически изолирована от входных цепей с помощью блока гальванической развязки, предназначенного для передачи цифровых сигналов, выполненного на микросхемах серии ADUM, для снабжения входной части МИК питанием используется DC/DC-преобразователь с гальванической изоляцией между входом и выходом.

В качестве ЭВМ может применяться любой компьютер — как стационарный, так и переносной: ноутбук, планшетный и т. д.

Описанная реализация МИК содержит только 6 входов: 3 входа напряжения и 3 — тока, существуют варианты с 12 и с 18 входами.

Функции МИК определены прикладным программным обеспечением, в соответствии с которым выполняются следующие функции:

- измерение частоты;
- осциллографирование сигналов токов и напряжений;
- определение действующих и мгновенных значений токов и напряжений;
- определение спектров сигналов токов и напряжений и величины искажений;
- определение составляющих мощностей в электрических сетях;
- определение показателей несимметрии;

- запись профилей токов, напряжений, мощностей за заданный период с периодом усреднения, задаваемым пользователем.

МИК имеет несколько особенностей, характеризующих алгоритм его работы в некоторых режимах.

Первая особенность в том, что частота сигнала определяется с помощью быстродействующей системы фазовой автоподстройки частоты, которая позволяет определять частоту основной гармоники с точностью  $\pm 0,01$  Гц за 10 периодов [8, 9]. Этот алгоритм может быть использован при включении МИК в системы управления устройствами для улучшения качества электроэнергии, например, с помощью активных фильтров.

На рис. 3 и 4 показаны копии экранов при работе МИК в режиме отображения временных диаграмм трехфазных токов и напряжений, а также временных и векторных диаграмм по каждой фазе.

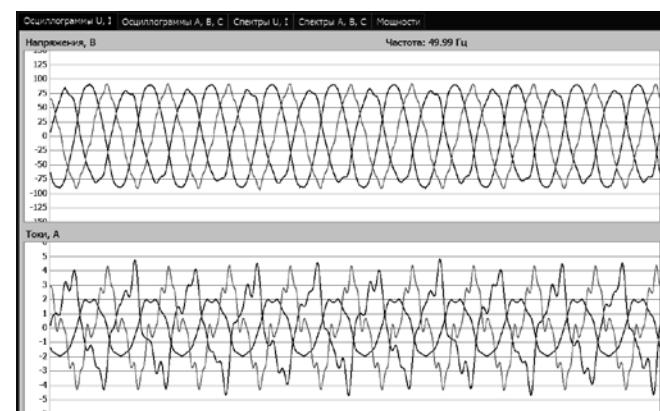


Рисунок 3 — Копия экрана МИК при работе в режиме осциллографа по всем фазам одновременно

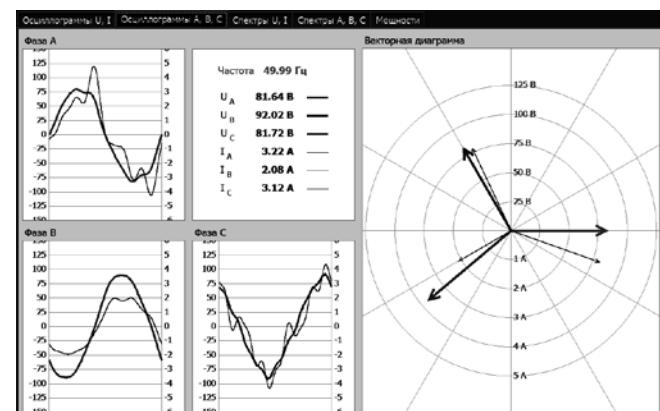


Рисунок 4 — Копия экрана МИК при работе в режиме показа временных и векторных диаграмм по каждой фазе отдельно

Второй особенностью МИК является алгоритм спектральной оценки сигналов, предусматривающий наличие значительных шумов, что может присутствовать в реальных сетях электроснабжения железнодорожного транспорта.

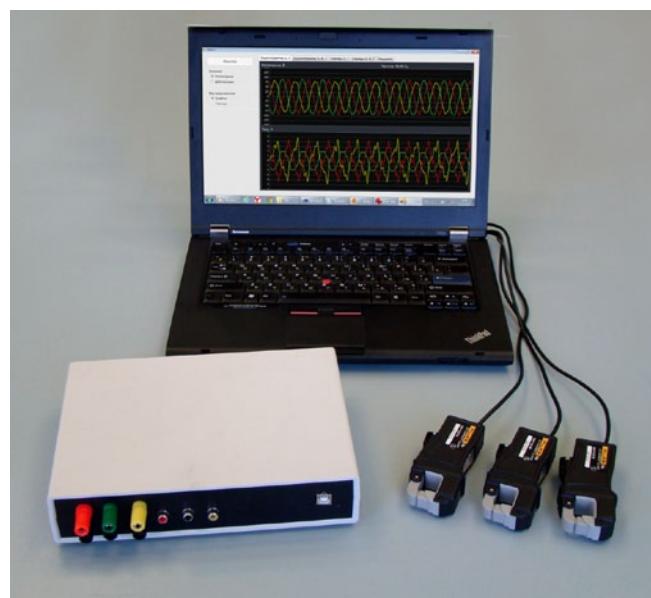


Рисунок 2 — Многофункциональный измерительный комплекс: токовые клещи, измерительный модуль, переносной компьютер

Третьей особенностью является алгоритм [10], определяющий амплитуды как основных гармонических групп, так и гармонических подгрупп в соответствии с рекомендациями [2] (рис. 5).

На рис. 6 показана копия экрана МИК в режиме контроля гармонического состава сигнала. На рис. 3 видно, что отображаются спектральные линии не только на канонических частотах, кратных 50 Гц, но и на интергармонических частотах. При этом отображаются как гармонические подгруппы, так и интергармонические центрированные подгруппы.

Еще одной особенностью МИК является перечень составляющих мощности, заданный международным стандартом [11]. Определяется полная, активная и неактивная мощность в цепи в соответствии с алгоритмом, представленным в [12]. Неактивная мощность состоит из трех компонент: обменной мощности — в традиционном понимании это реактивная мощность основной гармоники, мощности потерь от наличия высших гармоник в сигналах тока и напряжения, мощности несимметрии — составляющей, которая вызывает потери мощности из-за несимметрии в трехфазной цепи. На рис. 7 показана копия экрана МИК в режиме определения составляющих мощности.

Пятой особенностью МИК является алгоритм определения прямой, обратной и нулевой последовательностей. Как известно [13], высшие гармоники формируют составляющие несимметрии, создающие вклад в напряжения последовательностей: третья, девятая и т. д. гармоники — в нулевую последовательность, пятая, одиннадцатая и т. д. — в обратную последовательность, седьмая, тридцатая — в прямую последовательность. В МИК используется алгоритм, определяющий вклад высших гармоник в последовательности и определяющий коэффициенты несимметрии по обратной и нулевой последовательности с учетом вклада этих гармоник.

МИК представляет собой прибор, выполненный на базе переносного малогабаритного компьютера с достаточно простым измерительным блоком, в котором использованы стандартные и оригинальные алгоритмы определения показателей качества электрической энергии, удовлетворяющие требованиям существующих отечественных стандартов. Прибор может быть использован для экспресс-обследования и диагностики тяговых и трансформаторных подстанций электрических железных дорог.

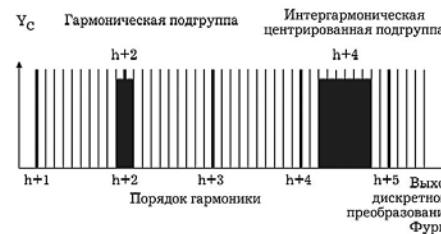


Рисунок 5 — Принцип объединения основных и промежуточных гармоник

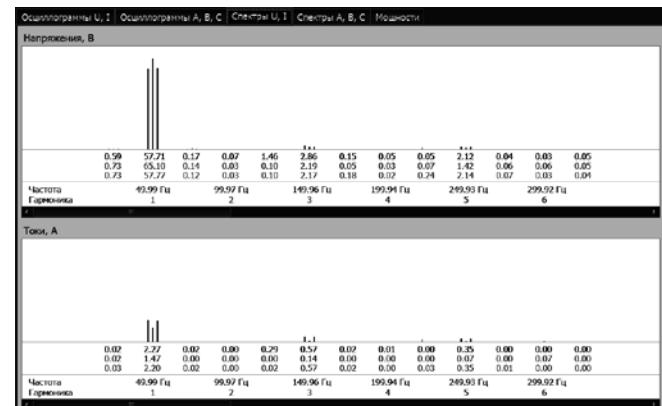


Рисунок 6 — Копия экрана МИК в режиме гармонического анализа сигналов

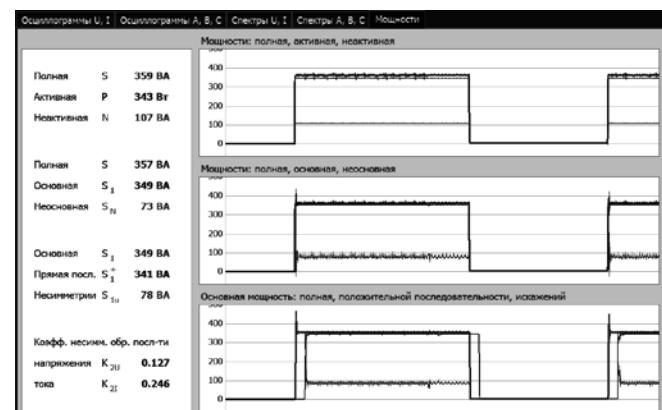


Рисунок 7 — Копия экрана МИК в режиме определения составляющих мощности

## Литература

1. ГОСТ 13109-97. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения.
2. ГОСТ Р 51317.4.30-2008. Совместимость технических средств электромагнитная. Системы электроснабжения и подключаемые к ним технические средства. Общее руководство по измерениям гармоник и интергармоник и средствам измерений.
3. ГОСТ Р 51317.4.7-2008. Методы измерений показателей качества электрической энергии.
4. РД 153-34.0-15.501-00. Методические указания по контролю и анализу качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. Ч. 1. Контроль качества электрической энергии / Министерство энергетики Российской Федерации. М., 2000
5. Управление качеством электроэнергии / И.И. Карташев, В.Н. Тульский, Р.Г. Шамонов и др.; под. ред. Ю.В. Шарова. М.: Издательский дом МЭИ, 2006. 320 с.
6. Чижма С.Н. Современные требования к приборам контроля показателей качества электроэнергии электрических сетей железных дорог // Омский научный вестник. 2009. № 3. С. 214 — 216.
7. Соколов М.М. Контроль качества электрической энергии в системах электроснабжения устройств автоматики железных дорог // Известия Транссиба. 2011. № 1(5). С. 77 — 84.
8. Альтман Е.А., Елизаров Д.А. Исследование методов определения частоты однотонального сигнала // Известия Транссиба. 2010. № 4 (4). С. 103 — 111.
9. Альтман Е.А., Елизаров Д.А Повышение точности оценки параметров сигналов // Известия Транссиба. 2012. № 3 (11) С. 95 — 100.
10. Чижма С.Н. Новые показатели искажения синусоидальности сигналов в электрических сетях // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. 2009. № 4. С. 304 — 307.
11. IEEE Trial Use Standard Definitions for the Measurement of Electric Power Quantities Under Sinusoidal, Non-Sinusoidal, Balanced, or Unbalanced Conditions : IEEE Std 1459-2000. IEEE, 2002. 52 р.
12. Чижма С.Н. Составляющие мощности при несинусоидальных режимах работы систем электроснабжения железных дорог // Известия Транссиба. 2010. № 4 (4). С. 94 — 103.
13. Минин Г.П. Несинусоидальные токи и их измерение. М.: Энергия, 1979. 112 с.

## References

1. GOST 13109-97. Electrical energy. Electromagnetic compatibility. Quality standards for electrical energy in power systems for general use.
2. GOST R 51317.4.30-2008. Electromagnetic compatibility. Electric power supply system and connected hardware. General guidance on measurement of harmonics and interharmonics and measuring instruments.
3. GOST R 51317.4.7-2008. Methods of measurement of electric energy quality.
4. RD 153-34.0-15.501-00. Guidelines for the control and analysis of power quality in power systems for general use. Part 1. Power quality control / Ministry of Energy of the Russian Federation. Moscow, 2000
5. Управление качеством электроэнергии [Power quality management] / И.И. Карташев, В.Н. Тульский, Р.Г. Шамонов, et al.; edited by Yu.V.Sharov. M.: MEI Publishing House, 2006. 320 p.
6. Чижма С.Н. Современные требования к приборам контроля показателей качества электроэнергии электрических сетей железных дорог [Modern requirements for appliances controlling the power quality at railway grids ] // Омский научный вестник / OmGUPS. Omsk. 2009. No.3. p. 214 — 216.
7. Sokolov M.M. Kontrol kachestva elektricheskoy energii v sistemakh elektrosnabzheniya ustroystv avtomatiki zheleznykh dorog [Power quality control in power systems of railway automation devices ] // Izvestiya Transsiba / Omsk State University of Railway Transport. Omsk. 2011. No.1(5). p.77 — 84.
8. Altman E.A., Elizarov D.A. Issledovanie metodov opredeleniya chastoty odnotonalnogo signala [Study of methods of determining the frequency of single-tone signal ] // Izvestiya Transsiba / Omsk State University of Railway Transport. Omsk. 2010. No.4(4). p. 103 — 111.
9. Altman E.A. , Elizarov D.A Povyshenie tochnosti otsenki parametrov signalov // Izvestiya Transsiba / Omsk State University of Railway Transport. Omsk. 2012. No.3(11) p. 95 — 100.
10. Chizhma S.N. Novye pokazateli iskazheniya sinusoidalnosti signalov v elektricheskikh setyakh [New measures of harmonic distortion of signals in electric networks ] // Nauchnye problemy transporta Sibiri i Dalnego Vostoka [Scientific transport problems of Siberia and the Far East] / Novosibirsk Academy of Water Transport. Novosibirsk. 2009. No. 4. p.304 — 307.
11. IEEE Trial Use Standard Definitions for the Measurement of Electric Power Quantities Under Sinusoidal, Non-Sinusoidal, Balanced, or Unbalanced Conditions: IEEE Std 1459-2000. IEEE, 2002. 52 r.
12. Chizhma S.N. Sostavlyayushchie moshchnosti pri nesinusoidalnykh rezhimakh raboty sistem elektrosnabzheniya zheleznykh dorog [Power components for non-sinusoidal operation modes of railway power supply systems ] // Izvestiya Transsiba / Omsk State University of Railway Transport. Omsk. 2010. No.4(4). p. 94 — 103.
13. Minin G.P. Nesinusoidalnye toki i ikh izmerenie. [Non-sinusoidal currents and their measurement.] M.: Energiya, 1979. 112 p.

УДК 621.315.65(08)

Татьяна Анатольевна Несенюк, старший преподаватель кафедры электроснабжения транспорта Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС)

## ПРИМЕНЕНИЕ RFID-ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ ПОИСКА НЕИСПРАВНОЙ ИЗОЛЯЦИИ

Tatiana A. Nesenyuk, Senior Lecturer of "Transport Power Supply" Chair, (Ural State University of Railway Transport (USURT, Ekaterinburg)

### The Use Of RFID Technology To Detect Insulation Faults

#### Аннотация

Рассмотрено применение диагностики изолирующих конструкций в сетях напряжением 6—10 кВ с помощью RFID-технологий. В качестве сигнального устройства для определения неисправности изоляции на воздушных линиях электропередачи предлагается использовать пассивные RFID-метки. Диагностику следует осуществлять считыванием информации об исправности изоляторов с помощью высокочастотного сигнала, направленного на метку, его обработки специальной программой на основе базы данных. Описаны исследования электрических особенностей пассивных меток, способность кодировать, запоминать и передавать данные по высокочастотным каналам. Рассмотрено влияние материалов и различных видов электрических разрядов на качество приема-передачи сигналов при использовании RFID технологий.

**Ключевые слова:** изолятор, диагностика, RFID-технологии, пассивные RFID-метки, высокочастотные сигналы, однофазные замыкания в системах с изолированной нейтралью, устройство для определения дефектов изолятора.

#### Abstract

The use of RFID diagnostics of insulating structures in 6-10 kV networks is considered. The paper suggests using passive RFID-tags as a signaling device for identifying insulation faults on overhead transmission lines. The diagnosis is carried out by reading information on insulator health using high-frequency signal sent to the tag, processing it with special software on the basis of database. Studies of electrical characteristics of passive tags and the ability to encode, store and transmit data on high-frequency channels are described. The influence of materials and various types of electric discharges on the quality of reception and transmission of signals when using RFID technology is analyzed.

**Keywords:** isolation, diagnostics, RFID-technologies, passive RFID-tags, high-frequency signals, single-phase circuit in isolated neutral systems, device for determining insulator faults.

Цель статьи — диагностика изоляторов воздушных линий в системе с изолированной нейтралью современными высокочастотными средствами идентификации с помощью RFID-технологий.

В настоящее время появление современных RFID-технологий позволяет находить новые возможности применения их в различных отраслях промышленности. Радиочастотная идентификация позволяет определять на расстоянии наличие объектов, требующих учета, и их местоположение, может содержать определенные параметры и сохранять информацию об истории использования закодированных предметов.

Изучая возможности RFID-технологий, предлагается использовать эту систему приема и передачи сигнала для обнаружения неисправности изоляторов в сетях с изолированной нейтралью. Технология позволяет одновременно считывать информацию о наличии рассматриваемых объектов. В данном случае объектами идентификации будут опорно-штыревые изоляторы.

Воздушная линия предусматривает использование неизолированных проводов для передачи электроэнергии потребителям. Крепление и изоляция проводов от заземленных элементов опор осуществляется с помощью штыревых изоляторов соответствующего напряжения. Трехфазный переменный ток частотой 50 Гц передается тремя проводами на фазы А, В, С соответственно, поэтому количество на опоре изоляторов кратно трем (3, 6, 9). При поиске однофазного замыкания, когда произошел пробой одного из изоляторов на выделенном релейной защитой участке, оперативный персонал после визуального осмотра не всегда может определить неисправный изолятор. Дефектные изоляторы бригада оперативного персонала сначала ищет на протяжении всего найденного участка визуально с помощью оптических или электронно-оптических приборов [1]. Если пробитый изолятор не найден, то для его нахождения поочередно производится непосредственно подъем на каждую опору данного участка, пока не найдена и не устранена неисправность. Опоры для воздушных линий электропередачи устанавливаются через каждые 85—150 м [2], и нельзя забывать о том, что процесс согласований проведения работ с диспетчером, отключений, заземлений, подъема и непосредственно съема и проверки изоляторов на электрическую прочность занимает большое количество времени. А если это не первая и вторая опоры, а седьмая или десятая и при этом на каждой опоре по шесть изоляторов?

Автор предлагает каждый изолятор идентифицировать по месту нахождения опоры и фазе (A, B, C) с помощью пассивных RFID-меток и тем самым определять место неисправности изолирующих конструкций. Основанием для использования RFID-технологий послужило оригинальное решение передачи и приема высокочастотного сигнала и устройство самих пассивных меток. RFID-системы состоят из трех основных компонентов: считывателя, меток и компьютерной системы обработки данных [3]. Считыватель RFID-системы подключается к меткам по радиосвязи, считывает данные с меток, отправляет в базы компьютерной системы [4, 5]. Считыватель имеет приемо-передающее устройство и антенну, которые посыпают сигнал к метке и принимают ответный сигнал (рис. 1). Микропроцессор проверяет и декодирует данные, а также память, сохраняющую данные для последующей передачи (см. рис. 1).

Основные компоненты метки изображены на рис. 2 — интегральная схема, управляющая связью со считывателем, и антенна. Интегральная схема RFID-системы (чип) имеет память, которая содержит идентификационный код или другие данные. Метка обнаруживает сигнал от считывателя и начинает передавать данные, сохраненные в его памяти, обратно в считыватель RFID-системы. Нет необходимости в контакте или прямой видимости между считывателем и меткой, поскольку радиосигнал легко проникает через неметаллические материалы.

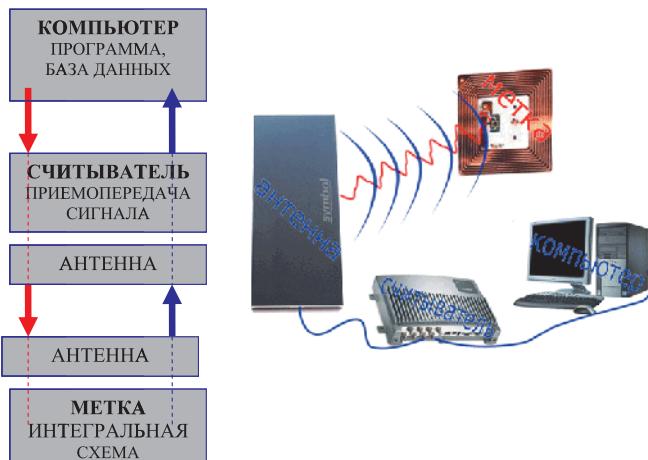


Рисунок 1 — Схема передачи данных RFID-технологий

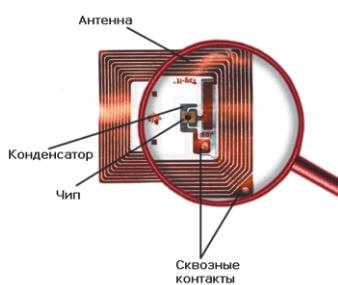


Рисунок 2 — Устройство RFID-метки

Метки бывают активными и пассивными. В случае распознавания неисправного изолятора предлагается использовать

пассивную метку, так как она не требует дополнительного источника питания в виде батареи. Такие метки RFID-системы функционируют без источника питания, получая энергию из сигнала сканера и используя технологию индуктивной связи или электромагнитного захвата [4, 5]. Пассивная метка состоит из антенны, конденсатора и небольшой полупроводниковой микросхемы, объединенных на акриловой подложке (рис. 3).

Особенностью использования RFID-метки при определении неисправного изолятора является то, что через метку в случае замыкания на землю будет проходить ток. Значение тока определяется уровнем напряжения, параметрами линии электропередачи и причиной неисправности изолятора. Согласно Правилам устройства электроустановок в сетях с изолированной нейтралью [6], значения тока замыкания на землю при заданном уровне напряжения не должны превышать допустимые значения, приведенные в табл. 1.

Таблица 1 — Допустимые значения емкостного тока в сетях с изолированной нейтралью

$U_{\text{Л}}$ , кВ	6	10	35
$I_E$ , А	30	20	10

Линии электропередачи имеют различную длину, ток замыкания на землю можно рассчитать по формулам:

$$\text{для воздушных линий } I_E = \frac{U_{\text{Л}} \cdot l_{\text{вл}}}{350}, \text{ А;}$$

$$\text{для кабельных линий } I_E = \frac{U_{\text{Л}} \cdot l_{\text{кл}}}{10}, \text{ А;}$$

$$\text{для кабельно-воздушных линий } I_E = \frac{U_{\text{Л}} \cdot (l_{\text{вл}} + 35 \cdot l_{\text{кл}})}{350}, \text{ А,}$$

где  $U_{\text{Л}}$  — линейное напряжение электрической сети;  $l_{\text{вл}}, l_{\text{кл}}$  — общая длина соответственно воздушной и кабельной линии.

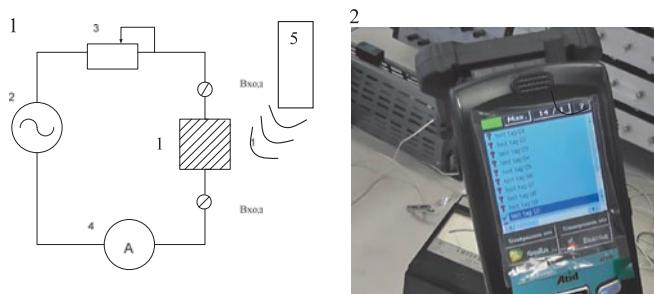
Кроме того, необходимо учитывать, каким образом заземлена нейтраль трансформатора: изолированная, резонансно-заземленная, компенсированная реактором. При этом токи замыкания будут изменяться, но, как правило, при полном пробое изолятора ток не может быть меньше 1 А. Отталкиваясь от определенного значения тока, можем задать такие параметры для пассивной метки, чтобы при прохождении этого тока чип, установленный на ней, пробивался, и метка не отзывалась на сигнал считывателя. Таким образом, вышедшая из строя метка будет сигнализировать о пробое конкретного изолятора. Для более полной картины неисправности можно задавать параметры меток при поверхностном пробое изолятора, когда ток утечки не будет превышать нескольких миллиампер. Более того, на одной метке можно поместить два чипа с различными электрическими параметрами с программным обеспечением для считывания полного пробоя и поверхностного пробоя. Оперативная бригада при отсутствии сигнала метки будет действовать по ситуации, заменять неисправный изолятор или очищать его.

Распознавание пассивных меток, имеющих информацию об исправности изоляторов, предлагается производить специальным мощным считывателем, работающим дистанционно. Это может быть портативный прибор у бригады оперативного персонала, либо прибор, установленный в вагон — лабора-

тории или испытательной автомобильной лаборатории. При проезде по определенному участку постоянно подаваемый высокочастотный сигнал будет отражаться от всех пассивных меток, находящихся на диагностируемом участке. Специальная программа компьютерной системы обработки данных позволит определить место (на каком километре линии находится место замыкания на землю), опору (номер опоры) и непосредственно фазу (A, B, C), где находится неисправный изолятор. Данные по линиям связи могут быть переданы через диспетчера оперативной бригаде для быстрого поиска места пробоя. Время поиска сократится в разы, существенно уменьшатся экономические потери, связанные с недоотпуском электрической энергии потребителям, однофазные замыкания не будут перерастать в двухфазные. Следовательно, эксплуатируемое оборудование не будет подвергаться термическому и механическому действию больших токов, составляющих несколько килоампер, и разрушаться. Количество феррорезонансных явлений уменьшится, благодаря чему ненагруженные силовые трансформаторы, а также измерительные трансформаторы напряжения не будут подвергаться его разрушающему действию. Немаловажен факт, что снизится количество несчастных случаев, связанных с электротравмами обслуживающего персонала.

Исходя из данных преимуществ RFID-технологий в лабораториях УрГУПС были проведены экспериментальные исследования RFID-устройств. Заданной целью было определение неисправности изолятора путем считывания RFID-меток.

Первая задача состояла в изучении возможности пробоя пассивной метки током, проходящим по ее схеме через чип. Для испытаний были использованы метки M3 и портативный RFID UHF терминал для сбора данных ATID AT570RF 5 (считыватель 5). Для решения первой задачи собрали схему испытаний (см. рис. 3), подключив один конец метки к входу 1, а другой к входу 2. Собранная схема состоит из источника переменного тока 2, реостата 3, сигнального устройства 1 — пассивной метки, амперметра 4, проводников для подключения элементов схемы.



**Рисунок 3 — Испытание RFID-метки:**  
1 — электрическая схема испытаний RFID-меток, 2 — переносной считыватель ATID AT570RF, предающий и принимающий сигналы RFID-меток

Пропуская ток через метку 1 по схеме (см. рис. 3), наблюдали за ее поведением. Конденсатор, находящийся в пассивной метке, на некоторое время удерживал прохождение тока через чип. При изучении рисунка токопроводящих каналов на схеме пассивной метки (рис. 4) было обнаружено, что ток идет

по двум параллельным ветвям, поэтому при проведении первого опыта пробить метку было достаточно сложно (см. рис. 4.1): параллельный токопроводящий канал выгорел, а с чипа метки считывалась закодированная информация (см. рис. 4.2).



**Рисунок 4 — Метка M 3: 1 — до испытаний; 2 — после прохождения тока**

Убрав параллельную с чипом токопроводящую линию, добились пробоя чипа, который наблюдался в виде вспышки (рис. 5). Проходящий по RFID-метке ток не оказывал влияние на прием и передачу высокочастотного сигнала от считывателя к метке и обратно.



**Рисунок 5 — Опыт при пробое пассивной RFID-метки:**  
1 — подключение метки в измерительную схему; 2 — пробитая RFID-метка

После нескольких испытаний было обнаружено, что пробивной ток для каждой метки был различным. На одной метке ток составил 40 mA, а другая метка пробилась при токе 450 mA, что говорит о различных электрических параметрах данного устройства. С помощью портативного RFID UHF терминала для сбора данных проверяли целостность пассивной метки. Подавали высокочастотный сигнал до начала испытаний и после него. Энергию для работы пассивные метки получают от наведенного антенной электромагнитного поля, и метка накапливает ее в конденсаторе, а в памяти хранится ее собственный уникальный номер и пользовательская информация. При пробое чипа эта информация стирается и не может приниматься считывателем. Таким образом, при прохождении по пассивной метке электрического тока определенной величины считывания и идентификации номера не происходит из-за пробоя чипа в устройстве, а следовательно, отсутствие сигнала выявят местонахождение неисправного

изолятора, тогда как на исправных изоляторах вся информация об их исправности считывалась. Таким образом, при заказе меток необходимо задавать определенные электрические параметры с учетом тока пробоя чипа и рисунка токопроводящих линий. Пассивная метка может применяться в качестве сигнального устройства в заявлении автором устройства для выявления дефектов изоляторов [7], работающего благодаря току замыкания на землю. Если задавать значения тока утечки или тока пробоя изолятора, то через чип будет протекать ток, определяющий неисправность путем пробоя самого чипа.

Во второй задаче рассматривали помехи, которые могут оказать влияние на считывание пассивной метки. Одним из препятствий оказались металлические конструкции. При подаче высокочастотного сигнала через металлическую сетку одновременно на пять меток считывалась только одна. Сигнал не мог преодолеть данное металлическое препятствие при расстоянии 50 см от метки до считывателя. Металлическая сетка стала экраном, не пропускающим высокочастотные сигналы. Подача сигнала от считывателя без металлического препятствия позволяла считывать метки на расстоянии от 2 до 5 м. Уже оговаривалось, что электрические параметры меток были разные, следовательно, и создаваемые электромагнитные сигналы высокой частоты считывались на различном расстоянии. Таким образом, для условий эксплуатации необходимо учитывать влияние металлических конструкций, находящихся между считывателем и меткой, а лучше металлическое препятствие исключить.

Интересен был опыт по определению расстояния приема-передачи сигнала от считывателя до метки. При передаче сигнала считывателем передвигали метки до того места, где у метки определялся собственный код. Обнаружено, что рассматриваемые метки сформировались в три группы: первая выше 270 см, вторая выше 400 см и третья выше 560 см. Для дальнейших опытов и точности эксперимента выбрали вторую группу. В зависимости от положения в пространстве менялись и расстояния считывания кода метки. Наиболее удачным для увеличения расстояния являлось положение, при котором метка находилась в прямой видимости по отношению к антенне считывателя. При боковом положении расстояние между считывателем и меткой уменьшилось вдвое. Следовательно, необходимо иметь в виду место крепления метки, учитывая положение антенны считывателя. При прохождении передвижной испытательно-диагностической лаборатории вдоль трассы положение считывателя относительно метки будет постоянно изменяться и вероятность приема-передачи сигнала будет достаточной для диагностики изолятора. Проведя некоторое количество опытов, выявили закономерность, что в первоначальный момент включения высокочастотного сигнала на считывателе он наиболее сильный. При этом расстояние от считывателя до пассивной метки увеличивается в несколько раз, что позволяет эту способность использовать для надежной дистанционной диагностики элементов линии электропередачи путем постоянного и многократного включения антенны считывателя.

Рассматривалось влияние различных разрядов на считывание сигнала с пассивной метки: коронного разряда, разряда шарового разрядника и разряда игла-плоскость в неоднород-

ном поле. Пассивные метки выбраны из группы, где расстояние было выше 270 см. С помощью специальной установки, создаваемый коронный разряд с подаваемым напряжением 10 кВ расходился по стеклянной поверхности, на которой снаружи и под стеклом были прикреплены данные метки. При коронном разряде (рис. 6) происходило считывание всех пассивных меток независимо от места крепления меток и от самого коронного разряда как в начале, так и по окончании эксперимента. Проверка влияния напряжения разряда шарового разрядника также не выявила препятствий для передачи и приема высокочастотного сигнала (рис. 7.1).

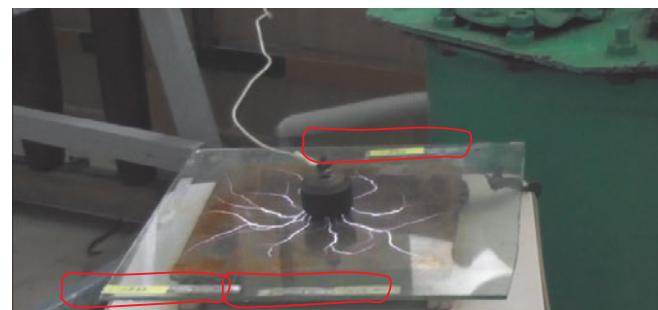


Рисунок 6 — Исследование влияния коронного разряда на считывание пассивной RFID-метки M

Метки располагались непосредственно у места разряда и реагировали, обозначая свой кодированный номер на дисплее переносного считывателя. При исследовании влияния разряда в опыте игла-плоскость (рис. 7.2) все метки были считаны при подаче сигнала. Таким образом, применение RFID-меток возможно для диагностики неисправности изолятора независимо от различной конфигурации электрических разрядов.



Рисунок 7 — Исследование влияния на считывание пассивной RFID-метки M3:

1 — разряда шарового разрядника; 2 — разряда в опыте игла-плоскость

Особенно интересен опыт по считыванию RFID-меток M3 при наклеивании их на различные материалы. Сигналы проходили и считывались, когда пассивные метки прикрепляли к пластмассовым изделиям, дереву, бумаге, стеклу и фарфору, даже нанесение краски и грязи не помешало работе RFID-устройства. Но стоило наклеить метку M3 на металличе-

ский корпус, считывание моментально прекращалось, а при отрывании чипа от металла на 2 мм вновь возобновлялось. Таким образом, чип пассивной RFID-метки M3 необходимо изолировать воздушным промежутком от металлической поверхности. При использовании пассивных меток возможно применение специальных меток, осуществляющих работу и на металлических поверхностях. При создании сигнального устройства, основанного на RFID-технологиях, необходимо обратить внимание на материал для крепления и специальные возможности метки. Автор предлагает закрепить пассивную RFID-метку непосредственно под юбку изолятора посредством устройства для определения дефектов в изоляторах [7], что позволит избежать внешних воздействий на диагностический элемент.

Исходя из полученных результатов экспериментов применение RFID технологий возможно при соблюдении некоторых условий, а именно:

- электрические параметры меток должны настраиваться на определенный ток;
- чип у пассивной метки M3 должен быть хорошо изолирован от металлических поверхностей;
- не допускается экранирование высокочастотного сигнала металлическими предметами.

Преимущества использования RFID-технологии неоспоримы, мониторинг изолирующих конструкций может производиться непрерывно благодаря току замыкания на землю, проходящему через устройство для определения дефектов изолятора. На высокочастотные сигналы не оказывают влияние электрические разряды различной конфигурации. Приъездах на передвижных лабораториях, обходах и осмотрах ЛЭП с помощью RFID-технологии можно произвести диагностику изоляции на ранней стадии развития и при пробое. Постоянная работа считывателя при постоянном включении его антенны приведет к увеличению мощности передаваемого сигнала, что позволит увеличить расстояния до объекта диагностики. Изменение положения антенны считывателя при движении передвижной контрольно-измерительной лаборатории позволит сканировать RFID-метку под разными углами, увеличивая вероятность нахождения пассивной метки.

Из числа опор воздушных ЛЭП распределительной сети 6—35 кВ можно быстро и достоверно определить опору и фазу, на которой расположен неисправный изолятор, с помощью RFID-технологии. Это сократит время и трудозатраты на поиск места замыкания при пробое изолятора, уменьшит вероятность и опасность электротравм у поврежденной опоры, повысит безопасность и надежность электроснабжения потребителей.

## Литература

1. Несенюк Т.А. Диагностирование изолирующих конструкций // Транспорт Урала. 2011. № 3 (30). С.69 — 71.
2. Правила технического обслуживания и ремонта линий кабельных, воздушных смешанных местных сетей связи // Библиотека ГОСТов, стандартов и нормативов [Электронный ресурс]. URL: [http://www.infosait.ru/norma\\_doc/43/43214/index.htm#i1356000](http://www.infosait.ru/norma_doc/43/43214/index.htm#i1356000) (дата обращения: 11.01.2013).
3. DataKart. RFID — РадиоЧастотная Идентификация [Электронный ресурс]. URL: <http://www.datakrat.ru/technology/7942.html> (дата обращения: 11.01.2013).
4. Новиков В.В. Новые направления создания перспективных изделий на ПАВ и ОАВ / ОАО «Авангард» // Электроника: Наука, технология, Бизнес. 2008. Спецвыпуск [Электронный ресурс]. URL: [http://www.avangard.org/index.php?option=com\\_content&task=view&id=7&Itemid=53](http://www.avangard.org/index.php?option=com_content&task=view&id=7&Itemid=53) (дата обращения: 11.01.2013).
5. Шубарев В.В. Микросистемотехника. Инновационное направление развития электроники // Электроника: Наука, технология, Бизнес [Электронный ресурс]. URL: <http://www.electronics.ru/journal/article/96> (дата обращения: 11.01.2013).
6. Правила устройства электроустановок. Разделы 1, 6, 7. Изд. 7-е. СПб.: ЦОТПБСП, 2003.
7. Заявка 2012120948/07(031733) Российской Федерации, МКП Н 01В 17/00. Устройство для определения дефектов в изоляторах / Несенюк Т.А.; заявл. 25.06.2012.

## References

1. Nesenyuk T.A. Diagnostirovaniye izoliruyushchikh konstruktsiy [Diagnosing insulating structures] // Transport of the Urals. 2011. No. 3 (30). p.69 — 71.
2. Pravila tekhnicheskogo obsluzhivaniya i remonta liniy kabelnykh, vozdushnykh smeshannykh mestnykh setey svyazi [Rules of maintenance and repair of cable lines, overhead mixed lines of local communication networks] // Biblioteka GOSTov, standartov i normativov.. [Electronic resource]. URL: [http://www.infosait.ru/norma\\_doc/43/43214/index.htm#i1356000](http://www.infosait.ru/norma_doc/43/43214/index.htm#i1356000) (date accessed: 11.01.2013).
3. DataKart. RFID — RadioChastotnaya Identifikatsiya. [DataKart. RFID — Radio Frequency Identification.] [Electronic resource]. URL: <http://www.datakrat.ru/technology/7942.html> (date accessed: 11.01.2013)
4. Novikov V.V. Novye napravleniya sozdaniya perspektivnykh izdelij na PAV i OAV [New directions of development of promising products based on SAW and BAW] / OJSC Avangard // Elektronika: Nauka, tekhnologiya, Biznes. Spetsvypusk.2008.[Electronic resource ].URL:[http://www.avangard.org/index.php?option=com\\_content&task=view&id=7&Itemid=53](http://www.avangard.org/index.php?option=com_content&task=view&id=7&Itemid=53) (accessed date: 11.01.2013).
5. Shubarev V.V. Mikrosistemotekhnika. Innovatsionnoe napravlenie razvitiya elektroniki [Micro system engineering. Innovative direction of electronics development] // Elektronika: Nauka, tekhnologiya, Biznes. [Electronic resource]. URL: <http://www.electronics.ru/journal/article/96> (date accessed: 11.01.2013).
6. Pravila ustroystva elektrostanovok. [Rules for electrical equipment installation]. Sections 1, 6, 7. 7th edition, Saint-Petersburg.: COTPSP, 2003.
7. Zayavka na izobretenie [Application for an invention] No.2012120948/07(031733) of the Russian Federation, MKP N 01V 17/00. Ustroystvo dlya opredelenija defectov v izolatorakh. [A device for determining faults in isolators] / T.A. Nesenyuk. Filing date 25.06.2012.

УДК 629.1.02

Виктор Борисович Держанский, доктор технических наук, профессор, ведущий научный сотрудник Института машино-ведения УрО РАН,  
 Игорь Александрович Тараторкин, доктор технических наук, заведующий отделом механики транспортных машин  
 Института машиноведения УрО РАН,  
 Алексей Сергеевич Ушенин, аспирант Курганского государственного университета

## ПОВЫШЕНИЕ ДОЛГОВЕЧНОСТИ СОГЛАСУЮЩЕГО РЕДУКТОРА ГИДРОМЕХАНИЧЕСКОЙ ТРАНСМИССИИ СПЕЦИАЛЬНОГО КОЛЕСНОГО ШАССИ

Viktor B. Derzhanskiy, DSc in Engineering, Professor, Senior Researcher, Institute of Mechanical Engineering of UB RAS,  
 Igor A. Taratorkin, DSc in Engineering, Institute of Mechanical Engineering of UB RAS, Head of the Department of Transport Vehicle Mechanics, Institute of Mechanical Engineering of UB RAS,  
 Alexei S. Ushenin, postgraduate student of Kurgan State University

### Improving Service Life Of Matching Reducing Gear In Hydromechanical Transmission Of Special Wheeled Chassis

#### Аннотация

Изложены результаты исследования динамической нагруженности гидромеханической трансмиссии специального колесного шасси. На основе сопоставления частот резонансных колебаний динамического момента и частот возмущения дизельного двигателя предложена и обоснована гипотеза о реализации субгармонических резонансов в механической системе, имеющей существенно нелинейную упругую характеристику. Разработан метод отстройки нежелательных колебаний, формирующих динамическую нагрузженность, позволяющий вывести субгармонические резонансные режимы за пределы рабочего диапазона оборотов двигателя. Предложена конструкция гасителя крутильных колебаний нового типа, защищенная патентом Российской Федерации. Приведены результаты оценки эффективности предлагаемых решений.

**Ключевые слова:** колебания, частота свободных колебаний, субгармонический резонанс, динамическое нагружение, гидромеханическая трансмиссия.

#### Abstract

The results of investigation of the dynamic loading of hydromechanical transmission of special wheeled chassis are described. By comparing the frequency of resonance oscillations of dynamic torque and disturbing frequency of diesel engine, the hypothesis of implementation of subharmonic resonance in a mechanical system having significantly non-linear elastic response is proposed and substantiated. A method of tuning-out unwanted vibrations forming the dynamic loading is developed, that enables taking subharmonic resonance modes out of operating range of engine rpm range. The design of a vibration damper of a new type protected by Russian Federation patent is proposed. The results of the evaluation of the effectiveness of proposed solutions are described.

**Keywords:** vibration, frequency of free oscillations, sub-harmonic resonance, dynamic loading, hydromechanical transmission

#### Введение

Специальные колесные шасси (СКШ) на базе тягачей Минского и Курганского заводов широко применяются как транспортные средства и технологическое оборудование в нефтегазовом комплексе страны в экстремальных условиях эксплуатации Крайнего Севера, Полярного Урала и Западной Сибири. Указанные шасси оснащены единой гидромеханической трансмиссией, надежность которой во многом ограничена, в частности, долговечностью согласующих редукторов [1].

Фирма Allison предлагает проект модернизации СКШ путем монтажа своей моторно-трансмиссионной установки. Однако стоимость проекта составляет 14 млн руб., что почти в 4 раза превышает стоимость капитального ремонта всего СКШ. Повышение долговечности согласующих редукторов, разработка конструкций, их реализация, т. е. модернизация трансмиссии в процессе сервисного обслуживания и ремонта шасси, является эффективным путем повышения надежности.

Особенность рассматриваемой конструкции трансмиссии — введение согласующего редуктора с несколькими зубчатыми передачами, обеспечивающими кинематическое согласование характеристик двигателя и гидротрансформатора. Существенная нелинейность системы обусловлена раскрытием зазоров в зубчатых передачах, и известные методы исключения резонансов в данном случае неэффективны. В связи с этим предлагаемая работа, посвященная анализу условий возникновения субгармонических резонансных режимов в существенно нелинейной системе и обоснованию метода их отстройки, является актуальной.

Целью данной работы является определение путей повышения долговечности согласующих редукторов гидромеханических трансмиссий СКШ, разработка и реализация конструктивных решений, обеспечивающих отстройку от субгармонических резонансных колебаний на основе синтеза гасителя крутильных колебаний нового типа.

Научная новизна работы заключается в изучении закономерностей возникновения и обосновании способа исключения резонансных субгармонических режимов в системе «дизельный двигатель — гидромеханическая трансмиссия» на основе исследования динамики существенно нелинейной системы при полигармоническом возмущении от дизельного двигателя. Новизна технического решения по отстройке субгармонических резонансных режимов за пределы рабочего диапазона частот работы двигателя подтверждена патентом Российской Федерации.

### Состояние вопроса и обоснование задач исследования

Динамическая нагруженность трансмиссии определяется воздействием значительных по величине знакопеременных моментов, возникающих при резонансах на установившихся режимах, а также при переходных процессах пуска двигателя и заглохания, разгона и торможения машины, переключении передач и блокировке гидротрансформатора.

Анализ параметра потока отказов показывает, что наибольшее количество поломок элементов механической системы «двигатель — трансмиссия — транспортная машина» приходится именно на участок между дизелем (возбудителем механических колебаний) и насосным колесом гидротрансформатора, о чем свидетельствует статистика отказов.

Решение конкретных задач затруднено отсутствием объективной оценки выбора типа конструкции гасителя и определения его параметров. Это предопределяет большой объем экспериментальных и доводочных работ на этапе создания конструкции, когда внесение изменений требует существенных затрат времени, труда и материалов.

Базой выполняемых исследований являются научные разработки многих отечественных и зарубежных специалистов. Наиболее полно методика исключения резонансных режимов на основе синтеза гасителей колебаний изложена в работах И.А. Тараторкина [1], А.А. Полунгяна, М.Г. Лахтикова, А.И. Гришкевича [2]. Решение этой проблемы изложено в методиках и справочной литературе фирмы Centa (Германия). Результаты исследования этой фирмы, ее разработки находят широкое применение в мировом машиностроении, в том числе и в России. Однако известные работы не позволяют в достаточной степени учесть существенные нелинейности упругих характеристик, свойственных исследуемой системе.

На основе анализа научных работ, посвященных исследованию и проектированию гасителей колебаний, сделано заключение, что снижение динамической нагруженности и синтез гасителя, учитывающие реальные нелинейные свойства, невозможны из-за сложной взаимосвязи элементов системы. В работе обоснована необходимость проведения теоретических и экспериментальных исследований с использованием современных методов нелинейной механики, оценки устойчивости параметрических колебаний, имитационного моделирования и обработки экспериментальных данных.

### Теоретическое исследование динамической нагруженности

Гидромеханическая трансмиссия является сложной разветвленной механической нелинейной системой переменной структуры, содержащей кольцевые элементы. Подробный ана-

лиз данной модели позволил сделать вывод о том, что динамический момент на валах трансмиссии формируется:

- периодической составляющей момента двигателя как на стационарных, так и на нестационарных режимах работы;
- динамикой механической системы при переходных процессах трогания с места, разгона, переключения передач и блокировки гидротрансформатора.

Динамическая нагруженность элементов конструкции согласующего редуктора, лимитирующих долговечность моторно-трансмиссионной установки в целом рассматриваемого семейства СКШ, может быть эффективно определена на основе исследования динамики двухмассовой системы — так называемой дотрансформаторной зоны [1]. Эта система включает маховик двигателя, насосное колесо гидротрансформатора, соединенные с ними элементы моторно-трансмиссионной установки и согласующий редуктор. Характер взаимосвязи между этими двумя массами формируется упруго-диссипативными характеристиками гасителя крутильных колебаний и зубчатых передач согласующего редуктора. Анализ динамического процесса в рассматриваемой системе и определение путей снижения динамической нагруженности ведутся на основе математической модели дотрансформаторной зоны гидромеханической трансмиссии как нелинейной двухмассовой системы. Введением координаты относительного углового перемещения  $\varphi = \varphi_1 - \varphi_2$  модель приводится к виду нелинейного дифференциального уравнения

$$J_{\text{пр}}\ddot{\varphi} + b\dot{\varphi} + M(\varphi) = M(t). \quad (1)$$

Здесь  $J_{\text{пр}}$  — приведенный момент инерции,  $b$  — коэффициент диссипации,  $M(\varphi)$  — упругая характеристика нелинейной системы, а  $M(t)$  — временная функция момента двигателя. Сложность аналитического определения приведенного момента инерции заключается в том, что необходимо наряду с моментом инерции маховика двигателя учесть инерционность насосного колеса гидротрансформатора, заполненного рабочей жидкостью. Кроме того, в конструкции трансмиссии СКШ от насосного колеса осуществляется привод многих механических устройств (вентиляторы, насосы, компрессоры и др.). В связи с этим данная величина определяется экспериментально [3].

Нелинейная функция — зависимость момента от угловой координаты — схематизирована (рис. 1) и принимается симметричной с зазором [4], т. е.

$$M(\varphi) = \begin{cases} 0 & \text{при } |\varphi| \leq \delta \\ c \cdot |\varphi| \cdot \text{sign}|\varphi| & \text{при } |\varphi| > \delta \end{cases}$$

параметры которой  $\delta$  и  $c$  определяются экспериментально.

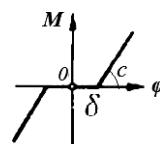


Рисунок 1 — Схематизация нелинейной функции зависимости момента от угловой координаты (нелинейность с зазором)

Временная функция момента двигателя  $M(t)$  принимается в форме ряда Фурье, параметры которого определяются по данным завода-изготовителя,

$$M(t) = M_0 + \sum_{m=1}^{\infty} M_m \cos(m\omega t + \beta_m).$$

Как известно, решение нелинейного уравнения (1) является неоднозначным, и возможно существование нескольких стационарных режимов с различными амплитудами  $\varphi_i = \varphi_i(t)$ , в том числе неустойчивых.

Анализ устойчивости выполняется с использованием аппарата параметрических колебаний [5]. Для этого математическая модель (1) приводится к форме уравнения Маттье

$$\ddot{\varphi} + 2\varepsilon\dot{\varphi} + \omega_0^2 \left[ 1 - \frac{q_d \cos(\omega_0 t)}{q_{ct}} \right] \varphi = 0. \quad (2)$$

В этом уравнении  $\varepsilon = \frac{b}{2J_{np}}$  — параметр диссипации,  $\omega_0^2$  —

квадрат частот свободных колебаний нелинейной системы

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{c_0 - \frac{2c_0}{\pi} \arcsin \frac{\delta}{A} + \frac{\delta}{A} \sqrt{1 - \frac{\delta^2}{A^2}}}{J_{np}}},$$

где  $A$  — амплитуда углового колебания при нейтрали в трансмиссии и частоте вращения вала двигателя, соответствующей холостым оборотам.

Вводя параметры глубины возбуждения  $\mu$  и частоты его изменения  $p$ , уравнение Маттье без учета диссипации приводится к виду

$$\ddot{\varphi} + [a - 2h \cos(2t)]\varphi = 0, \quad (3)$$

где  $a = \left(\frac{2\omega}{p}\right)^2$ ;  $h = a\mu$ ;  $2t = pt$ .

Это позволяет анализировать устойчивость параметрических колебаний по диаграмме Айнса — Стретта (рис. 2).

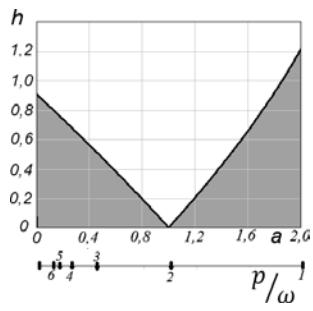


Рисунок 2 — Диаграмма Айнса — Стретта

Из диаграммы следует, что при нейтрали в трансмиссии и при значении параметров  $a$  от 0 до 1 (интересующий нас диапазон частот возмущения) и  $h$ , равного 0,9 и выше, возможны неустойчивые параметрические колебания в широком диапазоне соотношения частот свободных колебаний и возмущающей (параметра  $a$ ). Устойчивость обеспечивается выбором

податливости гасителя крутильных колебаний из условия попадания рабочей точки с координатами  $h-a$  в заштрихованную область диаграммы Айнса — Стретта.

Результаты численного решения (1) при значениях параметров, соответствующих объекту экспериментального исследования, приведены на рис. 3, из которых следует, что колебания момента происходят относительно установленного значения с амплитудой, в 4 раза превышающей установленное значение.

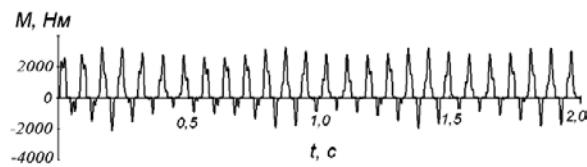


Рисунок 3 — Результаты численного решения (1) при значениях параметров, соответствующих объекту экспериментального исследования

Спектральный анализ полученного решения свидетельствует о возникновении субгармонических колебаний на частотах, в кратное число раз меньших основной моторной гармоники (6-й) двигателя ЯМЗ-8401.

Гармонический анализ момента двигателя показывает, что наиболее опасной моторной гармоникой ЯМЗ-8401, ЯМЗ-240 (по данным изготовителя ОАО «Автодизель») является шестая, т. е. в рассматриваемом диапазоне оборотов двигателя возмущающая частота составляет от 70 до 85 Гц, что значительно (в 5—6 раз) превышает частоты свободных колебаний рассматриваемой системы, а рост амплитуд момента может быть объяснен возникновением так называемого субгармонического резонанса, свойственного нелинейным системам, когда субгармонические колебания могут существовать в системе наряду с основными вынужденными колебаниями. В этом случае гармоническая вынуждающая сила может возбудить в нелинейной системе периодические колебания с периодом, в целое число раз большим, чем  $T = \frac{2\pi}{\omega}$ , где  $\omega$  — частота воз-

мущающего воздействия. Колебания с периодом  $sT$  называют субгармоническими порядка  $s$  [5].

Для получения аналитического решения уравнения (1) с учетом режима субгармонических колебаний воспользуемся методом гармонического баланса [5]. Решение будем искать в виде

$$\varphi(t) = A_1 \sin(\omega t) + \dots + A_1 \sin\left(\frac{\omega t}{6}\right). \quad (4)$$

Нелинейную функцию  $F(t)$  представим в виде разложения в ряд Фурье

$$F(\varphi) = b_1 \sin(\omega t) + \dots + b_1 \sin\left(\frac{\omega t}{6}\right), \quad (5)$$

коэффициенты которого равны

$$b_n = \frac{2}{T} \int_0^T F(\varphi) \sin \frac{\omega t}{n} dt \quad (n = 1, 2, 3, 6, \dots, m) \quad (6)$$

и нелинейно зависят от всех амплитуд.

Далее, подставив выражения (4), (5), (6) в уравнение (1) и учитывая только шестую моторную гармонику, получим соотношение

$$\begin{aligned} -A_1 \omega^2 \sin(\omega t) J - \frac{1}{36} A_1 \omega^2 \sin\left(\frac{\omega t}{6}\right) J + b_1 \left(A_1, A_{\frac{1}{3}}, A_{\frac{1}{6}}\right) \sin(\omega t) \\ + b_1 \left(A_1, A_{\frac{1}{3}}, A_{\frac{1}{6}}\right) \sin\left(\frac{\omega t}{6}\right) = M(t) \sin(\omega t). \end{aligned} \quad (7)$$

Приравняв коэффициенты при каждой из гармоник, содержащихся в левых и правых частях выражения (7), пренебрегая величинами второго порядка малости, получаем систему нелинейных алгебраических уравнений (8), из которых находим искомые амплитуды  $A_1$  и  $A_{\frac{1}{6}}$ .

$$\begin{cases} -A_1 \omega^2 J + cB + cC = H \\ -\frac{1}{36} A_1 \omega^2 J + 2cD + cE = 0, \end{cases}$$

где коэффициенты  $B, C, D, E$  определяются следующими выражениями:

$$\begin{aligned} B &= 2\delta \sqrt{\frac{A_1^2 - \delta^2}{A_1^2}} - 4A_1 a + A_1 \sin(2a - 2\pi\omega) + 2\pi A_1 \omega \\ C &= \frac{5A_1^7 \sin(7\pi\omega - 7b) - 7A_1^7 \sin(5\pi\omega - 5b) + 320\delta^7 - 448A_1^2 \delta^5 + 140A_1^4 \delta^3}{35\pi A_1^6} \\ D &= \frac{15A_1 \sin\left(\frac{7a}{6}\right) - 21A_1 \sin\left(\frac{5a}{6}\right) - 21A_1 \sin\left(\frac{5a}{6} - \frac{5\pi\omega}{6}\right) + 15A_1 \sin\left(\frac{7a}{6} - \frac{7\pi\omega}{6}\right)}{35\pi} \\ E &= \frac{6\delta \sqrt{\frac{A_1^2 - \delta^2}{A_1^2}} - 12A_1 b + 3A_1 \sin(2b - 2\pi\omega) + 6\pi\omega A_1}{6\pi} \\ a &= \arcsin\left(\frac{\delta}{A_1}\right) \quad b = \arcsin\left(\frac{\delta}{A_1}\right) \end{aligned} \quad (8)$$

По этим зависимостям определены амплитуды моментов нелинейной системы на частоте субгармонических колебаний и частоте возмущения, в 6 раз превышающей (6-я моторная гармоника двигателя) в рассматриваемом случае частоту резонанса.

При достоверности полученных результатов путем сравнения с экспериментальными данными они могут быть положены в основу метода ограничения амплитуд колебаний момента, соответственно и динамической нагруженности.

Результаты теоретического исследования подтверждены экспериментально при ходовых испытаниях трех типов колесных шасси Минского и Курганского заводов, оснащенных различными двигателями.

Фрагмент осцилограммы изменения момента на станционном установившемся режиме в области оборотов двигателя 700—850 об/мин показан на рис. 4а. Из приведенных данных следует, что изменение момента носит колебательный характер с амплитудой до 2500 Нм, а частота процесса, как следует из результата спектрального анализа (рис. 4б), составляет от 10 до 14 Гц при частоте возмущения двигателя от 70 до 85 Гц (6-я основная моторная гармоника двигателя ЯМЗ-8401). Данный характер изменения момента во времени соответствует субгармоническим резонансным колебаниям в нелинейной механической системе с зазором.

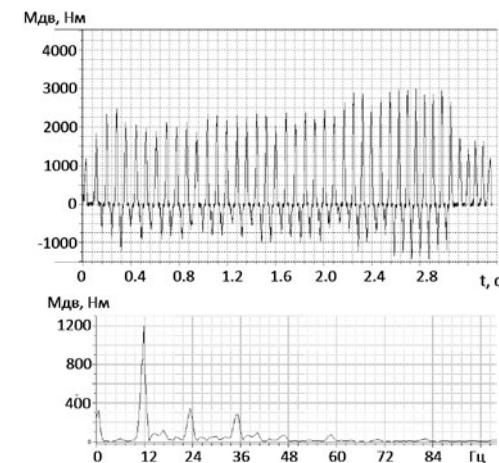


Рисунок 4 — Фрагмент осциллографа изменения момента на торсионном валу (а) и его спектр (б) в режиме холостого хода ( $N_{\text{дв}} = 740$  об/мин)

## Обобщение результатов исследования

Качественное и количественное сравнение проводится по амплитудам и частотам высокочастотных колебаний момента в дотрансформаторной зоне трансмиссии (см. рис. 3 и рис. 4). Расхождение, наблюдаемое по частоте и амплитуде момента, не превышает 7—10%, что связано с отклонением начальных условий при моделировании.

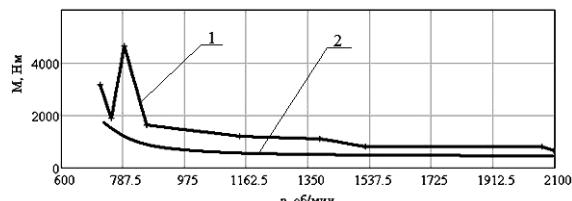
На основе результатов исследований разработан метод исключения резонансных режимов в нелинейной системе. В соответствии с параметрами нелинейной упругой характеристики на основе разработанной математической модели определяется зона устойчивости и вероятность возникновения субгармонических резонансных режимов. Для их исключения необходимо варьировать параметры диаграммы Айнса — Стретта ( $h$  и  $a$ ) из условия попадания в зону устойчивости. Наиболее эффективным и реализуемым способом является отстройка частоты свободных колебаний системы изменением угловой жесткости гасителя согласующего редуктора. В частности, для снижения динамической нагруженности рассматриваемой ГМТ путем исключения резонансного режима необходимо, чтобы угловая жесткость гасителя крутильных колебаний была не выше 21000 Нм/рад.

В соответствии с этим разработана конструкция согласующего редуктора с гасителем крутильных колебаний нового типа с требуемой жесткостью (силиконовый упругий элемент фирмы Centa), защищенная патентом [6].

Параметры упругого элемента выбраны из условия обеспечения требуемой угловой жесткости, снижают частоту свободных колебаний механической системы «двигатель — согласующий редуктор с встроенным гасителем нового типа — насосное колесо ГТ» и выводят резонансные режимы за пределы рабочего диапазона оборотов двигателя, тем самым обеспечивая требуемый ресурс элементов согласующего редуктора.

Эффективность результатов работы определена на основе экспериментального определения нагруженности ГМТ при ходовых испытаниях.

Динамическая нагруженность гидромеханической трансмиссии с модернизированной конструкцией согласующего редуктора определяется при испытаниях в лабораторно-до-



**Рисунок 5 — Амплитудно-оборотные характеристики динамического момента в дотрансформаторной зоне ГМТ**

1 — серийный вариант согласующего редуктора; 2 — разработанный вариант согласующего редуктора

рожных условиях. Оценка эффективности предложенных решений производилась по величине динамического момента на ведущем валу трансмиссии — по амплитудно-оборотной характеристике (рис. 5).

Сравнение амплитудно-оборотных характеристик (графики 1, 2 на рис. 5) показывает, что предлагаемая конструкция согласующего редуктора позволяет вывести резонанс за пределы рабочего диапазона оборотов двигателя, сократить динамический момент в 5—6 раз и тем самым обеспечить повышение долговечности элементов согласующего редуктора.

## Заключение

1. Предложенные в работе математическая модель и пакет компьютерных программ дают возможность исследовать

динамику существенно нелинейной системы, установить закономерности возникновения резонансных режимов, подтвержденные экспериментально.

2. Установлено, что одной из основных причин высокой динамической нагруженности и ограничения долговечности элементов ГМТ являются субгармонические резонансы, вызванные близким совпадением частот свободных колебаний нелинейной системы с кратным значением частот возмущения дизельного двигателя. На основе установленных закономерностей определена область устойчивости и направление вариации параметров для ее обеспечения.
3. Проведенные экспериментальные исследования динамической нагруженности гидромеханической трансмиссии трех моделей СКШ, статистическая обработка их результатов подтверждают достоверность разработанной математической модели, отражающей физические процессы при резонансных режимах и корректность основных допущений.
4. На основе полученных результатов предложены технические решения, позволяющие уменьшить динамическую нагрузженность трансмиссии, и разработаны конструкции гасителей нового типа для согласующих редукторов ГМТ СКШ различных моделей. Это позволило вывести резонансные режимы за пределы рабочего диапазона оборотов двигателя и уменьшить динамическую нагрузженность трансмиссии в 5—6 раз и тем самым создать предпосылки повышения долговечности элементов согласующего редуктора.

## Литература

1. Держанский В.Б., Тараторкин И.А., Шеломков С.А. Прогнозирование динамической нагруженности дотрансформаторной зоны ГМП // Автомобильная промышленность. 2008. № 11. С. 32 — 34.
2. Гришкевич А.И. Проектирование трансмиссий автомобилей: справочник / под общ. ред. А.И. Гришкевича. М.: Машиностроение, 1984. 272 с.
3. Ушенин А.С., Держанский В.Б., Тараторкин И.А. Гашение субгармонических колебаний в гидромеханической трансмиссии // Наука и образование: электронное научно-техническое издание. 2013. № 3 [Электронный ресурс] URL: <http://technomag.bmstu.ru/doc/548552.html>.
4. Попов Е.П. Теория нелинейных систем автоматического регулирования и управления: учебное пособие; 2-е изд. М.: Наука, 1988. 256 с.
5. Пановко Я.Г. Введение в теорию механических колебаний: учебное пособие; 2-е изд., перераб. М.: Наука, 1980. 272 с.
6. Пат. 122952 Российская Федерация. Согласующий редуктор гидромеханической трансмиссии транспортной машины / Держанский В.Б., Тараторкин И.А., Гизатуллин Ю.Н., Ушенин С.А.

## References

1. Derzhanskiy V.B., Taratorkin I.A., Shelomkov S.A. Prognozirovaniye dinamicheskoy nagruzhennosti dotransformatornoy zony GMP [Prediction of dynamic loading of pre-transformer zone of GMP] // Avtomobilnaya promyshlennost. 2008. No. 11. p. 32—34.
2. Grishkevich A.I. Proektirovaniye transmissiy avtomobiley: Spravochnik [Design of motor car transmissions: Manual]/ General editor: A.I. Grishkevich .M.: Mashinostroenie, 1984. 272 p., il.
3. Ushenin A.S., Derzhanskiy V.B., Taratorkin I.A. Gashenie subgarmonicheskikh kolebaniy v gidromekhanicheskoy transmissii [Damping subharmonic oscillations in hydro-mechanical transmission] [E-resource] // Electronic magazine. «Nauka i obrazovanie: elektronnoe nauchno-tehnicheskoe izdanie». # 03, March 2013 DOI: 10.7463/0413.0548552 Access mode: <http://technomag.bmstu.ru/doc/548552.html>, free.
4. Popov E.P. Teoriya nelineynykh sistem avtomaticheskogo regulirovaniya i upravleniya: Uchebnoe posobie. [The theory of nonlinear systems of automatic regulation and control: manual] 2nd ed. M.: Nauka, 1988. 256 p.
5. Panovko Ya.G. Vvedenie v teoriyu mekhanicheskikh kolebaniy: Uchebnoe posobie. [Introduction to mechanical vibrations theory: manual] 2nd ed., revised. M.: Nauka. Glavnaya redaktsiya fiziko-matematicheskoy literatury, 1980. 272 p., il.
6. Patent na poleznuju model No. 122952 ot 20.12.2012. Soglasujuschij reduktor gidromekhanicheskoy transmissii transportnoj mashiny. [Utility model patent No.122952 on 20.12.2012. Reduction gear of hydro-mechanical transmission of a transport vehicle] /Derzhanskiy V.B., Taratorkin I.A., Gizatullin Yu.N., Ushenin S.A.

УДК 629.014.3

Юрий Викторович Перчаткин, кандидат технических наук, доцент кафедры «Автомобили и автомобильное хозяйство» Орского гуманитарно-технологического института (филиала) Оренбургского государственного университета

## ПУТИ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ПРИЦЕПНОГО СОСТАВА К КОЛЕСНЫМ ТРАКТОРАМ

Yury V. Perchatkin, PhD in Engineering, Associate Professor of the Department. "Motor Cars and Motor Car Fleet", Orsk Humanities & Technology Institute (Branch), Orenburg State University

### Ways To Improve Trailing Implements For Crawler Tractors

#### Аннотация

Рассмотрены проблемы развития прицепного тракторного транспорта в условиях возрастаания энергонасыщенности колесных тракторов, опережающего увеличение производительности транспортных агрегатов на их базе. Предложены мероприятия, обеспечивающие снижение металлоемкости, уменьшение удельного давления на почву, повышение плавности хода и проходимости тракторных прицепов.

**Ключевые слова:** прицепы тракторные, металлоемкость, шины, плавность хода, проходимость.

#### Abstract

The problems of the development of tractor trailer transport in terms of increasing energy saturation of wheel tractors outpacing increase in productivity of transport units on their base are considered. The measures to ensure reduction of steel intensity, reduction of specific pressure on soil, and improve ride comfort and terrain crossing capacity of tractor trailers are suggested.

**Keywords:** tractor trailers, metal intensity, tires, ride comfort, terrain crossing capacity.

**Н**аучно-технический прогресс в области сельскохозяйственного транспортного машиностроения в настоящее время характеризуется двумя ведущими тенденциями. Первая из них выражается в росте единичной и удельной мощности (энергонасыщенности) колесных тракторов, используемых на транспортных работах, и повышении эксплуатационных скоростей транспортных агрегатов на их базе; вторая — в увеличении единичной массы тракторов и освоении более высоких тяговых классов [1].

Рост энергонасыщенности тракторов приводит к значительному недоиспользованию мощности их двигателей. Средняя загрузка по мощности двигателей энергонасыщенных колесных тракторов на транспортных работах не превышает 50% [2]. Недоиспользование мощности приводит к соответствующему снижению реальной производительности транспортных агрегатов, увеличению удельного расхода топлива и удельной материаломкости, ухудшению их экономической эффективности.

Анализ технических характеристик выпускаемых тракторов и прицепов показывает, что рост массы тракторов опережает увеличение производительности транспортных агрегатов. В результате этого происходит повышение удельных приведенных затрат на приобретение и эксплуатацию тракторов и агрегатируемых с ними машин.

Рост единичной массы тракторов и транспортных агрегатов в целом влечет за собой усиление вредного воздействия их ходовых систем на почву, приводит к ее переуплотнению и разрушению и сопровождается повышением стоимости транспортных работ.

В связи с изложенным приобретает большую актуальность поиск факторов, способных приостановить развитие отмеченных неблагоприятных тенденций, складывающихся по мере возрастаания энергонасыщенности колесных тракторов.

Комплексная реализация таких мероприятий позволит при неизменных классах тракторов существенно повысить тяговые усилия, развиваемые транспортным агрегатом, и, следовательно, увеличить его грузоподъемность, а при неизменной грузоподъемности транспортного агрегата — понизить класс тракторов, входящих в его состав. И в том, и в другом случае повысится эффективность использования транспортных агрегатов. При понижении тягового класса трактора, кроме того, уменьшится его масса, в результате чего будет ослаблено вредное воздействие ходовой системы на почву.

Эффективность использования тракторных поездов в сельском хозяйстве определяется большим числом факторов. Из них важнейшими являются состав транспортного агрегата, тягово-цепные и энергетические возможности трактора, дорожно-климатические условия эксплуатации, организация перевозок, виды грузов. Имеют

также существенное значение свойства маневренности, устойчивости прямолинейного движения, вибронагруженности рабочего места водителя, тормозные качества транспортного агрегата. Производительность транспортного агрегата зависит от средней технической скорости движения, коэффициента использования пробега, грузоподъемности тракторного поезда, коэффициента использования грузоподъемности, среднего расстояния перевозки грузов, времени простоя под погрузкой и разгрузкой. Из этого следует, что факторы, способные повысить производительность транспортного агрегата, могут быть отнесены к одной из двух групп. Первая из них относится к сфере эксплуатации и определяется главным образом организационными причинами. Вторая группа факторов может быть отнесена к конструктивным, закладываемым на стадии проектирования. В данной работе анализируются преимущественно факторы второй группы, хотя имеет место определенное взаимное влияние обеих групп: конструктивные параметры оказывают значительное воздействие на организацию транспортных работ.

При отмеченном выше росте энергонасыщенности тракторов и появляющихся в связи с этим возможностях совершенствования транспортных агрегатов на их базе встает вопрос о наиболее целесообразных путях развития прицепных транспортных средств с учетом экономической эффективности их применения. Анализ опыта создания прицепных транспортных средств, а также альтернативных вариантов их развития позволил выявить перспективы повышения эффективности тракторного транспорта за счет конструктивных решений на стадии проектирования и модернизации. Из них важнейшими являются:

- повышение технического уровня выпускаемого прицепного состава за счет повышения удельных технических характеристик (металлоемкости, трудоемкости производства);
- выбор оптимальных параметров агрегатирования прицепных звеньев, обеспечивающих наиболее полное использование тягово-цепных свойств тракторного поезда;
- поиск конструктивных схем прицепных звеньев и схем агрегатирования, улучшающих геометрические, весовые характеристики тракторного поезда, его управляемость и проходимость;
- снижение динамического воздействия, вызванного поверхностью дороги, на все звенья тракторного агрегата, а также воздействия прицепных звеньев на трактор с целью уменьшения вибонагруженности рабочего места водителя и увеличения тем самым эксплуатационных скоростей движения транспортных агрегатов, а также снижения металлоемкости несущих конструкций за счет уменьшения коэффициента запаса прочности.

Общую совокупность мероприятий по совершенствованию конструкций тракторных прицепов можно охарактеризовать такими основными признаками, как:

- повышение единичной грузоподъемности или грузовместимости до оптимальных пределов;
- снижение собственной массы для увеличения номинальной грузоподъемности или снижения удельного давления на почву;
- специализация грузовых платформ по виду перевозимого груза;
- гидрофикация привода исполнительных механизмов;
- применение шин с минимальным удельным давлением на почву;
- повышение эффективности тормозных систем и маневренных свойств с учетом многовариантности состава как прицепов, так и тягачей;
- повышение надежности и долговечности конструкций с использованием методов их ускоренной оценки на этапе опытно-конструкторских работ.

Важнейшим из этих мероприятий является повышение грузоподъемности прицепов, прежде всего за счет снижения их собственной массы.

В частности, существенным резервом снижения металлоемкости изделий является практически не применяемый в прицепостроении метод пластического упрочнения деталей. При этом методе участки деталей, испытывающие максимальные напряжения под нагрузкой, предварительно подвергают пластической деформации, создавая в них остаточные напряжения, противоположные по знаку напряжениям, действующим в эксплуатации.

Метод может быть применен для деталей с большой программой выпуска и перспективен тем, что упрочнение (перегрузкой, съемное или термопластичное) практически без особой подготовки производства легко осуществимо на металлургическом комбинате, изготавливающем профили.

Правильное использование этого приема в конструкционных материалах и конструкциях по эффективности равноценно применению низколегированных сталей. Но перспектива данного способа упрочнения гораздо шире, поскольку его можно использовать на профилях и деталях как из малоуглеродистых, так и из низколегированных сталей с одновременным снижением металлоемкости.

При проектировании и модернизации конструкций тракторных прицепов особое внимание должно быть также уделено улучшению технологичности и снижению трудоемкости изготовления, унификации узлов и деталей, совершенствованию организации производства.

Задача снижения энергетических затрат и уменьшения уплотнения почвы при качении колес транспортного средства была и остается острой проблемой.

При качении нагруженной эластичной шины давление в шинах может существенно влиять на величину силы сопротивления качению, поэтому необходимо так подобрать этот параметр, чтобы шина была в эксплуатации наиболее экономичной. При этом она должна как можно меньше уплотнять почву.

Уплотнение почвы при движении колеса может быть охарактеризовано двумя показателями: глубиной колеи и плотностью грунта по следу колеса. Эти две величины для сельскохозяйственных шин имеют особое значение, так как с возрастанием плотности почвы в следе движителя существенно снижается общая и некапиллярная скважность, ухудшается аэрация почвы. Ухудшается и структурный состав почвы.

В настоящее время на отечественных большегрузных тракторных прицепах широко используются шины КФ-97, которые по величине удельного давления на почву не удовлетворяют нормативным требованиям.

В результате экспериментов по определению зависимости глубины колеи и плотности грунта от внутреннего давления вшине КФ-97 установлено, что при вертикальной нагрузке, равной 33,6 кН, наименьшее уплотнение пахотного слоя достигается при внутреннем давлении 0,25 МПа.

Снижение нормальной нагрузки на колесо для уменьшения удельных давлений в пятне контакта является оправданным только в области высоких внутренних давлений вшине. В области низких давлений такое мероприятие нецелесообразно.

Для снижения удельного давления на почву целесообразно применять шины увеличенных габаритов. В этом направлении преимущественно и происходит развитие шин для тракторных прицепов. Однако дальнейшее увеличение их габаритов связано с рядом трудностей. Применение шин с увеличенным наруж-

ным диаметром ограничено погрузочной высотой и поперечной устойчивостью прицепов, а с уменьшенным посадочным диаметром существенно усложняет конструирование колесно-ступичной группы и тормозных барабанов. Поэтому по конструктивной увязке для большегрузных тракторных прицепов наибольший интерес представляют низкопрофильные шины.

Конструктивной характеристикой шин является отношение высоты профиля шины к ширине  $H/B$ . В настоящее время  $H/B$  для шин тракторных прицепов составляет 0,70—0,65. Для ряда сельскохозяйственных машин в нашей стране и за рубежом в настоящее время применяют шины с  $H/B = 0,5 — 0,55$ . Применение таких шин позволяет повысить поперечную устойчивость прицепов и снизить удельное давление на почву. Положительным эффектом использования низкопрофильных шин является также снижение сопротивления качения и повышение плавности хода.

В настоящее время для тракторных прицепов созданы сверхнизкопрофильные шины с  $H/B$  менее 0,5, а также арочные шины. Применение таких шин, в частности сверхнизкопрофильной шины КФ-144 с  $H/B = 0,4$ , существенно снижает удельное давление на почву, приближая этот показатель к максимально допустимому по ГОСТу 7057.

Плавность хода транспортного агрегата также является одним из важнейших параметров, влияющих на его эффективность, так как способна значительно ограничить скорость движения.

Решающую роль в формировании характера низкочастотных колебаний, действующих на несущую систему и водителя, помимо динамического воздействия поверхности движения играют параметры подвески и упругие характеристики шины, а также конструктивное исполнение первого прицепного звена тракторного поезда.

Установлено, что наилучшими показателями по плавности хода обладает тракторный поезд с полуприцепом в качестве прицепного звена (рис. 1).

Дальнейшее улучшение плавности хода может быть получено за счет рационального агрегатирования звеньев тракторного поезда. Рассмотрим возможности, имеющиеся в этом способе, для двух типов поездов в составе трактора К-701 с полуприцепом ОЗТП-9554 и полуавесным прицепом ОЗТП-8573 в качестве первого прицепного звена. Вторым прицепным звеном являлся прицеп ОЗТП-8572.

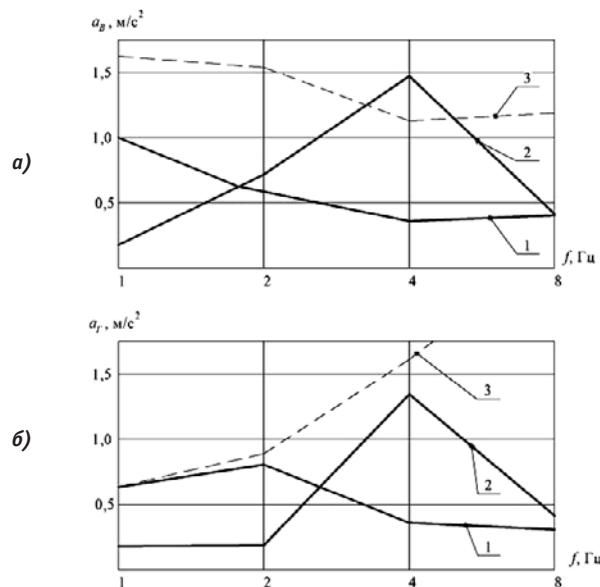
Варьировались следующие параметры прицепных звеньев:

- высота расположения  $c_i$  буксирных приборов;
- высота расположения  $c_i$  точки закрепления дышла прицепа ОЗТП-8572 (второго прицепного звена);
- высота расположения  $h_g$  оси балансира полуприцепа ОЗТП-9554 и полуавесного прицепа ОЗТП-8573.

Результаты расчета для двух типов прицепных звеньев, а также полученные экспериментальные значения дополнительной догрузки тягово-сцепного устройства (ТСУ) трактора при варьировании параметров агрегатирования приведены на рис. 2.

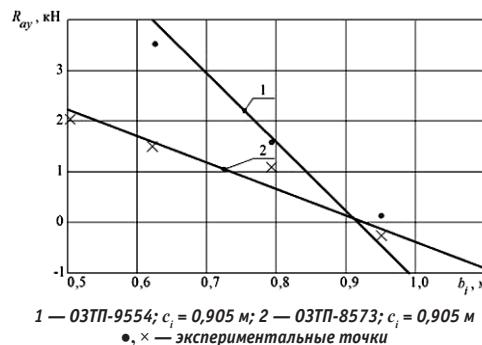
Анализ этих результатов показывает, что использование полуавеса в качестве первого прицепного звена позволяет осуществлять дополнительную догрузку ТСУ трактора в более широких пределах: максимальная дополнительная догрузка ТСУ трактора составляет полуавес ОЗТП-9554 7,75 кН.

Для создания максимальной дополнительной догрузки ТСУ трактора оптимальным является нижнее расположение оси балансира подвески полуавеса, высота крепления дышла прицепа  $c_i = 1,1$  м и высота расположения буксирного прибора  $v_i = 0,48$  м.



1 — с полуприцепом ОЗТП-9554; 2 — с полуавесным прицепом ОЗТП-8573;  
3 — предельно допустимые по ГОСТу 12.1.012

Рисунок 1 — Среднеквадратические ускорения на рабочем месте водителя: а — вертикальные; б — горизонтальные



1 — ОЗТП-9554;  $c_i = 0,905$  м; 2 — ОЗТП-8573;  $c_i = 0,905$  м  
•, × — экспериментальные точки

Рисунок 2 — Догрузка ТСУ трактора при различных вариантах первого прицепного звена

Дополнительная догрузка ТСУ трактора в процессе его движения способствует снижению уровня низкочастотных колебаний на рабочем месте водителя. На рис. 3 приведены результаты измерений вибронагруженности при различных вариантах агрегатирования, подтверждающие возможность снижения вибронагруженности за счет увеличения догрузки ТСУ. В частности, оптимальное расположение дышла прицепного звена (снижение высоты его расположения относительно рамы прицепа) позволило снизить горизонтальные виброускорения на рабочем месте водителя на 12%.

Изложенные направления совершенствования прицепного состава реализуются как в сфере производства путем улучшения удельных технико-экономических показателей прицепов, так и в сфере эксплуатации. Решающая роль, однако, принадлежит разработке новых конструктивных схем прицепов и транспортных агрегатов, что обеспечивает качественное улучшение эксплуатационных свойств тракторного транспорта.

Для иллюстрации имеющихся здесь возможностей рассмотрим схему тракторного поезда с полунавесным прицепом с догружающим дышлом в качестве первого прицепного звена (рис. 4).

Такая схема агрегатирования тракторного поезда является наиболее общей из конструктивных схем и наиболее эффективной с точки зрения использования энергетических возможностей трактора. Включение в состав тракторного поезда последующих прицепных звеньев — двух или трехосных прицепов со свободным дышлом — не изменяет полученных далее закономерностей и сводится при условии прямолинейного движения тракторного поезда к соответствующему увеличению расчетной полной массы прицепного состава.

Использованы следующие обозначения: цифры в индексе 1, 2...5 — номера осей тракторного поезда;  $P_{k1}, P_{k2}$  — силы тяги, развиваемые ведущими мостами трактора;  $P_{f1}, P_{f2}...P_{f5}$  — силы сопротивления качению;  $\text{ЦT}_1, \text{ЦT}_2$  — центры масс соответственно трактора и прицепа;  $Z_1, Z_2...Z_5$  — вертикальные реакции;  $G_r, G_n$  — силы тяжести трактора и прицепа;  $P_{kp}$  — сила тяги в сцепном устройстве трактора;  $G_{kp}$  — догрузка от массы прицепа сцепного устройства трактора. В горизонтальном положении звеньев поезда  $G_r = G_d$ , где  $G_d$  — номинальная статическая догрузка сцепного устройства трактора от массы агрегатируемого с ним прицепа. Конструктивное исполнение существующих моделей полунавесных прицепов таково, что тяговое усилие  $P_{kp}$  направлено под некоторым углом  $\gamma$  по отношению к опорной поверхности, расположенной, в свою очередь, под углом  $\alpha$  к горизонту.

Применительно к рассматриваемой схеме тракторного поезда условия осуществимости его равномерного движения в заданных дорожных условиях (без учета влияния микропрофиля) записываются следующим образом:

$$\begin{aligned} P_{k1} + P_{k2} &\geq P_{f1} + P_{f2} + G_m \sin \alpha + P_{kp} \cos \gamma; \\ P_{kp} \cos \gamma &= P_{f3} + P_{f4} + P_{f5} + G_n \sin \alpha. \end{aligned} \quad (1)$$

В усложненных дорожных условиях при ограничении тяговых возможностей трактора условиями сцепления:

$$\begin{aligned} P_{k1} + P_{k2} &= \varphi (Z_1 + Z_2); \\ P_{f3} + P_{f4} + P_{f5} &= f (Z_3 + Z_4 + Z_5). \end{aligned} \quad (2)$$

Здесь  $\varphi$  — реализуемый коэффициент сцепления шин трактора с опорной поверхностью,  $f$  — коэффициент трения качения при заданных дорожных условиях, принятый одинаковым для колес трактора и прицепных звеньев. Силами сопротивления воздуха ввиду малых скоростей движения тракторных поездов пренебрегаем.

Важнейшим эксплуатационным параметром тракторного поезда является коэффициент сцепной массы  $\lambda_n = G_n / G_d + G_r$ , т. е. отношение массы прицепного состава к полной массе тракторного поезда. Оптимизация этой величины при принятой конструктивной схеме тракторного поезда должна обеспечиваться надлежащим агрегатированием его звеньев.

После выполнения соответствующих преобразований [3] из уравнений (2) получено

$$\lambda_n = \frac{\varphi \lambda_d + (1 - f \operatorname{tg} \gamma) [\varphi - (f + \operatorname{tg} \alpha)]}{[1 + (\varphi - f) \operatorname{tg} \gamma] (f + \operatorname{tg} \alpha)}, \quad (3)$$

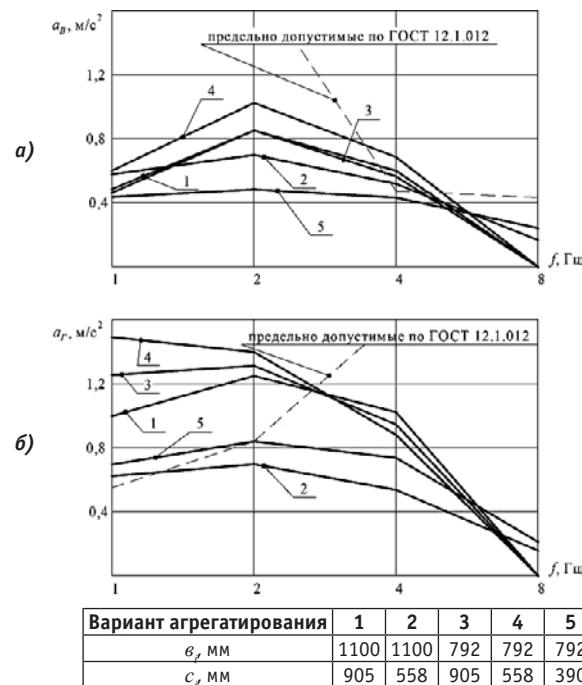


Рисунок 3 — Среднеквадратические ускорения на рабочем месте водителя для вариантов агрегатирования тракторного поезда К-701 + 03ТП-9554 + 03ТП-8572:

а — вертикальные; б — горизонтальные

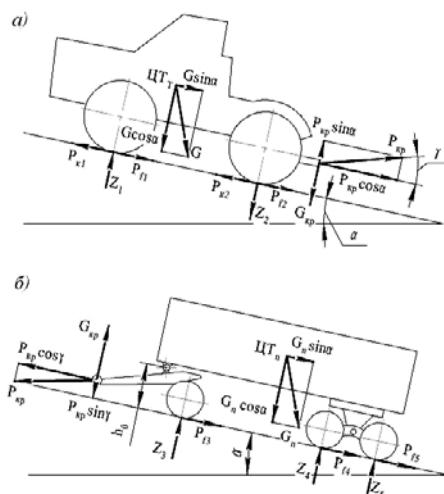


Рисунок 4 — Схема сил и реакций, действующих на трактор (а) и полунавесной прицеп (б)

где  $\lambda_n = G_n / G_d$  — коэффициент статической догрузки сцепного устройства трактора от прицепного звена.

Из анализа формулы (3) следует, что изменение параметров агрегатирования первого прицепного звена тракторного поезда, сводящееся, в сущности, к дополнительной передаче части веса прицепа при его движении на ведущий мост трактора, эффективно лишь при легких и средних условиях движения. В тяжелых условиях движения стабилизации коэффициента сцепной массы тракторного поезда можно достичь лишь путем вариации коэффициента статической догрузки, т. е. за счет перераспределения

опорных реакций прицепа в зависимости от состояния дорожной поверхности. В настоящее время известно два способа такого перераспределения опорных реакций. Первый из них сводится к частичному вывешиванию передней оси прицепа и передаче, таким образом, части веса прицепа на задний мост трактора — путем введения в конструкцию прицепа дополнительных гидравлических или пневматических исполнительных механизмов, управляемых с помощью гидро- или пневмосистемы. При этом достигается фиксированное значение догрузки тягово-сцепного устройства трактора, которое может оказаться либо недостаточным в данных дорожных условиях, либо избыточным, перегружающим заднюю ось трактора. Второй способ заключается в принудительном изменении положения точки передачи нагрузки на переднюю тележку прицепа. В обоих случаях управление перераспределением развесовки прицепа осуществляется лишь ориентировочно, по субъективной оценке водителя, и может привести к необоснованной перегрузке заднего моста трактора. Рационального перераспределения опорных реакций прицепа в зависимости от условий движения можно достичь применением автоматической стабилизации коэффициента сцепной массы тракторного поезда. В качестве простейшего примера такой стабилизации может быть предложена схема полунавесного прицепа (рис. 5), рама передней поворотной тележки которого выполнена с возможностью перемещения по внутренним направляющим дышла под воздействием пружины, деформация которой пропорциональна силе сопротивления качению передней оси прицепа [4].

Смещение точки приложения вертикальной нагрузки от рамы прицепа на дышло, перемещающееся пропорционально сопротивлению движения прицепа относительно передней оси, изменяет догрузку тягово-сцепного устройства трактора.

Таким образом, при движении тракторного поезда догрузка тягово-сцепного устройства трактора выполняется автоматически в зависимости от дорожных условий.

Испытания макетного образца предложенной конструкции на базе полунавесного прицепа ОЗТП-8573 в тяжелых дорожных условиях показали значительное улучшение плавности хода по сравнению с базовой моделью и существенное снижение динамических нагрузок на детали несущей и ходовой систем, в частности на ходовые оси (табл. 1). При этом наибольший эффект достигается для колебаний в горизонтальной плоскости (в направлении движения).

## Литература

- Стратегия машинно-технологической модернизации сельского хозяйства России на период до 2020 года / Ю.Ф. Лачуга и др. М.: ФГНУ «Росинформагротех», 2009. 80 с.
- Трепененков И.И., Мининзон В.И. Об использовании мощности сельскохозяйственных тракторов // Тракторы и сельхозмашины. 1987. № 3. С. 13 — 15.
- Миркитанов В.И., Перчаткин Ю.В. Выбор параметров агрегатирования большегрузный тракторных поездов // Разработка и использование средств электромеханизации в животноводстве. Зерноград: ВНИПТИМЭСХ, 1987. С. 153 — 162.
- А.с. 1495196 СССР, МКИ 3 1362 Д63/06. Тракторный прицеп / Кульман П.А., Миркитанов В.И., Перчаткин Ю.В., Щурин К.В.; опубл. 23.07.89, Бюл. № 27. 3 с.

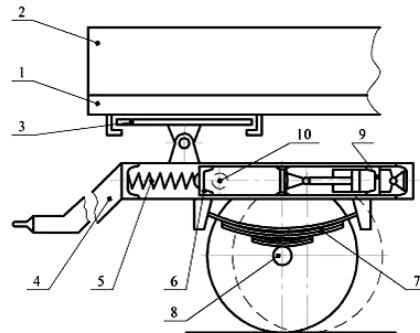


Рисунок 5 — Прицеп с автоматической догрузкой сцепного устройства трактора

Таблица 1 — Результаты сравнительных испытаний макетного образца полунавесного прицепа с автоматическим изменением догрузки сцепного устройства трактора

Компоненты динамической нагруженности осей прицепа	Дисперсия амплитуд динамических напряжений, МПа <sup>2</sup>			
	Передняя ось		Задняя ось	
	Опытный прицеп	Базовая модель	Опытный прицеп	Базовая модель
Изгиб в вертикальной плоскости	720	809	706	751
Изгиб в горизонтальной плоскости	89	226	169	184

По результатам испытаний дисперсия амплитуд динамических напряжений от изгиба в горизонтальной плоскости для передней, наиболее нагруженной оси при применении данного устройства снижается в 2,5 раза.

Предложенная схема позволит повысить эффективность использования тракторных поездов, прежде всего за счет расширения диапазона дорожно-климатических условий их эксплуатации и увеличения реализуемой грузоподъемности в усложненных дорожных условиях.

## References

- Strategija mashinno-tehnologicheskoy modernizatsii selskogo hozjstva Rossii na period do 2020 goda [The Strategy of machine and technological modernization of agricultural industry in Russia for the period up to 2020] / Yu.F. Lachuga et al. M.: FGNU «Rosinformagrotekh», 2009. 80 p.
- Trepnenenkov I.I., Mininzon V.I. Ob ispolzovanii moschnosti selskokhozyaystvennykh traktorov [On the use of the power of agricultural tractors] // Traktory i selkhozmashiny 1987. No. 3. p. 13—15.
- Mirkitanov V.I., Perchatkin Yu.V. Vybor parametrov agregatirovaniya bolshegruznykh traktornykh poezdov. [Selection of parameters of aggregation of heavy-load tractor trains] // Razrabotka i ispolzovanie sredstv elektromekhanizatsii v zhivotnovodstve. Zernograd: VNIPTIMESKH, 1987. p. 153—162.
- Traktorny pritsep: a.s. [Tractor trailer] 1495196 SSSR. MKI 3 1362 D63/06/ P.A. Kulman, V.I. Mirkitanov, Yu.V. Perchatkin, K.V. Schurin: published on 23.07.89, Bull. No. 27. 3 p.

Периодичность — 4 номера в год. Подписной индекс: 46463.

Научно-технический журнал «Транспорт Урала».

Издание зарегистрировано в Министерстве РФ по делам печати,  
телерадиовещания и средств массовых коммуникаций 27 мая 2004 г.  
Свидетельство ПИ №77-18098.

Адрес редакции:

Екатеринбург, ул. Колмогорова, 66. Тел.: (343) 221-24-44, 221-24-86  
e-mail: [transporturala@usurt.ru](mailto:transporturala@usurt.ru), [lneverova@nis.usurt.ru](mailto:lneverova@nis.usurt.ru)  
<http://www.transporturala.usurt.ru>

Учредитель: Уральский государственный университет путей сообщения.

Над выпуском работали:

Переводчики: Ершова Елена Владимировна, Бочкирева Анна Викторовна (Департамент  
Международных Связей (ДМС) УрГУПС, тел.: (343) 221-24-86).

Корректор Пупова Елена Семеновна.

Верстка и дизайн: Курносов Антон Леонидович.

Выпускающий редактор Неверова Людмила Васильевна.

Контактный телефон: (343)370 00 53, 89068021451

e-mail: [lneverova@nis.usurt.ru](mailto:lneverova@nis.usurt.ru), [lneverova@eka-net.ru](mailto:lneverova@eka-net.ru)

С 1 января 2007 года журнал включен ВАКом в перечень периодических, научных и научно-технических изданий, выпускаемых в Российской Федерации, в которых рекомендуется публикация основных результатов диссертаций на соискание ученой степени доктора наук.

Отпечатано в ООО «Эзапринт»: г.Екатеринбург, ул. Ухтомская, 45.