

# ИЗВЕСТИЯ

№ 2(30)

2017

# Транссиб



## РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ ЖУРНАЛА

1. **Овчаренко Сергей Михайлович** – главный редактор, ректор ОмГУПС, д.т.н., доцент.
2. **Галиев Ильхам Исламович** – зам. главного редактора, президент ОмГУПС, д.т.н., профессор, заслуженный деятель науки и техники РФ.
3. **Шантаренко Сергей Георгиевич** – зам. главного редактора, проректор по научной работе ОмГУПС, д.т.н., доцент.
4. **Черемисин Василий Титович** – зам. главного редактора, директор НИИЭ ОмГУПС, д.т.н., профессор.
5. **Бокарев Сергей Александрович** – проректор по научной работе СГУПС, д.т.н., профессор (Новосибирск).
6. **Глинка Тадеуш** – доктор, профессор Силезского политехнического университета (Гливице, Польша).
7. **Демин Юрий Васильевич** – профессор кафедры «Электрооборудование и автоматика» СГУВТ, д.т.н., профессор (Новосибирск).
8. **Каргапольцев Сергей Константинович** – первый проректор ИрГУПС, д.т.н., профессор (Иркутск).
9. **Косарев Александр Борисович** – зам. генерального директора ОАО «ВНИИЖТ», д.т.н., профессор (Москва).
10. **Лю Цзянькунь** – доктор, профессор Пекинского транспортного университета, Школа строительства (Пекин, Китай).
11. **Сидоров Олег Алексеевич** – зав. кафедрой «Электроснабжение железнодорожного транспорта» ОмГУПС, д.т.н., профессор.
12. **Солоненко Владимир Гельевич** – профессор кафедры «Вагоны» КазАТК, д.т.н., профессор (Алматы, Республика Казахстан).
13. **Файзибаев Шерзод Сабирович** – профессор кафедры «Вагоны и вагонное хозяйство» ТашИИТа, д.т.н., профессор (Ташкент, Республика Узбекистан).
14. **Харламов Виктор Васильевич** – зав. кафедрой «Электрические машины и общая электротехника» ОмГУПС, д.т.н., профессор.

## EDITORIAL BOARD

1. **Ovcharenko Sergey Mikhailovich** – chief editor, the rector of OSTU, D. Sc., associate professor (Omsk, Russia).
2. **Galiiev Ilkham Islamovich** – deputy chief editor, the president of OSTU, D. Sc., professor, the honored worker of science and engineering of the Russian Federation (Omsk, Russia).
3. **Shantarenko Sergey Georgievich** – deputy chief editor, vice-rector for research of OSTU, D. Sc., associate professor (Omsk, Russia).
4. **Cheremisin Vasily Titovich** – deputy chief editor, director of SRIE OSTU, D. Sc., professor (Omsk, Russia).
5. **Bokaryov Sergey Alexandrovich** – vice-rector for research of SSTU, D. Sc., professor (Novosibirsk, Russia).
6. **Glinka Tadeusz** – Ph. D., professor of Silesian University of Technology (Gliwice, Polish).
7. **Demin Yuriy Vasilyevich** – professor of the department «Electrical equipment and automation» of SSUWT, D. Sc., professor (Novosibirsk, Russia).
8. **Kargapol'tcev Sergey Konstantinovich** – vice-rector of ISTU, D. Sc., professor (Irkutsk, Russia).
9. **Kosarev Alexander Borisovich** – deputy of general director of JSC «VNIIZhT» (Railway Research Institute), D. Sc., professor (Moscow, Russia).
10. **Liu Jiankun** – Ph. D., professor of Beijing Jiaotong University, School of Civil Engineering (Beijing, China).
11. **Sidorov Oleg Alexeevich** – head of the department «Power supply of rail transport» of OSTU, D. Sc., professor (Omsk, Russia).
12. **Solonenko Vladimir Gelyevich** – professor of the department «Wagons» of KazATC, D. Sc., professor (Almaty, Kazakhstan).
13. **Fayzibaev Sherzod Sabirovich** – professor of the department «Wagons» of TashIRE, D. Sc., professor (Tashkent, Uzbekistan).
14. **Kharlamov Viktor Vasilyevich** – head of the department «Electrical machines and common electrotechnic» of OSTU, D. Sc., professor (Omsk, Russia).

Захаренко Елена Игоревна – ответственный секретарь (Омск).

## СОДЕРЖАНИЕ

### Подвижной состав железных дорог

- Белоглазов А. К., Тарута В. Ф., Четвергов В. А., Чулков А. В. Оценка эффективности работы дизель-генераторных установок по результатам контроля параметров при проведении реостатных испытаний ..... 2
- Валиев М. Ш. Применение датчика содержания кислорода для контроля величины коэффициента избытка воздуха тепловозного дизеля ..... 9
- Иванов П. Ю., Мануилов Н. И., Дульский Е. Ю. Причины самопроизвольного срабатывания автотормозов в грузовых поездах ..... 17
- Милотина Л. В., Чулков А. В., Петров П. Г. Моделирование процессов влияния физико-химических показателей метиловых эфиров рапсового масла на характеристики впрыскивания и распыливания топлива ..... 25
- Михеев В. А. Оценка технического состояния топливной системы дизельной энергетической установки тепловоза ..... 34
- Нехаев В. А., Николаев В. А. О парадигме математических моделей динамики подвижного состава и их устойчивости ..... 42
- Харламов В. В., Попов Д. И., Стретенцев А. И. Разработка цифрового прибора контроля коммутации тяговых электродвигателей подвижного состава ..... 54
- Шатохин А. П., Есин Н. В. Повышение безопасности движения грузовых электровозов за счет совершенствования порядка проверки целостности тормозной магистрали перед отправлением на участок следования ..... 65

### Транспортная энергетика

- Каштанов А. Л., Никифоров М. М., Ушаков С. Ю. Новые подходы к исследованию проблемы небаланса электроэнергии на тягу поездов ..... 77
- Незевак В. Л. Основные зависимости изменения объема электроэнергии от параметров графика движения поездов на участках постоянного тока с I-м типом профиля ..... 87

### Информационные технологии, автоматика, связь, телекоммуникации

- Марюхненко В. С., Гармышева Е. С. Анализ применения фазированных антенных решеток для приема сигналов спутниковой радионавигационной системы в комплексе локомотивных устройств безопасности ..... 99
- Петров В. В. Оценка помехоустойчивости измерительных устройств при исследовании фазовых соотношений в тяговых сетях переменного тока железнодорожного транспорта ..... 113
- Петрова Л. С., Горosh В. А., Заложный Н. В. Математическое моделирование процессов нагрева тел при воздействии концентрированных потоков энергии на основе нелинейного гиперболического уравнения теплопроводности ..... 124

### Путь и искусственные сооружения

- Косенко С. А., Квашнин М. Я., Бондарь И. С., Акимов С. С. Эксплуатационные изменения напряжений в рельсе при воздействии подвижного состава ..... 133

### Управление перевозочными процессами и безопасность движения поездов

- Покровская О. Д. Исследование эволюции транспортных узлов как логистических объектов ..... 146

Научно-технический журнал «Известия Транссиба»

Учредитель: федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования

«Омский государственный университет путей сообщения»

(ОмГУПС (ОмИИТ))

644046, г. Омск, пр. Маркса, 35

УДК 629.424.016:621.436.001.24

**А. К. Белоглазов, В. Ф. Тарута, В. А. Четвергов, А. В. Чулков**

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС), г. Омск, Российская Федерация

## **ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ ДИЗЕЛЬ-ГЕНЕРАТОРНЫХ УСТАНОВОК ПО РЕЗУЛЬТАТАМ КОНТРОЛЯ ПАРАМЕТРОВ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ РЕОСТАТНЫХ ИСПЫТАНИЙ**

***Аннотация.** В статье предлагается использование автоматизированных систем контроля параметров дизель-генераторных установок при проведении реостатных испытаний тепловозов, которые позволяют накапливать и анализировать результаты испытаний по разработанным формам протоколов и сводных таблиц параметров во всем диапазоне нагрузок и определять количественный показатель оценки технического состояния ДГУ.*

***Ключевые слова:** тепловоз, дизель-генератор, реостатные испытания, автоматизированная система контроля, статистическая обработка параметров, техническое состояние, топливная экономичность.*

**Anatoliy K. Beloglazov, Viktor F. Taruta, Vitaliy A. Chetvergov, Alexei V. Chulkov**

Omsk State Transport University (OSTU), Omsk, Russian Federation

## **EVALUATION EFFICIENCY OF DIESEL-GENERATOR SETS ACCORDING TO THE CONTROL PARAMETERS RESULTS DURING THE RHEOSTAT TESTS**

***Abstract.** During automated rheostat tests of locomotives it's necessary to control a lot of parameters of the diesel generator set and support systems. Due to the features of perception of the information by human the control is brought to the observation of a small number of parameters.*

*Implementation in practice of rheostat tests of automated systems of inspection and testing allowed to expand the amount of received information.*

*In this article is offered using automated control systems of diesel-generator sets parameters during rheostat tests which allow to accumulate and analyze test data using developed protocols forms and pivot tables with parameters in entire range of loads, also it helps to determine the quantitative index of a technical condition of diesel-generator set.*

***Keywords:** diesel, diesel generator, rheostat test, automated control system, static processing parameters, technical condition, fuel economy.*

При проведении автоматизированных реостатных испытаний (РИ) тепловозов необходимо контролировать множество как электрических, так и тепловых параметров. До появления на станциях реостатных испытаний тепловозов автоматизированных систем контроля и испытаний (АСКИ) контроль теплотехнического состояния дизель-генераторных установок (ДГУ) в силу особенностей восприятия информации человеком сводился к контролю основных параметров: частоты вращения коленчатого вала дизеля, давления вспышки и температуры газов на выходе из цилиндра, а также к визуальному контролю показаний приборов на пульте машиниста тепловоза [1].

Внедрение в практику проведения РИ автоматизированных систем контроля и испытаний помогло значительно расширить объем получаемой информации. Эту информацию можно обрабатывать непосредственно при проведении испытаний, а также накапливать, обрабатывать и анализировать в дальнейшем, используя протокол РИ, который хранится в архиве (рисунок 1).

Обработка полученных в процессе проведения испытаний данных делится на несколько этапов: первичная обработка данных, разработка форм и составление таблиц для систематизации информации, заполнение таблиц, проверка достоверности и статистическая обработка данных, анализ первичных статистик, оценка достоверности отличий, нормирование данных, корреляционный и факторный анализ.

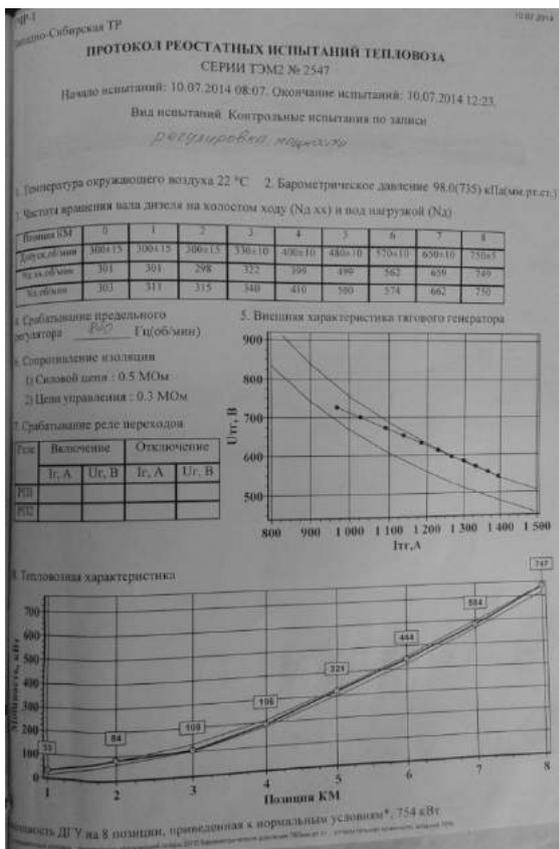
# Подвижной состав железных дорог

Из соображений обеспечения целесообразной последовательности в большинстве случаев обработку данных необходимо начать с составления сводных таблиц. Основой для сводной таблицы исходных данных является протокол РИ тепловоза, каждая строка которого содержит значения всех показателей в одном испытании. В каждом столбце (поле) протокола записаны значения одного показателя по всем режимам испытаний, соответствующим реальным условиям эксплуатации [2]. Таким образом, в каждой ячейке (клетке) таблицы записано только одно значение одного показателя. В начале таблицы даны реквизиты организации, проводящей испытания, ФИО (или какой-либо другой идентификатор) испытателя, номер и секция тепловоза, дата испытаний, измеренные показатели, шкальные оценки и т. п. Эти данные облегчают восприятие показателей таблицы. В каждой последующей таблице записываются значения всех измеренных у данного тепловоза (по номеру и секции) параметров в одном и том же порядке показателей.

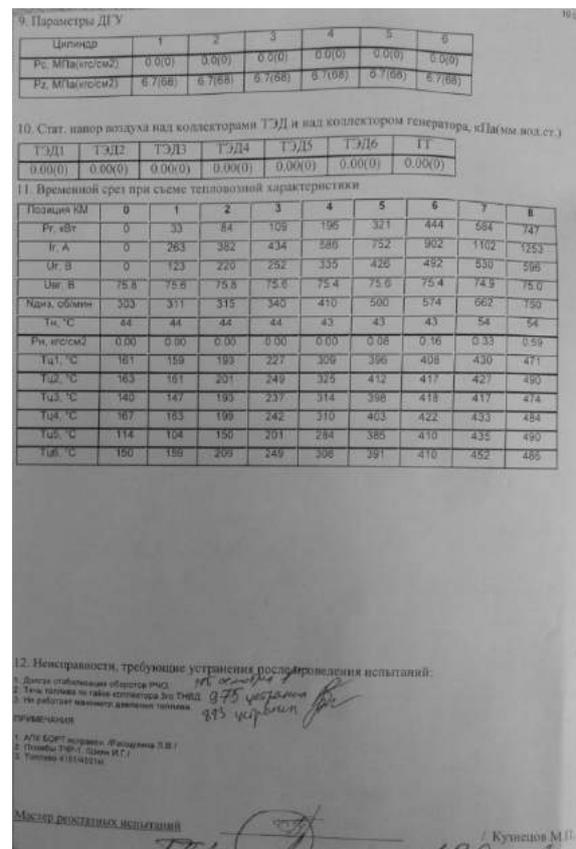
Пример сводной таблицы результатов испытаний тепловоза, сформированный в формате Excel, представлен в таблице 1.

Обработка результатов испытаний на основе программного пакета STATISTICA позволяет получить всестороннее описание данных, найти закономерности и зависимости между переменными, т. е. ответить на вопросы, которые встают перед испытателем при обработке больших массивов информации.

На основе работы с архивом был выполнен статистический анализ распределения мощности дизель-генераторных установок тепловозов ТЭМ2 на номинальном режиме работы ДГУ для двух локомотиворемонтных депо – О и Б. Аналогичный анализ выполнен для температуры выпускных газов по цилиндрам дизеля на этом же нагрузочном режиме (100 % номинальной мощности). Общий объем выборки составил 327 секций тепловозов.



а



б

Рисунок 1 – Образец протокола реостатных испытаний тепловоза ТЭМ2 с использованием АСКИ

По вычисленному математическому ожиданию и среднему квадратическому отклонению для каждой совокупности параметров были построены графики плотности вероятности (частоты) для нормального закона распределения, описываемой выражением:

$$f_i = \frac{1}{\sigma_i \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(x_i - \mu_i)^2}{2\sigma_i^2}\right), \quad (1)$$

где  $x_i$  – значение, для которого вычисляется плотность вероятности;

$\mu_i$  – математическое ожидание для теоретического распределения;

$\delta_i$  – среднее квадратическое отклонение параметров.

Полученные результаты сведены в таблицы 2 – 5 и представлены на рисунках 2 и 3.

Таблица 1 – Фрагмент табличного представления результатов реостатных испытаний тепловоза ТЭМ2

Протокол реостатных испытаний тепловоза ТЭМ2 2547: температура окружающего воздуха 19 °С; барометрическое давление 100.1(751) кПа (мм рт. ст.); частота вращения вала дизеля на холостом ходу ( $N_{х.х}$ ) и под нагрузкой ( $N_{л}$ )									
Позиция КМ	0	1	2	3	4	5	6	7	8
Норма, об/мин	300 ± 15	300 ± 15	300 ± 15	330 ± 10	400 ± 10	480 ± 10	570 ± 10	650 ± 10	750 ± 5
$N_{д.х.х}$ , об/мин	306	306	307	334	392	468	580	664	745
$N_{л}$ , об/мин	304	284	280	329	402	502	574	661	750
«Временной срез» тепловозной характеристики									
Позиция КМ	0	1	2	3	4	5	6	7	8
$P_{г}$ , кВт	0	21	61	117	196	322	449	582	741
$I_{г}$ , А	0	200	340	487	618	750	891	1088	1213
$U_{г}$ , В	0	106	179	241	317	430	504	535	611
$U_{вр}$ , В	74,7	74,5	74,8	74,7	74,9	74,7	74,6	74,5	74,6
$N_{диз}$ , об/мин	304	284	280	329	402	502	574	661	750
$T_{п}$ , С°	34	33	33	33	33	33	32	42	35
$P_{п}$ , кг/см <sup>2</sup>	0	0	0	0	0	0,07	0,14	0,31	0,53
$T_{п1}$ , С°	173	155	187	194	203	305	324	410	454
$T_{п2}$ , С°	154	127	157	162	177	297	321	400	448
$T_{п3}$ , С°	170	159	192	196	209	324	352	411	462
$T_{п4}$ , С°	180	160	190	194	208	313	341	429	471
$T_{п5}$ , С°	96	96	136	142	159	289	318	402	455
$T_{п6}$ , С°	171	140	167	171	186	312	343	427	471

Таблица 2 – Статистические данные о распределении температур выпускных газов по цилиндрам ДГУ тепловозов ТЭМ2 в локомотивном депо Б

№ п/п $i$	Интервал $\alpha_i - \beta_i$	Середина интервала $x_i = \frac{\alpha_i + \beta_i}{2}$	Частота $n_i$	Частость $f_i = \frac{n_i}{n}$
1	2	3	4	5
1	255 – 295	275	9	0,02
2	296 – 336	316	8	0,02
3	337 – 377	357	26	0,06

Окончание таблицы 2

1	2	3	4	5
4	378 – 418	398	62	0,15
5	419 – 459	439	116	0,27
6	460 – 500	480	125	0,30
7	501 – 541	521	38	0,09
8	542 – 582	562	16	0,04
9	583 – 623	603	9	0,02
10	624 – 664	644	13	0,03

Таблица 3 – Статистические данные о распределении температур выпускных газов по цилиндрам ДГУ тепловозов ТЭМ2 в локомотивном депо О

№ п/п <i>i</i>	Интервал $\alpha_i - \beta_i$	Середина интервала $x_i = \frac{\alpha_i + \beta_i}{2}$	Частота $n_i$	Частость $f_i = \frac{n_i}{n}$
1	258 – 299	298	2	0,00
2	300 – 341	340	1	0,00
3	342 – 383	382	51	0,03
4	384 – 425	424	177	0,12
5	426 – 467	466	554	0,37
6	468 – 509	508	457	0,30
7	510 – 551	550	204	0,13
8	552 – 593	592	63	0,04
9	594 – 635	634	22	0,01
10	636 – 677	676	7	0

Таблица 4 – Статистические данные о распределении мощностей ДГУ тепловозов ТЭМ2 в локомотивном депо Б

№ п/п <i>i</i>	Интервал $\alpha_i - \beta_i$	Середина интервала $x_i = \frac{\alpha_i + \beta_i}{2}$	Частота $n_i$	Частость $f_i = \frac{n_i}{n}$
1	520 – 550	535	2	0,04
2	551 – 581	566	3	0,04
3	582 – 612	597	1	0,01
4	613 – 643	628	1	0,01
...	...	...	...	...
8	737 – 767	752	13	0,18
9	768 – 798	783	6	0,08
10	799 – 829	814	1	0,02

Таблица 5 – Статистические данные о распределении мощностей ДГУ тепловозов ТЭМ2 в локомотивном депо О

№ п/п <i>i</i>	Интервал $\alpha_i - \beta_i$	Середина интервала $x_i = \frac{\alpha_i + \beta_i}{2}$	Частота $n_i$	Частость $f_i = \frac{n_i}{n}$
1	2	3	4	5
1	373 – 424	399	5	0,02

Окончание таблицы 5

1	2	3	4	5
2	425 – 476	450	7	0,03
3	477 – 528	503	12	0,05
4	529 – 580	554	20	0,08
5	581 – 632	607	21	0,08
6	633 – 684	658	40	0,15
7	685 – 736	711	82	0,32
8	737 – 788	762	65	0,25
9	789 – 840	815	2	0,01
10	841 – 892	866	2	0,01

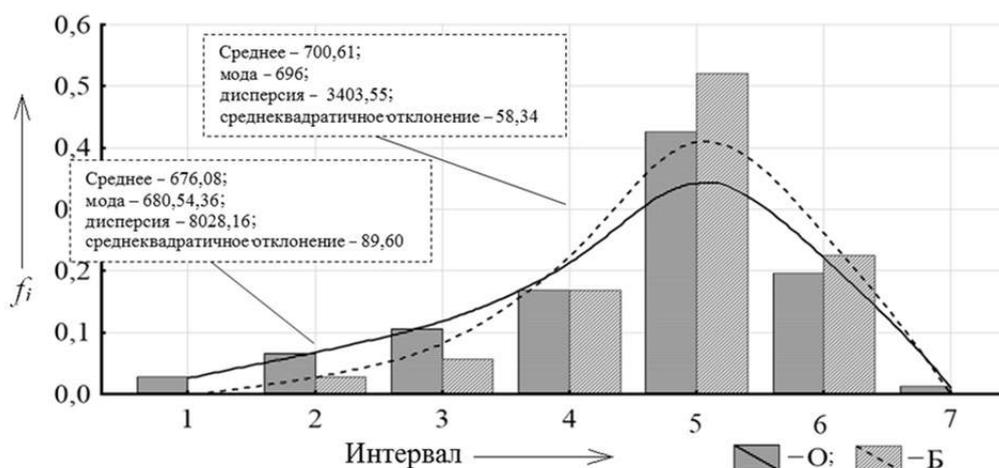


Рисунок 2 – Распределение показателей мощности локомотивов серии ТЭМ2 при реостатных испытаниях

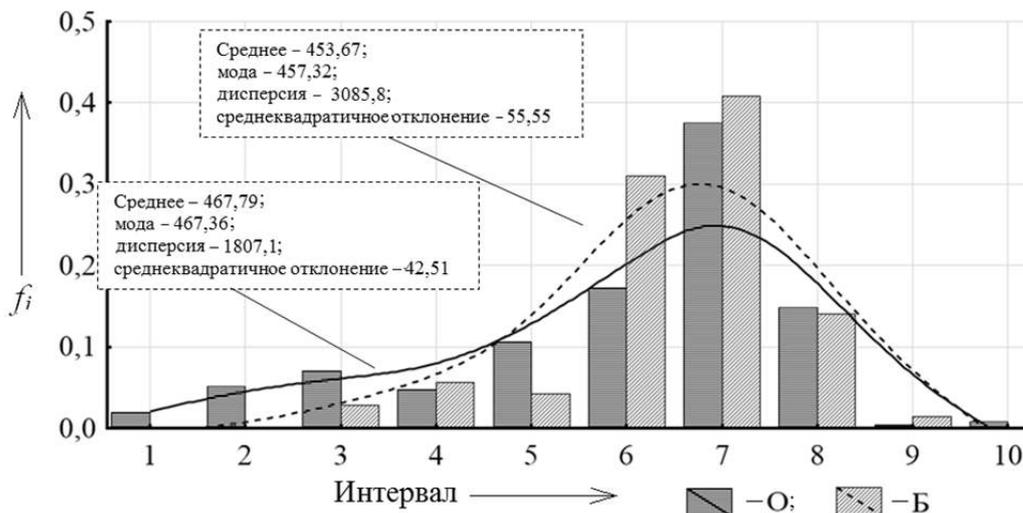


Рисунок 3 – Распределение показателей температуры выпускных газов по цилиндрам тепловозов серии ТЭМ2 при реостатных испытаниях

Сравнительный анализ статистической информации о теплонапряженности дизель-генераторных установок тепловозов в двух локомотивных депо показывает, что статистические характеристики контролируемых параметров (мощности ДГУ и температур выпускных газов по цилиндрам) подобны (нормальный закон распределения), но параметры сглаживающих кривых отличаются друг от друга. Мощность ДГУ тепловозов в обоих депо ниже установленной нормы (740 кВт), однако в локомотивном депо Б мощность в среднем на 25 кВт (около 5 %) выше, чем в локомотивном депо О. При этом разброс мощностей при

настройке ДГУ в локомотивном депо О в полтора раза выше, чем в локомотивном депо Б ( $\approx 60$  и  $90$  кВт).

Анализ распределения температур выпускных газов по цилиндрам показывает, что средние значения температур в локомотивном депо О выше, чем в локомотивном депо Б ( $467$  и  $453$  °С). При большем показателе среднего квадратического отклонения ( $55$  °С депо О и  $42$  °С депо Б) это свидетельствует об устойчивости отмеченной тенденции.

Чаще всего анализ параметров работы ДГУ тепловозов проводится для установления функциональной зависимости между ними. Например, зависимость температуры выпускных газов от мощности ДГУ с достаточной для практических целей точностью можно считать линейной. Большее значение мощности (при равной частоте вращения коленчатого вала дизеля) достигается за счет увеличения цикловой подачи топлива или лучшего технического состояния дизель-генераторной установки. Известно также, что потери тепла с уходящими газами характеризуют энергетическую эффективность работы ДГУ: при равной мощности двух дизелей более совершенным является рабочий процесс у того, где температура выпускных газов ниже.

Обозначив через обобщенный показатель  $q$  отношение анализируемых параметров:

$$q = \frac{P_{\text{ДГУ}}}{t_r}, \quad (2)$$

где  $P_{\text{ДГУ}}$  – средняя мощность ДГУ тепловоза, кВт;

$t_r$  – средняя температура выпускных газов по цилиндрам дизеля, °С,

можно использовать его для сравнительной оценки эффективности работы ДГУ. Например, применительно к анализируемым данным можно сказать, что эффективность использования ДГУ тепловозов в локомотивном депо Б выше, чем в локомотивном депо О ( $q_1 = 1.53 > q_2 = 1.45$ ).

Таким образом, непрерывный мониторинг и системный анализ информации о результатах проведенных РИ в депо позволяют наглядно представить картину текущего технического состояния тепловозов и на этой основе вести работы, направленные на повышение их эффективности и топливной экономичности в эксплуатации.

На основании изложенного можно сделать следующие выводы.

1. Полученные результаты свидетельствуют о неудовлетворительном качестве ремонта тепловозов, в частности, топливной аппаратуры дизелей. Основными причинами сложившегося положения являются устаревшее стендовое испытательное оборудование и недостаточно высокая квалификация ремонтного персонала.

2. Заключительным этапом испытания топливной аппаратуры должна стать объективная (не зависящая от субъективных оценок испытателя) проверка качества выполненного ремонта. Топливные отделения ремонтных депо необходимо оснащать автоматизированной стендовой испытательной аппаратурой.

3. Добиться улучшения технического состояния ДГУ тепловозов можно и за счет более качественной настройки при проведении реостатных испытаний в депо.

### Список литературы

1. Глухов, С. В. Утилизация вторичных энергетических ресурсов при проведении реостатных испытаний [Текст] / С. В. Глухов, В. Ф. Тарута, М. В. Глухова // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2015. – № 3. – С. 68 – 72.

2. Техническая диагностика и надежность железнодорожной техники [Текст] / В. М. Бочаров, А. Н. Головаш и др. – М.: Спутник+, 2006. – Ч. II. – 249 с.

3. Тепловозные двигатели внутреннего сгорания [Текст] / А. Э. Симсон, А. З. Хомич и др. – М.: Транспорт, 1987. – 536 с.

## References

1. Glukhov S. V., Taruta V. F., Glukhova M. V. The utilization of secondary energy resources while conducting test rheostat [Utilizatsiia vtorichnykh energeticheskikh resursov pri provedenii reostatnykh ispytaniy]. *Izvestiia Transsiba – The journal of Transsib Railway Studies*, 2015, no. 3, pp. 68 – 72.
2. Bocharov V. M., Golovash A. N., Molchanov V. V. *Tekhnicheskaya diagnostika i nadezhnost' zheleznodorozhnoi tekhniki* (Technical diagnostics and reliability of railway equipment). Moscow: Company Satellite +, 2006, 249 p.
3. Simson A. E., Khomich A. Z., Kurits A. A. *Teplovozyne dvigateli vnutrennego sgoraniia* (Diesel internal combustion engines). Moscow: Transport, 1987, 536 p.

### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

#### Белоглазов Анатолий Кузьмич

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046, Российская Федерация.

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Локомотивы», ОмГУПС.

Тел.: (3812) 31-34-17.

E-mail: BeloglasovAK@mail.ru

#### Тарута Виктор Федорович

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046, Российская Федерация.

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Локомотивы», ОмГУПС.

Тел.: (3812) 31-34-17.

E-mail: TarutaVF@gmail.com

#### Четвергов Виталий Алексеевич

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046, Российская Федерация.

Доктор технических наук, профессор кафедры «Локомотивы», ОмГУПС.

Тел.: (3812) 31-34-17.

E-mail: ChetvergovVA@omgups.ru

#### Чулков Алексей Владимирович

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046, Российская Федерация.

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Локомотивы», ОмГУПС.

Тел.: (3812) 31-34-17.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Оценка эффективности работы дизель-генераторных установок по результатам контроля параметров при проведении реостатных испытаний [Текст] / А. К. Белоглазов, В. Ф. Тарута и др. // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2017. – № 2 (30). – С. 2 – 8.

### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

#### Beloglazov Anatoliy Kuzmich

Omsk State transport University (OSTU).

35, Marx av., Omsk, 644046, Russia.

Ph. D., associate professor of the department «Locomotives», OSTU.

Tel: (3812) 31-34-17.

E-mail: BeloglasovAK@mail.ru

#### Taruta Viktor Fedorovich

Omsk State transport University (OSTU).

35, Marx av., Omsk, 644046, Russia.

Ph. D., associate professor of the department «Locomotives», OSTU.

Tel: (3812) 31-34-17.

E-mail: TarutaVF@gmail.com

#### Chetvergov Vitaliy Alexeevich

Omsk State transport University (OSTU).

35, Marx av., Omsk, 644046, Russia.

Dr. Sci. Tech., professor of the department «Locomotives», OSTU.

Tel: (3812) 31-34-17.

E-mail: ChetvergovVA@omgups.ru

#### Chulkov Alexei Vladimirovich

Omsk State transport University (OSTU).

35, Marx av., Omsk, 644046, Russia.

Ph. D., associate professor of the department «Locomotives», OSTU.

Tel: (3812) 31-34-17.

### BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Beloglazov A. K., Taruta V. F., Chetvergov V. A., Chulkov A. V. Evaluation efficiency of diesel-generator sets according to the control parameters results during the rheostat tests. *Journal of Transsib Railway Studies*, 2017, vol. 30, no. 2, pp. 2 – 8. (In Russian).

УДК 629.424.1

**М. Ш. Валиев**

Ташкентский институт инженеров железнодорожного транспорта (ТашИИТ),  
г. Ташкент, Республика Узбекистан

## ПРИМЕНЕНИЕ ДАТЧИКА СОДЕРЖАНИЯ КИСЛОРОДА ДЛЯ КОНТРОЛЯ ВЕЛИЧИНЫ КОЭФФИЦИЕНТА ИЗБЫТКА ВОЗДУХА ТЕПЛОВОЗНОГО ДИЗЕЛЯ

***Аннотация.** Учет реального технического состояния оборудования локомотива при планировании объемов его ремонта является одним из важнейших резервов сокращения эксплуатационных расходов железных дорог и снижения себестоимости перевозок. Непрерывный контроль технического состояния локомотива в эксплуатации осуществляется с использованием стационарных и бортовых средств технической диагностики. Повышение эксплуатационной экономичности и надежности тепловозов требует непрерывного контроля технического состояния их оборудования в процессе эксплуатации. Для непрерывного контроля величины коэффициента избытка воздуха в цилиндре дизеля может использоваться широкополосный датчик содержания кислорода в отработавших газах, широко применяющийся в системах управления автомобильных дизелей. Он предназначен для косвенной оценки состава смеси, сгорающей в цилиндрах двигателя, по содержанию кислорода в отработавших газах.*

***Ключевые слова:** датчик содержания кислорода, коэффициент избытка воздуха, топливная аппаратура, цилиндропоршневая группа.*

**Mukhammad Sh. Valiev**

Tashkent Institute of Railway Engineers (TIRE), Tashkent, Republic of Uzbekistan

## APPLICATION OF OXYGEN CONTENT SENSOR FOR CONTROLLING THE VALUE OF EXCESS AIR COEFFICIENT

***Abstract.** The account of a real technical condition of the equipment of the locomotive at planning of volumes of its repair is one of the major reserves of reduction of working costs of railways and decrease in the cost price of transportations. The continuous control of a technical condition of the locomotive in operation is carried out with use of stationary and onboard means of technical diagnostics. The increasing of operational profitability and reliability of diesel locomotives demands continuous control for a technical condition of their equipment in the service. The wide-band exhaust gases oxygen content sensor can be used for continuous monitoring of the air excess coefficient in the locomotive diesel engine cylinders. This type sensors are widely used in automotive diesel engines control systems. It means for indirect estimation of the engine cylinders mixture quality by the exhaust gases oxygen content.*

***Keywords:** oxygen sensor, air ratio, fuel injection equipment, the cylinder-piston group.*

Коэффициент избытка воздуха является одним из основных параметров рабочего процесса двигателя внутреннего сгорания, во многом определяющих показатели его надежности и экономичности в эксплуатации.

С величиной коэффициента избытка воздуха непосредственно связаны значения целого ряда других показателей рабочего процесса двигателя, прежде всего температуры отработавших газов (ОГ). Соответствие относительных изменений значений коэффициента избытка воздуха и температуры отработавших газов является диагностическим параметром, характеризующим техническое состояние цилиндров двигателя [1, 2].

В автомобильных двигателях текущее значение коэффициента избытка воздуха используется для оптимизации как установившихся, так и переходных режимов работы двигателя с целью, во-первых, уменьшения расхода топлива, а во-вторых – с целью увеличения ресурса работы каталитических нейтрализаторов отработавших газов. При этом непрерывный контроль текущего значения коэффициента избытка воздуха (в зарубежной литературе он обо-

значается греческой буквой  $\lambda$ ) осуществляется с помощью датчика содержания кислорода в отработавших газах ( $\lambda$ -зонда).

В дизелях средней и большой мощности (тепловозных и судовых) такие датчики пока находят ограниченное применение, в основном для улучшения экологических показателей двигателей [3, 4].

Непрерывное увеличение уровня форсирования дизелей современных тепловозов при одновременном ужесточении требований к их экологическим показателям обуславливает необходимость повышения качества управления силовой установкой тепловоза в переходных режимах работы. Использование величины коэффициента избытка воздуха в качестве интегрального показателя текущего качества рабочего процесса в цилиндрах дизеля является существенным резервом повышения качества переходных процессов дизеля [5].

Основным элементом устройства является датчик содержания кислорода в отработавших газах дизеля. В бензиновых двигателях чаще используются узкополосный датчик, который является эффективным детектором стехиометрического состава смеси, позволяющим современным системам управления автомобильными двигателями поддерживать значение коэффициента избытка воздуха  $\alpha_{ц} = 1$  с точностью  $\pm 1\%$ . Этим достигается как высокая топливная экономичность двигателя, так и увеличение ресурса работы каталитических нейтрализаторов [6].

Однако использовать его для контроля значения коэффициента избытка воздуха в бедных смесях ( $\alpha_{ц} > 1$ ) практически невозможно. Для этих целей применяются широкополосные датчики содержания кислорода в ОГ (рисунок 1).

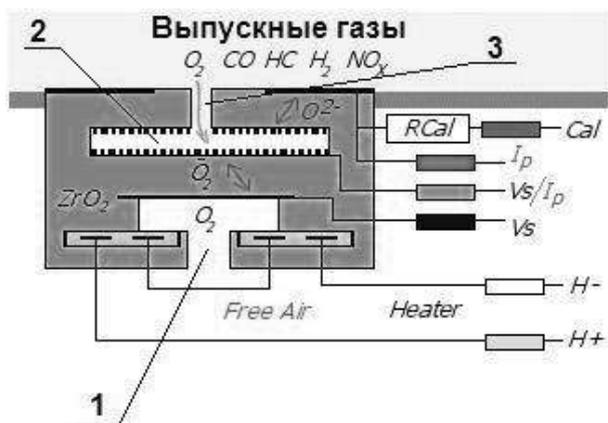


Рисунок 1 – Схема циркониевого широкополосного датчика кислорода:  
 1 – измерительная ячейка; 2 – ячейка накачки; 3 – отверстие в электролите

Широкополосные датчики имеют две ячейки – измерительную 1 и ячейку накачки 2. Ячейка накачки представляет собой гальванический элемент с твердым керамическим циркониевым электролитом, оба электрода которого омываются отработавшими газами. Внешний электрод погружен в поток ОГ выпускного коллектора, к внутреннему электроду ОГ подводятся через специальное отверстие (диффузионный барьер) 3 в твердом электролите. Прикладывая напряжение к электродам ячейки накачки (входы  $I_p$  и  $V_s/I_p$  на рисунке 3), можно управлять переносом ионов кислорода между электродами ячейки.

При положительном потенциале входа  $I_p$  относительно входа  $V_s/I_p$  перенос кислорода будет осуществляться от внутреннего электрода ячейки накачки к внешнему, при отрицательном потенциале  $I_p$  – в противоположном направлении. Изменяя величину тока  $I_p$  (напряжение между электродами ячейки накачки), можно добиться удаления из ячейки всего кислорода. Необходимая для этого величина тока  $I_p$  будет зависеть от содержания кислорода в ОГ. Таким образом, постоянно поддерживая в ячейке накачки нулевое содержание ионов

кислорода, по величине необходимого для этого тока  $I_P$  можно оценивать содержание кислорода в ОГ [7].

Измерительная ячейка 1 датчика предназначена для контроля содержания кислорода в ячейке накачки 2. Ее внешний электрод находится внутри ячейки накачки, вследствие чего выходное напряжение  $U_S$  измерительной ячейки характеризует соотношение концентрации кислорода в ячейке накачки и атмосферном воздухе. При отсутствии кислорода на внешнем электроде циркониевого гальванического элемента это напряжение равно 450 мВ. Таким образом, поддерживая напряжение  $U_S$  равным 450 мВ за счет изменения тока накачки  $I_P$ , по величине этого тока можно оценивать содержание кислорода в ОГ дизеля.

Для изготовления макетного образца устройства контроля коэффициента избытка воздуха тепловозного дизеля и проведения экспериментальных исследований был выбран широкополосный датчик LSU 4.2 фирмы *Bosch* [8].

Тарировочная кривая датчика для температуры измеряемой среды 20 °С, температуры керамической основы датчика 750 °С и нулевого избыточного давления измеряемой среды представлена на рисунке 2.

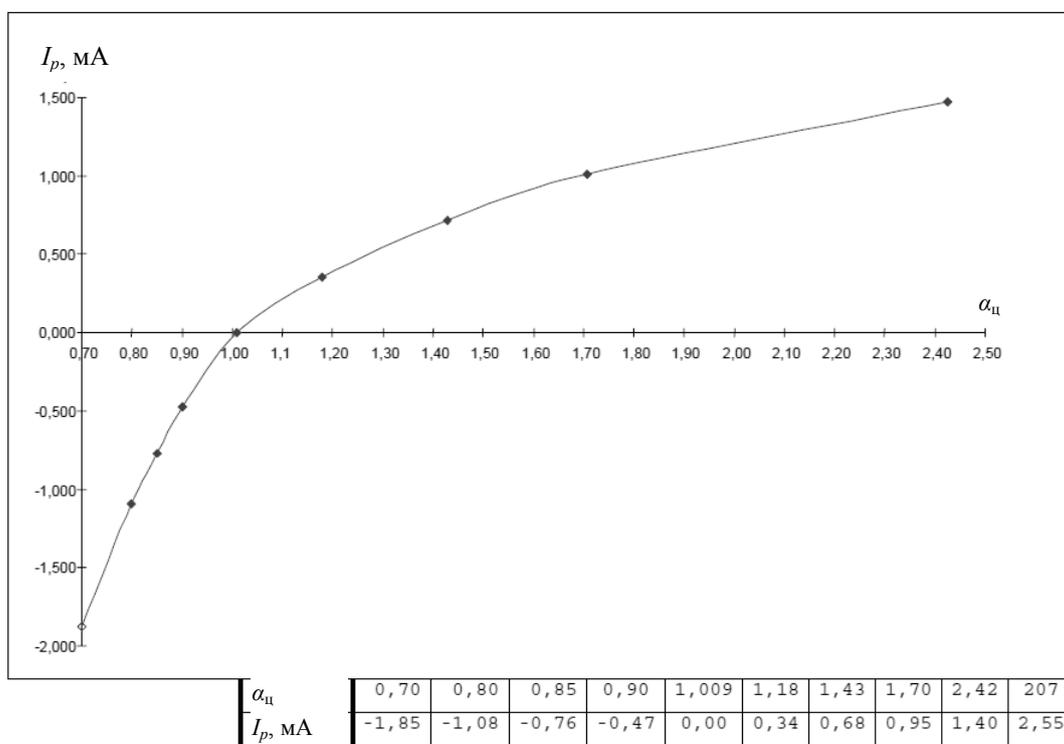


Рисунок 2 – Тарировочная кривая датчика *LSU 4.2* для нормальных условий

При наличии избыточного давления измеряемой среды (отработавших газов) результат измерения должен корректироваться. Коррекция осуществляется приведением реального значения тока накачки  $I_P$  к нормальным условиям с использованием следующей зависимости [9]:

$$I_P(P_0) = \frac{I_P(P)}{\frac{P}{k+P} \cdot \frac{k+P_0}{P_0}}, \quad (1)$$

где  $I_P(P_0)$  – эквивалентное значение тока накачки для нормальных условий ( $P_0 = 1,013$  бар), мА;

$I_P(P)$  – действительное значение тока накачки для избыточного давления  $P$ , мА;

$k$  – поправочный коэффициент, для  $\alpha_{из} > 1$   $k = 0,47$  бар.

Основная абсолютная погрешность измерения коэффициента избытка воздуха при  $\alpha_{ц} = 1,7$  по данным фирмы-изготовителя для температуры измеряемой среды  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ , температуры керамической основы датчика  $750\text{ }^{\circ}\text{C}$  и нулевого избыточного давления измеряемой среды представлена в таблице [9].

Основная абсолютная погрешность измерения датчика *LSU 4.2*

Основная абсолютная погрешность измерения датчика	Новый датчик	После наработки 200 ч	После наработки 2000 ч
$\Delta \alpha_{ц}$	$\pm 0.05$	$\pm 0.1$	$\pm 0.15$

Для других значений коэффициента избытка воздуха основная абсолютная погрешность измерения может оцениваться по формуле [9]:

$$\Delta \alpha_{ц} = \frac{\alpha_{ц}}{\alpha_{ц} - 1,7} \cdot \frac{\Delta I_P}{I_P} \quad (2)$$

где  $\alpha_{ц}$  – текущее среднее измеренное значение коэффициента избытка воздуха;

$I_P$  – текущее среднее значение тока накачки, мА;

$\Delta I_P$  – среднеквадратическое отклонение тока накачки, мА.

Относительная основная погрешность измерения [9]

$$\bar{\Delta} \alpha_{ц} = \frac{1}{\alpha_{ц} - 1,7} \cdot \frac{\Delta I_P}{I_P} \quad (3)$$

Процесс измерения коэффициента избытка воздуха широкополосным датчиком кислорода предполагает стабилизацию напряжения  $U_S$  на соответствующем выходе датчика за счет изменения тока  $I_P$  и контроль величины тока. Таким образом, схема управления датчиком должна представлять собой регулятор напряжения  $U_S$ , управляющим воздействием которого является ток накачки  $I_P$ .

Структурная схема системы управления датчиком представлена на рисунке 3. Эта схема представляет собой астатический ПИД-регулятор напряжения  $U_S$  на одноименном выходе датчика. Балластное сопротивление  $R_B$  номиналом 62 Ом совместно с внутренним калибровочным сопротивлением датчика  $R_{CAL}$  обеспечивают формирование нормативной тарировочной характеристики датчика (см. рисунок 2).

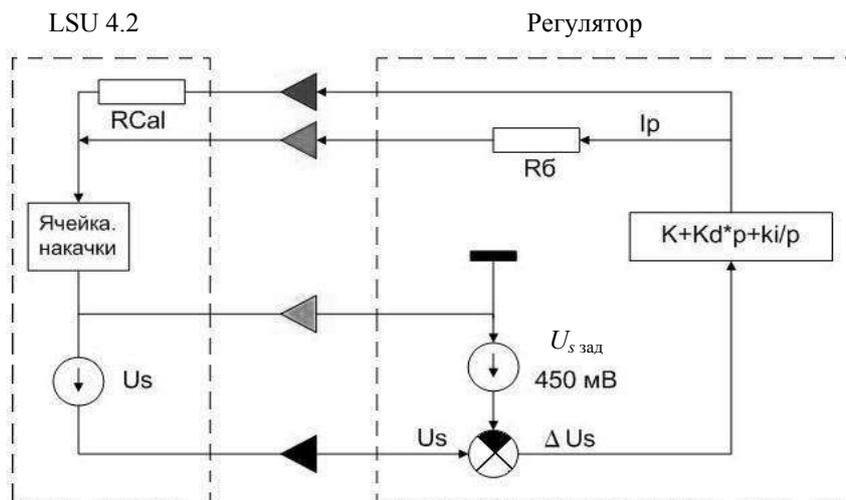


Рисунок 3 – Структурная схема системы управления датчиком *LSU 4.2*

В макетном устройстве регулятор был реализован на ПЭВМ, при этом для контроля величины напряжения  $U_S$  и формирования управляющего воздействия  $I_P$ , а также управления током нагревателя датчика был разработан и изготовлен интерфейсный модуль, основой

схемы которого является многофункциональный USB-контроллер ввода-вывода USB-4702 фирмы *Advantech* [10].

Учитывая существенную зависимость результатов измерения коэффициента избытка воздуха от давления измеряемой среды (давления ОГ), оптимальным решением представляется установка датчика на выпускную трубу тепловоза. В этом случае статическое давление ОГ может быть принято равным атмосферному, а поправка должна учитывать только скоростной напор ОГ на выходе из трубы, который относительно невелик.

Кроме того, существенно уменьшается вероятность превышения предельной температуры датчика даже при использовании его на высокофорсированных дизелях. Питание цепи нагревателя датчика осуществлялось непосредственно от банок аккумуляторной батареи суммарным напряжением 13,6 В при запущенном дизеле и включенном контакторе КРН.

Как следует из рисунка 4, устройство практически представляет собой разгерметизированную трубку Пито [9]. Непрерывный перепуск газа через коллектор, достигаемый благодаря отверстию 7, обеспечивает, с одной стороны, максимальное быстродействие измерительного канала вследствие непрерывного подвода свежего газа к чувствительному элементу датчика 4, а с другой стороны – дополнительное снижение избыточного давления ОГ в месте установки датчика из-за потерь напора по длине коллектора. Увеличенный диаметр коллектора 5 обеспечивает снижение скоростного напора газа в точке установки датчика 4, а также увеличение поверхности теплообмена, исключая перегрев корпуса датчика и соединительного кабеля 6.

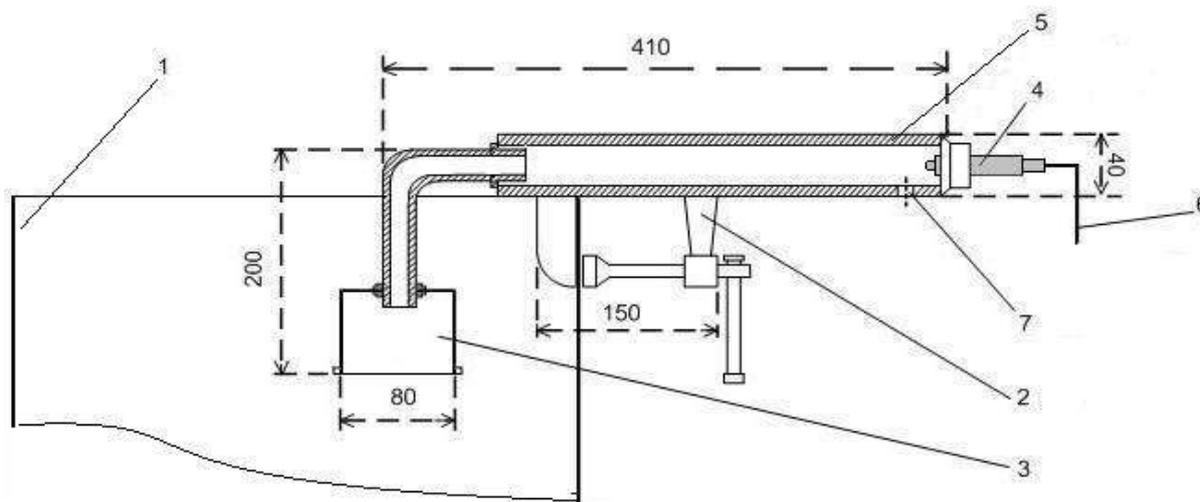


Рисунок 4 – Установка устройства для контроля коэффициента избытка воздуха на выпускную трубу тепловоза:  
1 – выпускная труба; 2 – струбцина; 3 – газозаборник; 4 – датчик; 5 – коллектор; 6 – соединительный кабель;  
7 – отверстие

Поскольку при установке датчика на выпускную трубу он контролирует содержание кислорода в отработавших газах на выходе из дизеля, выходным параметром устройства будет суммарный коэффициент избытка воздуха, учитывающий не только кислород, оставшийся от реакции окисления топлива, но и кислород продувочного воздуха.

В процессе лабораторных испытаний устройства были определены коэффициенты  $K$ ,  $K_d$  и  $K_i$  ПИД-регулятора (см. рисунок 3) при работе датчика на чистом воздухе.

Стендовые испытания устройства для контроля величины коэффициента избытка воздуха тепловозного дизеля выполнялись на тепловозе UzTE16M № 0035. А в режиме нагружения дизель-генераторной установки на тормозные резисторы тепловоза.

Параметры режима работы дизель-генераторной установки в процессе испытаний определялись по данным бортового накопителя тепловоза. Синхронизация данных по времени

осуществлялась посредством ручной установки одинакового времени на компьютере пульта устройства индикации тепловоза, осуществляющего накопление данных, и на компьютере устройства с точностью до  $\pm 0,5$ .

В процессе испытаний выполнялись несколько наборов позиций контроллера машиниста (до 10-й) с выдержкой времени на каждой позиции, необходимого для достижения установившегося режима работы дизель-генератора.

На рисунке 5 представлена зависимость суммарного коэффициента избытка воздуха дизеля 1А-5Д49 тепловоза UzTE16М от частоты вращения коленчатого вала дизеля при работе его по тепловозной характеристике.

Изменение коэффициента избытка воздуха и ряда других параметров рабочего процесса дизеля в переходном процессе приведено на рисунке 6.

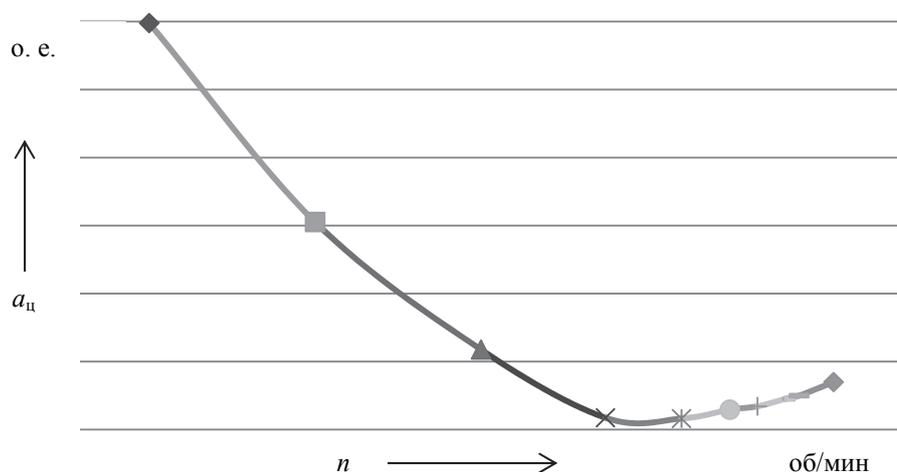


Рисунок 5 – Зависимость коэффициента избытка воздуха от частоты вращения коленчатого вала

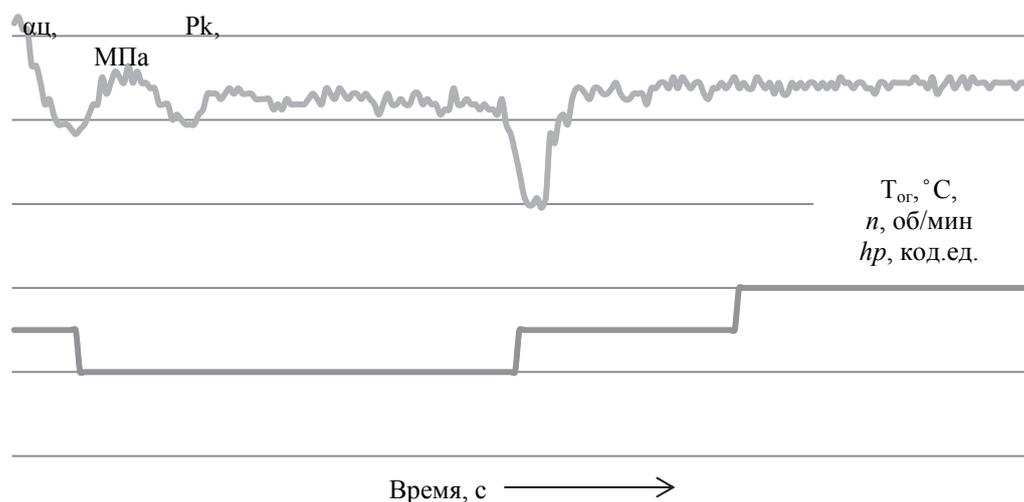


Рисунок 6 – Переходной процесс, вызванный переводом рукоятки контроллера с 5 на 6 ПКМ:

— — коэф. избыт. возд.; — — давл. наддува; — — темп. ОГ; — — ЧВ КВ; — — положение рейки

Эксплуатационные испытания макетного образца устройства для контроля суммарного коэффициента избытка воздуха проводились на тепловозе серии ТЭП70БС во время рядовой поездки. Во время опытной поездки тепловоз находился в исправном эксплуатационном состоянии и эксплуатировался без каких-либо ограничений [7].

На рисунке 7 представлена зависимость суммарного коэффициента избытка воздуха дизеля 2А-5Д49 тепловоза ТЭП70БС от частоты вращения коленчатого вала дизеля при работе его по тепловозной характеристике.

На рисунке 8 приведен переходной процесс, вызванный изменением положения рукоятки контроллера.

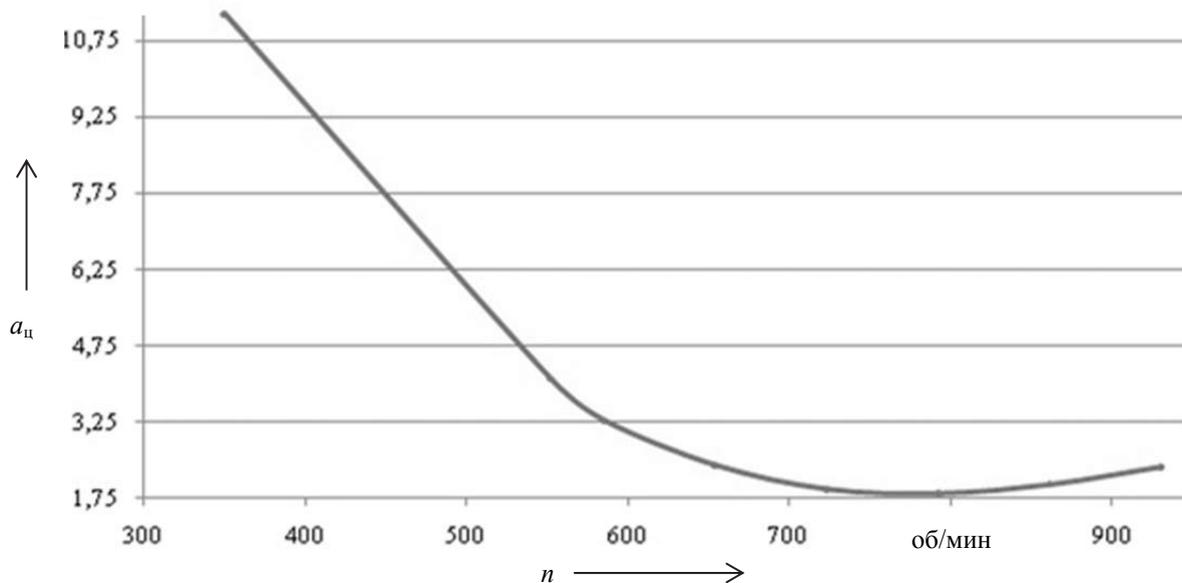


Рисунок 7 – Зависимость коэффициента избытка воздуха от частоты вращения коленчатого вала

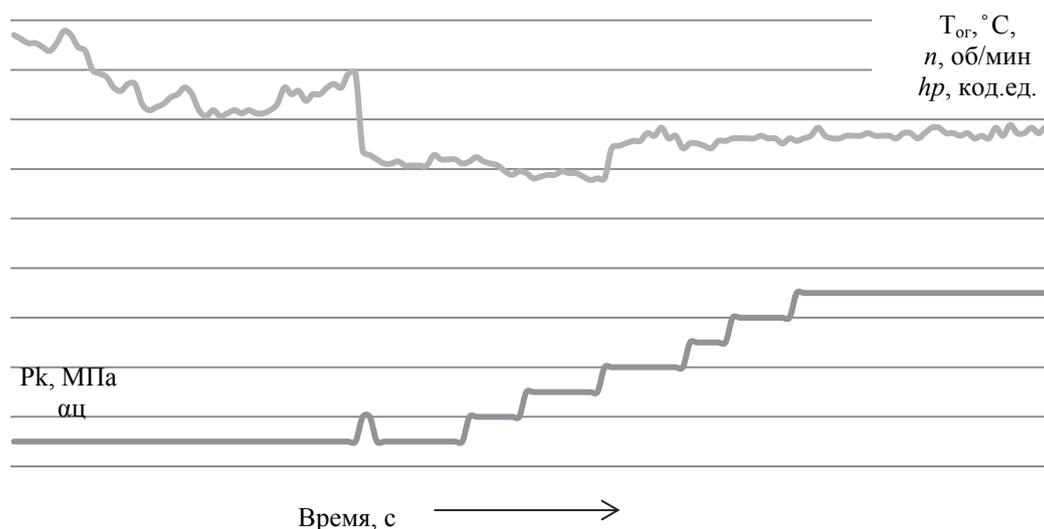


Рисунок 8 – Переходной процесс, вызванный переводом рукоятки контроллера с11 на 13 ПКМ:

— — коэф. избыт. возд.; — — давл. наддува; — — темп. ОГ; — — ЧВ КВ; — — положение рейки

Результаты работы, приведенные в статье, свидетельствуют о работоспособности разработанного макетного образца устройства для контроля коэффициента избытка воздуха тепловозного дизеля. Данное устройство может эффективно использоваться как для управления дизель-генераторной установкой тепловоза в переходных режимах работы, так и для контроля технического состояния дизеля в бортовых и стационарных средствах диагностики [9].

## Список литературы

1. Пушкарев, И. Ф. Контроль и оценка технического состояния тепловозов [Текст] / И. Ф. Пушкарев, Э. А. Пахомов. – М.: Транспорт, 1985. – 160 с.
2. Погодин, С. И. Рабочие процессы транспортных турбопоршневых двигателей [Текст] / С. И. Погодин. – М.: Машиностроение, 1978. – 312 с.
3. Никитин, Е. А. Диагностирование дизелей [Текст] / Е. А. Никитин, Л. В. Станиславский, Э. А. Улановский. – М.: Машиностроение, 1987. – 224 с.
4. Диагностические параметры главных судовых малооборотных дизелей [Текст] / Л. Л. Грицай, В. Ф. Горбунов и др. // Труды ЦНИИМФа. – 1973. – № 174. – С. 3 – 19.
5. Валиев, М. Ш. Диагностика рабочего процесса тепловозного дизеля в условиях эксплуатации [Текст] / М. Ш. Валиев // Вестник транспорта Поволжья / Самарский гос. ун-т путей сообщения. – Самара. – 2011. – № 1 (25). – С. 35 – 39.
6. Грачев, В. В. Оценка технического состояния цилиндров дизеля с использованием датчика содержания кислорода в отработавших газах [Текст] / В. В. Грачев, М. Ш. Валиев // Известия ПГУПС / Петербургский гос. ун-т путей сообщения. – Санкт-Петербург. – 2011. – № 2 (27). – С. 25 – 32.
7. Грачев, В. В. Оценка технического состояния тепловозного дизеля по данным бортовой микропроцессорной системы управления [Текст] / В. В. Грачев, М. Ш. Валиев // Известия ПГУПС / Петербургский гос. ун-т путей сообщения. – Санкт-Петербург. – 2010. – № 1 (22). – С. 22 – 32.
8. Planar Wide Band Lambda Sensor. Technical Customer Information. Y258-K01-005-000e / Bosch, 2001. – 25 с.
9. Грачев, В. В. Устройство для контроля величины коэффициента избытка воздуха тепловозного дизеля [Текст] / В. В. Грачев, Ф. Ю. Базилевский, М. Ш. Валиев // Известия ПГУПС / Петербургский гос. ун-т путей сообщения. – Санкт-Петербург. – 2011. – № 3 (28). – С. 153 – 161.
10. Руководство по эксплуатации ADZ-SML(SMX) Датчики давления, разрежения и разности давлений ADZ-SML(SMX). М., 2006. – 18 с.

## References

1. Pushkarev I. F., Pakhomov E. A. *Kontrol' i otsenka tekhnicheskogo sostoyaniya teplovozov* (Monitoring and assessment of technical condition of locomotives). Moscow: Mashinostroenie, 1985, 160 p.
2. Pogodin S. I. *Rabochiye protsessy transportnykh turboporshnevyykh dvigateley* (Working processes of transport turbo piston engines). Moscow: Mechanical engineering, 1978. 312 p.
3. Nikitin E. A., Stanislavsky L. V., Ulanovskiy E. A. *Diagnostirovaniye dizeley* (Diagnosis of diesels). Moscow: Mashinostroenie, 1987, 224 p.
4. Gritsay L. L., Gorbunov V. F., Kalugin V. N., Levin B. M. Diagnostic parameters of the main marine low-speed diesels [Diagnosticheskiye parametry glavnykh sudovykh malooborotnykh dizeley]. *Trudy TSNIIMFa – Proceedings of CNIIF*, – 1973, no. 174. pp. 3 – 19.
5. Valiev M.Sh. Diagnosis of the working process of a diesel engine under operating conditions [Diagnostika rabocheho protsessa teplovoznogo dizelya v usloviyakh ekspluatatsii]. *Vestnik transporta povolzh'ya – The journal of Samara State Transport University*, 2011, no. 1 (25), pp. 35 – 39.

6. Grachyev V. V., Valiev M. Sh. Estimation of a diesel engine cylinders and fuel equipment condition by exhaust gases oxygen sensor [Otsenka tekhnicheskogo sostoyaniya tsilindrov dizelya s ispol'zovaniyem datchika sodержaniya kisloroda v otrabotavshikh gazakh]. *Izvestiia PGUPSa – Proceedings of Peterburg Transport Universit*, 2011, no. 2 (27), pp. 25 – 32.

7. Grachyev V. V., Valiev M. Sh. Estimation of technical condition of a diesel locomotive engine based on the data of an onboard microprocessor control system [Otsenka tekhnicheskogo sostoyaniya teplovoznogo dizelya po dannym bortovoy mikroprotsessornoy sistemy upravleniya]. *Izvestiia PGUPSa – Proceedings of Peterburg Transport University*, 2010, no. 1 (22), pp. 22 – 32.

8. Planar Wide Band Lambda Sensor. Technical Customer Information. Y258-K01-005-000e. / Bosch, 2001, 25 p.

9. Grachyev V.V., Bazilevskiy F.Yu., Valiev M.Sh. Locomotive diesel engine excess air ratio control device [Ustroystvo dlya kontrolya velichiny koeffitsiyenta izbytkha vozdukha teplovoznogo dizelya]. *Izvestiia PGUPSa – Proceedings of Peterburg Transport Universit*, 2011, no. 3 (28), pp. 153 – 161.

10. *Datchiki davleniya, razrezheniya i raznosti davleniy ADZ-SML(SMX). Rukovodstvo po ekspluatatsii ADZ-SML(SMX)* (Pressure, rarefaction and pressure difference sensors ADZ-SML (SMX). Moscow, 2006, 18 p.

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

### Валиев Мухаммад Шералиевич

Ташкентский институт инженеров железнодорожного транспорта (ТашиИИТ).

Адылходжаева ул., д. 1, г. Ташкент, 100167, Республика Узбекистан.

Кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры «Локомотивы и локомотивное хозяйство», ТашиИИТ.

Тел.: +998 (97)446-14-61.

E-mail: valiev.m.sh@gmail.com

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

### Valiev Mukhammad Sheralievich

Tashkent Institute of Railway Engineers (TIRE).

1, Adilhodjaev st., Tashkent, 100167, Uzbekistan.

Ph. D. in Engineering, teacher of the department «Locomotives and locomotive equipment», TIRE.

Phone: +998 (97) 446-14-61.

E-mail: valiev.m.sh@gmail.com

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Валиев, М. Ш. Применение датчика содержания кислорода для контроля величины коэффициента избытка воздуха тепловозного дизеля [Текст] / М. Ш. Валиев // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2017. – № 2 (30). – С. 9 – 17.

## BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Valiev M. Sh. Application of oxygen content sensor for controlling the value of excess air coefficient. *Journal of Transsib Railway Studies*, 2017, vol. 30, no. 2, pp. 9 – 17. (In Russian).

УДК 629.4

**П. Ю. Иванов, Н. И. Мануилов, Е. Ю. Дульский**

Иркутский государственный университет путей сообщения (ИрГУПС), г. Иркутск, Российская Федерация

## ПРИЧИНЫ САМОПРОИЗВОЛЬНОГО СРАБАТЫВАНИЯ АВТОТОРМОЗОВ В ГРУЗОВЫХ ПОЕЗДАХ

**Аннотация.** Безопасность движения поездов является приоритетной задачей ОАО «РЖД». В статье исследованы причины самопроизвольного срабатывания тормозов грузовых поездов и приведена их статистика в зависимости от плотности тормозной сети поезда. Произведен расчет давления в камере под уравнительным поршнем крана машиниста. Определены инерционные характеристики уравнительного поршня и его статические характеристики. Смоделирован процесс самопроизвольного срабатывания автотормозов на основании основных законов гидродинамики.

**Ключевые слова:** самопроизвольное срабатывание автотормозов, тормозная сеть, автотормоза, безопасность движения.

**Pavel Y. Ivanov, Nikita I. Manuilov, Evgeniy Y. Dulskiy**  
Irkutsk State University of Railways (IRGUPS), Irkutsk, the Russian Federation

## THE REASONS OF SPONTANEOUS OPERATION OF AUTOBRAKES IN FREIGHT TRAINS

**Abstract.** Traffic safety of trains is a priority task of JSC «Russian Railways». In article the reasons of spontaneous operation of brakes of freight trains are investigated and their statistics depending on density of brake network of the train is given. Calculation of pressure in the camera under the equalization piston of the crane of the driver is made. Inertial characteristics of the equalization piston and its static characteristics are defined. Process of spontaneous operation of autobrakes on the basis of fundamental laws of a hydraulic gas dynamics is simulated.

**Keywords:** spontaneous actuation of autobrakes, brake network, autobrakes, safe railway operation.

Актуальной проблемой в эксплуатации подвижного состава железных дорог является самопроизвольное срабатывание автотормозов в грузовых поездах. При самопроизвольном срабатывании автотормозов в пути следования поезд останавливается на перегоне, при этом производится технологическая операция согласно распоряжению ОАО «РЖД» 2817р [1]. Такое происшествие нарушает график движения поездов и снижает участковую скорость.

Самопроизвольное срабатывание автотормозов в грузовом поезде классифицируется на две группы: связанное с неисправностями тормозной системы и связанное с несовершенством тормозной системы поезда.

Рассмотрим первую группу причин. Данная группа связана с неисправностями тормозной системы. Система является автоматической непрямодействующей, в случае грузового подвижного состава она оборудована воздухораспределителем № 483. Магистральная часть воздухораспределителя изображена на рисунке 1, где при снижении давления в тормозной магистрали локально происходит срабатывание диафрагмы и клапана дополнительной разрядки, вызывающее цепную реакцию воздухораспределителя последовательно соединенных вагонов, которые сообщают магистральные камеры с атмосферой.

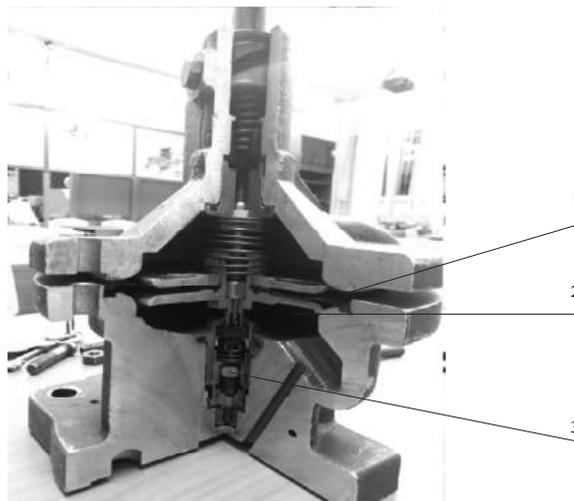


Рисунок 1 – Магистральная часть воздухораспределителя № 483:  
1 – диафрагма; 2 – магистральная камера; 3 – клапан дополнительной разрядки

Данный алгоритм работы обусловлен необходимостью обеспечения автоматического срабатывания тормозов при обрыве тормозной магистрали поезда. Кроме обрыва тормозной

магистрالی могут иметь место и другие причины снижения давления, которые представлены на рисунке 2.

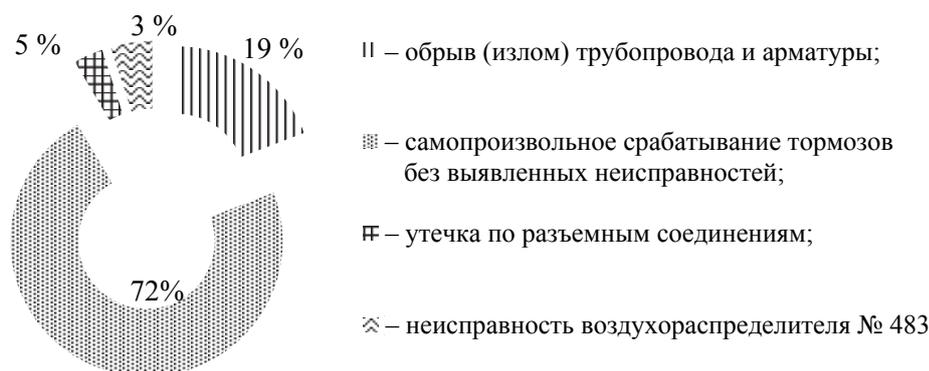


Рисунок 2 – Статистика причин самопроизвольного срабатывания автотормозов на ВСЖД за 2012 – 2016 гг.

Рассмотрим вторую группу самопроизвольного срабатывания автотормозов, связанную с несовершенством тормозной системы поезда.

Большинство случаев самопроизвольных срабатываний происходит без выявления неисправностей в тормозной сети, что может являться последствием несовершенства тормозной системы. На практике при отсутствии нарушений целостности тормозной сети поезда поиски причины срабатывания автотормозов могут не найти логического завершения.

По статистике самопроизвольное срабатывание тормозов, не обусловленное неисправностями тормозных приборов подвижного состава, в большинстве случаев наблюдается в поездах с повышенной плотностью тормозной сети поезда (рисунок 3). Вследствие продольно-динамической реакции поезда сжатый воздух в тормозной магистрали движется по направлению силы инерции, в результате возникает разность давлений между хвостовой и головной частями тормозной магистрали, т. е. в одной из частей поезда производится самопроизвольная разрядка глубиной, которая зависит от силы продольно-динамической реакции и скорости поезда. В случае набегания волны сжатого воздуха в головную часть тормозной магистрали поезда в хвостовой части происходит разрядка, приводящая к срабатыванию воздухораспределителей. В данном случае срабатывание воздухораспределителя начинается с запуска процесса дополнительной разрядки воздухораспределителя хвостового вагона и передается по цепной реакции от хвостовой части к головной части тормозной магистрали поезда.

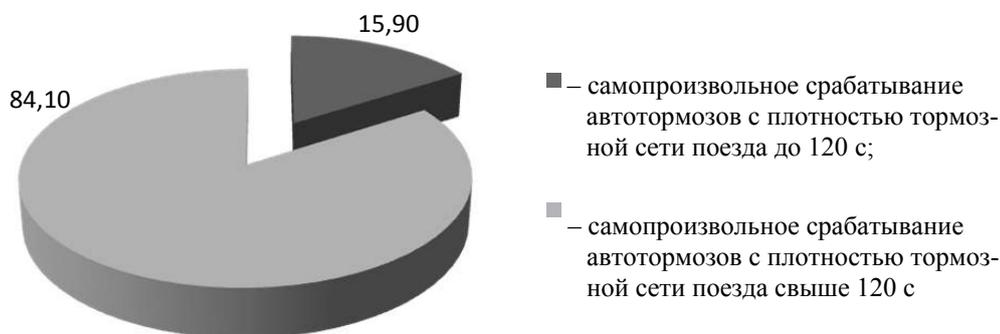


Рисунок 3 – Статистика самопроизвольных срабатываний в поездах с различной плотностью

Описанный выше процесс зависит от плотности тормозной сети поезда. В поезде с низкой плотностью уравнительный поршень крана машиниста, изображенный на рисунке 4, опущен вниз, а впускной клапан открыт для компенсации утечек тормозной магистрали из питательной магистрали локомотива.

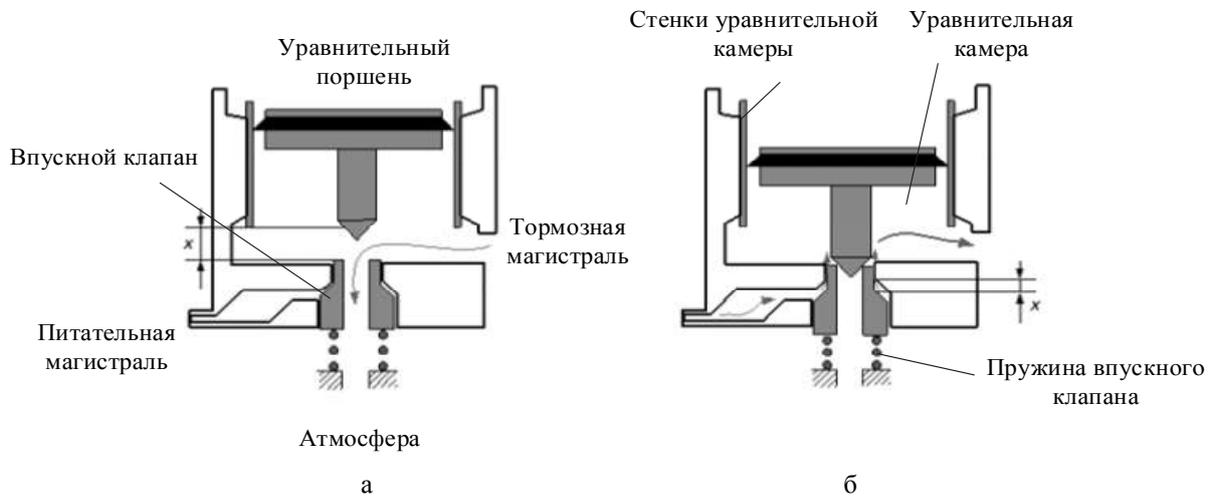


Рисунок 4 – Уравнительная часть крана машиниста № 394:  $x$  – величина кольцевого зазора между впускным клапаном и седлом поршня, который реализует сообщение тормозной магистрали с питательной магистралью

Дополнительная разрядка для крана машиниста становится дополнительной утечкой, которая без скачкообразного изменения давления компенсируется через открытый впускной клапан.

В поезде с высокой плотностью уравнительный поршень находится в среднем положении, впускной клапан находится в закрытом состоянии, а поршень неподвижен и инертен к перемещениям для открытия впускного клапана. Происходит это по причине того, что уравнительному поршню необходимо преодолеть собственную силу трения со стенками уравнительной камеры крана машиниста № 394. В стабильном положении возникает сила адгезии между манжетой уравнительного поршня и стенками уравнительной камеры крана машиниста. Эти процессы описываются дифференциальными уравнениями неустановившихся режимов движения воздуха в тормозной магистрали поезда.

Неустановившееся движение воздуха в магистральном воздухопроводе тормозной сети рассматривается на основании уравнения Навье – Стокса для вязкой сжимаемой жидкости выражение

$$\frac{d(\rho v_x)}{dt} + \frac{d(\rho v_x v_x)}{dx} + \frac{d(\rho v_x v_y)}{dy} + \frac{d(\rho v_x v_z)}{dz} = \frac{d\rho}{dx} + \mu\psi \quad (1)$$

и уравнения неразрывности

$$\frac{dp}{dt} + \frac{d(pv_x)}{dx} + \frac{d(pv_y)}{dy} + \frac{d(pv_z)}{dz} = 0, \quad (2)$$

где  $\rho$  – плотность;

$v_x, v_y, v_z$  – проекция вектора скорости потока на соответствующую ось;

$t$  – время;

$p$  – давление;

$\mu\psi$  – член, учитывающий силы вязкости ( $\mu$  – коэффициент динамической вязкости) [4].

После преобразования уравнений (1) и (2) с учетом условия

$$u = \rho \cdot v_x, \quad (3)$$

где  $u$  – удельный массовый расход, приходящийся на единицу площади поперечного сечения,

$$dp/d\rho = c^2, \quad (4)$$

где  $c$  – скорость звука,

$$\lambda v_x / 2d_0 = 2a, \quad (5)$$

где  $\lambda$  – коэффициент сопротивления единицы длины воздухопровода;

$d_0$  – диаметр воздухопровода;

$a$  – коэффициент влияния диаметра воздухопровода на скорость потока воздуха в тормозной магистрали,

получаем дифференциальные уравнения давления и расхода сжатого воздуха в тормозной магистрали поезда при его движении:

$$\frac{d^2 \Delta p}{dt^2} + 2a \frac{d \Delta p}{dt} = c^2 \frac{d^2 \Delta p}{dx^2}; \quad (6)$$

$$\frac{d^2 \Delta p}{dt^2} + 2a \frac{d \Delta p}{dt} = c^2 \frac{d^2 \Delta p}{dx^2}; \quad (7)$$

$$c^2 \frac{du}{dx} = - \frac{dp}{dt}. \quad (8)$$

При решении уравнений (6) и (7) следует иметь в виду, что давление и расход воздуха взаимосвязаны уравнением (8). В связи с этим связаны между собой и краевые условия задач по определению давления и расхода воздуха в тормозной сети поезда.

Уравнения давления (6) и расхода (7) решаются в предположении  $a = \text{const}$ , которое принимается средним по длине трубы  $l$  при любом  $x$  и времени  $t$ , что обеспечивает линеаризацию этих уравнений [4].

Краевые условия для уравнения расчета давления воздуха при изменении его краном машиниста следующие:

начальные условия –

$$\begin{cases} \Delta p = (l, 0) = 0; \\ \frac{d \Delta p(x, 0)}{dt} = 0; \end{cases} \quad (9)$$

граничные условия –

$$\begin{cases} \Delta p = (0, t) = \Delta p_n; \\ \frac{d \Delta p(l, t)}{dx} = 0, \end{cases} \quad (10)$$

где  $\Delta p_n$  – изменение давления краном машиниста.

Величину расхода воздуха находим решением уравнения (11) давления путем дифференцирования по  $t$  и интегрирования [3]:

$$u(x, t) = - \frac{1}{c^2} \int \frac{d \Delta p(x, t)}{dt} dx. \quad (11)$$

В ходе исследования был проведен эксперимент по определению инертности уравнительного поршня. Для проведения эксперимента по определению инерционных характеристик уравнительной части крана машиниста использован электронный динамометр. Уравнительный поршень закреплен к технологическому кронштейну для закрепления зацепа динамометра, это проиллюстрировано на рисунке 5.



Рисунок 5 – Схема крепления зацепа динамометра к уравнительному поршню:  
1 – зацеп динамометра; 2 – уравнительный поршень; 3 – нижняя часть крана машиниста № 394;  
4 – показания динамометра БИУ-06М; 5 – динамометр БИУ-06М

При помощи данной установки были получены зависимости силы сопротивления движению уравнительного поршня от перемещения и зависимости силы сопротивления движению поршня от перемещения.

Произведем расчет давления в камерах под уравнительным поршнем, эквивалентным указанным пороговым значениям силы:

$$P_{\text{эк}} = \frac{F}{S_{\text{п}}}, \quad (12)$$

где  $F$  – сила, приложенная к поршню для начала перемещения, полученная экспериментальным путем;

$S_{\text{п}}$  – площадь уравнительного поршня.

Площадь уравнительного поршня найдем по формуле

$$S_{\text{п}} = \pi \cdot r^2, \quad (13)$$

где  $r$  – радиус.

Рассчитаем давление выхода поршня из инертного состояния:

$$P_{\text{эк(ин)}} = \frac{40}{3,14 \cdot 5^2} = 0,05 \text{ МПа.}$$

Вычислим давление выхода поршня из состояния левитации:

$$P_{\text{эк(лев)}} = \frac{15}{3,14 \cdot 5^2} = 0,019 \text{ МПа.}$$

Из полученных значений давлений и начала движения поршня можно сделать вывод о его инертности из-за состояний притирки в поездах с высокой плотностью и значительно меньшей инертности в состоянии левитации в поездах с нормальным уровнем утечек.

По экспериментальным данным было получено, что для начала перемещения уравнительного поршня необходимо приложить к нему давление воздуха 0,02 МПа. Соответственно за время достижения давления этого значения и срабатывания поршня воздухораспределитель № 483 одновременно запускает механизм дополнительной разрядки вследствие перемещения диафрагмы, опережая уравнительный поршень крана машиниста. Причина этого заключается в том, что диафрагма, расположенная в магистральной части воздухораспределителя, не имеет трения при перемещении в отличие от поршня. Соответственно диафрагма магистральной части воздухораспределителя более чувствительна к снижению давления в тормозной магистрали. В результате при самопроизвольной разрядке менее 0,02 МПа, вызванной продольно-динамической реакцией поезда, воздухораспределитель срабатывает на торможение. Уравнительный поршень крана машиниста после осуществления дополнительной разрядки, которую произвел воздухораспределитель, под действием силы давления со стороны уравнительного резервуара перемещается вниз, открывает впускной клапан и восстанавливает зарядное давление в тормозной магистрали, после восполнения воздуха тормозной магистрали из питательной магистрали принимает исходное положение. Кратковременный процесс самопроизвольной разрядки закончен, но вследствие срабатывания датчика № 418 сигнальная лампа тормозной магистрали загорается. Машинист приступает к выполнению действий согласно распоряжению ОАО «РЖД» 2817р [1]. Как показала статистика, приведенная выше, именно такие срабатывания без неисправности тормозного оборудования более чем в 70 % случаев являются причиной остановки поезда на перегоне и проведения сокращенного опробования тормозов.

Термодинамика газовых потоков описывается дифференциальным уравнением (6) для определения давления и расхода для движения сжатого воздуха в цилиндрической трубе.

Движение центра тяжести газового элемента относительно неподвижной системы координат применительно к тормозной сети поезда описывает обобщенное уравнение Бернулли [4]. В пренебрежении изменением потенциальной энергии положения и при постоянстве весового расхода оно имеет вид:

$$\frac{dp}{\rho} + \omega d\omega + g dL_T + g dL_r = 0 \quad (14)$$

или в конечном виде:

$$\int_1^2 \frac{dp}{\gamma} + \frac{\omega_2^2 - \omega_1^2}{2g} + L_{1-2} + L_r = 0, \quad (15)$$

где  $\omega$  – скорость движения воздуха в тормозной магистрали;

$dL_T$  – техническая работа сжатого воздуха;

$dL_r$  – работа трения сжатого воздуха;

$g$  – ускорение силы тяжести;

$\gamma$  – удельный вес сжатого воздуха [4].

В результате проведенных исследований установлено, что одной из причин срабатывания автотормозов в поезде является расположение воздухораспределителя на одной оси с направлением движения подвижного состава.

В эксплуатации одним из вариантов решения проблемы срабатывания автотормозов в «плотных поездах» является создание искусственных утечек по всей длине тормозной магистрали поезда. Наиболее часто в практике применяется установка инородных тел в соединениях тормозных рукавов. В результате созданной искусственной утечки уравнительный поршень переводит впускной клапан из закрытого состояния в открытое. Вторым способом борьбы по предотвращению самопроизвольного срабатывания автотормозов является снижение зарядного давления в тормозной магистрали до допустимых минимальных значений [2]. Это позволяет снизить вес сжатого воздуха и соответственно силу инерции.

Таким образом, используемые методы не позволяют полностью исключить самопроизвольное срабатывание автотормозов грузового поезда и являются нерегламентированными. Модернизация тормозной системы практически невозможна. Однако один из путей снижения ущерба от самопроизвольных срабатываний – оперативное выявление наличия неисправностей тормозной системы или их отсутствие в пути следования за счет применения системы диагностики. Обладая непрерывно поступающей информацией об исправности тормозов с помощью новых методов и средств диагностики тормозной сети поезда можно избежать необходимости остановки и проведения сокращенного опробования тормозов более чем в 70 % случаев.

## Список литературы

1. Об утверждении Регламента взаимодействия локомотивных бригад с причастными работниками ОАО «РЖД», деятельность которых непосредственно связана с движением поездов, при возникновении аварийных и нестандартных ситуаций на инфраструктуре ОАО «РЖД» [Электронный ресурс]: распоряжение ОАО «РЖД» от 30.12.2010 № 2817р. Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс».
2. Правила технического обслуживания тормозного оборудования и управления тормозами железнодорожного подвижного состава [Электронный ресурс]: протокол заседания Совета по железнодорожному транспорту государств-участников Содружества от 6 – 7 мая 2014 г. № 60. URL: [http://www.old.opzt.ru/\\_files/17090.pdf](http://www.old.opzt.ru/_files/17090.pdf) (дата обращения: 11.03.2017).
3. Абрамович, Г. Н. Прикладная газовая динамика [Текст] / Г. Н. Абрамович. – М.: Наука, 1991. Т. 1. – 600 с.
4. Иноземцев, В. Г. Автоматические тормоза [Текст] / В. Г. Иноземцев, В. М. Казаринов, В. Ф. Ясенцев. – М.: Транспорт, 1981 – 464 с.
5. Мануилов, Н. И. Анализ влияния человеческого фактора на безотказную работу тормозного оборудования поездов / Н. И. Мануилов, П. Ю. Иванов, Е. Ю. Дульский // Наука вчера, сегодня, завтра: Сб. ст. по материалам XLI междунар. науч.-практ. конф. – Новосибирск: СибАК, 2016. – № 12 (34). – Ч. II. – С. 48 – 57.

## References

1. *Ob utverzhdenii Reglamenta vzaimodeistviia lokomotivnykh brigad s prichastnymi rabotnikami OAO «RZhD», deiatel'nost' kotorykh neposredstvenno sviazana s dvizheniem poezdov, pri vozniknovenii avariinykh i nestandardnykh situatsii na infrastrukture OAO «RZhD»: rasporyazhenie OAO «RZhD» ot 30.12.2010 № 2817 r* (Ob utverzhdenii Reglamenta vzaimodeistviia lokomotivnykh brigad s prichastnymi rabotnikami OAO «RZhD», deiatel'nost' kotorykh neposredstvenno sviazana s dvizheniem poezdov, pri vozniknovenii avariinykh i nestandardnykh situatsii na infrastrukture OAO «RZhD»: rasporyazhenie OAO «RZhD» ot 30.12.2010 № 2817 r). Moscow. 2010.
2. *Pravila tekhnicheskogo obsluzhivaniia tormoznogo oborudovaniia i upravleniia tormozami zheleznodorozhnogo podvizhnogo sostava: protokol zasedaniia Soveta po zheleznodorozhnomu transportu gosudarstv-uchastnikov Sodruzhestva ot 6 – 7 maia 2014 g. № 60* (Pravila tekhnicheskogo obsluzhivaniia tormoznogo oborudovaniia i upravleniia tormozami zheleznodorozhnogo podvizhnogo sostava: protokol zasedaniia Soveta po zheleznodorozhnomu transportu gosudarstv-uchastnikov Sodruzhestva ot 6 – 7 maia 2014 g. № 60.). Moscow. 2014.
3. Abramovich G. N. *Prikladnaja gazovaja dinamika. Tom 1* (Applied Gas Dynamics). Moscow: Nauka, 1991, 600 p.
4. Inozemcev V. G., Kazarinov V. M., Jasencev V. F. *Avtomaticheskie tormoza* (Automatic brakes). Moscow: Transport, 1981, 464 p.
5. Manuilov N. I., Ivanov P. Ju., Dul'skij E. Ju. Analysis of the influence of the human factor on the trouble-free operation of the brake equipment of trains [Analiz vlijaniija chelovecheskogo

faktora na bezotkaznuju rabotu tormoznogo oborudovanija poezdov]. *Nauka vchera, segodnja - Science yesterday, today, tomorrow*, 2016, pp. 48 – 57.

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

### Иванов Павел Юрьевич

Иркутский государственный университет путей сообщения (ИрГУПС).

ул. Чернышевского, д. 15, г. Иркутск, 664074, Российская Федерация.

Кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры «Электроподвижной состав», ИрГУПС.

E-mail: savl.ivanov@mail.ru

### Мануилов Никита Игоревич

Иркутский государственный университет путей сообщения (ИрГУПС).

ул. Чернышевского, д. 15, г. Иркутск, 664074, Российская Федерация.

Аспирант кафедры «Электроподвижной состав», ИрГУПС.

E-mail: nikita-manuilov@mail.ru

### Дульский Евгений Юрьевич

Иркутский государственный университет путей сообщения (ИрГУПС).

ул. Чернышевского, д. 15, г. Иркутск, 664074, Российская Федерация.

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Электроподвижной состав», ИрГУПС.

E-mail: E.Dulskiy@mail.ru

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Иванов, П. Ю. Причины самопроизвольного срабатывания автотормозов в грузовых поездах [Текст] / П. Ю. Иванов, Н. И. Мануилов, Е. Ю. Дульский // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2017. – № 2 (30). – С. 17 – 25.

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

### Ivanov Pavel Yurievich

Irkutsk State University of Railways (IRGUPS).

15, Chernyshevskogo st., Irkutsk, 664074, the Russian Federation.

Candidate of Technical Sciences, Chief lecturer of the department «Electric rolling stock», IRGUPS.

E-mail: savl.ivanov@mail.ru

### Manuilov Nikita Igorevich

Irkutsk State University of Railways (IRGUPS).

15, Chernyshevskogo st., Irkutsk, 664074, the Russian Federation.

Postgraduate of the department «Electric rolling stock», IRGUPS.

E-mail: nikita-manuilov@mail.ru

### Ivanov Evgeniy Yurievich

Irkutsk State University of Railways (IRGUPS).

15, Chernyshevskogo st., Irkutsk, 664074, the Russian Federation.

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the department «Electric rolling stock», IRGUPS.

E-mail: E.Dulskiy@mail.ru

## BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Ivanov P. Y., Manuilov N. I., Dulskiy E. Y. The reasons of spontaneous operation of autobrakes in freight trains. *Journal of Transsib Railway Studies*, 2017, vol. 30, no. 2, pp. 17 – 25. (In Russian).

УДК 629.4.016.01

### Л. В. Милютина, А. В. Чулков, П. Г. Петров

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС), г. Омск, Российская Федерация

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ВЛИЯНИЯ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ МЕТИЛОВЫХ ЭФИРОВ РАПСОВОГО МАСЛА НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ВПРЫСКИВАНИЯ И РАСПЫЛИВАНИЯ ТОПЛИВА

**Аннотация.** В статье рассмотрены физико-химические свойства дизельного топлива и метиловых эфиров рапсового масла, представлены графические зависимости изменения плотности, кинематической и динамической вязкости, поверхностного натяжения дизельного топлива и метиловых эфиров рапсового масла при изменении температуры в цилиндре дизеля, моделирование процессов влияния физико-химических показателей метиловых эфиров рапсового масла на характеристики впрыскивания и распыливания топлива.

**Ключевые слова:** двигатель внутреннего сгорания, топливо, степень сжатия, процесс сгорания, эффективная мощность, удельный расход топлива, экономичность.

Larisa V. Milyutina, Alexey V. Chulkov, Pavel G. Petrov  
Omsk State Transport University (OSTU), Omsk, Russian Federation

## MODELING OF THE PROCESSES OF INFLUENCE OF PHYSICAL-CHEMICAL INDICATORS OF METHYL ETHER OF RAPE OIL CHARACTERISTICS OF INJECTION AND SPRAYING OF FUEL

**Abstract.** The physicochemical properties of diesel fuel and methyl ester of rapeseed oil are reviewed, graphical dependencies of density, kinematic and dynamic viscosity, surface tension of diesel fuel and rapeseed oil methyl ester are shown when the temperature in the diesel cylinder changes, chemical indicators of methyl esters of rapeseed oil on the characteristics of injection and spraying of fuel.

**Keywords:** internal combustion engine, fuel, compression ratio, combustion process, effective power, specific fuel consumption, efficiency.

Железнодорожный транспорт является одним из основных потребителей топливно-энергетических ресурсов, на его долю приходится более 16 % от общего потребления энергоресурсов всеми видами транспорта. Для перевозки грузов и пассажиров железными дорогами расходуется до 6 % выработанной в стране электроэнергии и более 16 % всего произведенного жидкого топлива [1].

Задача обеспечения устойчивого снабжения тепловозов моторным топливом и снижения расходов на его приобретение диктует поиски альтернативных видов моторного топлива не нефтяного происхождения. Переход на биотопливо означает децентрализацию по крайней мере части топливно-энергетического комплекса, демонополизацию производства горючего и снижение капитальных затрат на его производство.

Анализ свойств альтернативных топлив позволяют сделать вывод о том, что наиболее близким по физико-химическим свойствам к дизельному топливу (ДТ) является смесь метиловых эфиров жирных кислот рапсового масла (МЭРМ).

В таблице 1 приведены физико-химические показатели ДТ и МЭРМ.

Таблица 1 – Физические показатели дизельного топлива и смеси метиловых эфиров жирных кислот рапсового масла

Топливо	Показатели							
	$m_B$ , кг/кмоль	$Q_H$ , МДж/кг	C	H	O	$\beta$	$M_0$ , кмоль/кг	$L_0$ , кг/кг
ДТ	190 – 210	42,6	0,870	0,126	0,004	0,342	0,495	14,35
МЭРМ	300 – 330	38,1	0,775	0,120	0,105	0,327	0,435	12,60

Средняя молекулярная масса метиловых эфиров рапсового масла равна сумме масс составляющих компонентов с учетом их процентного содержания в смеси. С учетом разного процентного содержания жирных кислот в рапсовом масле молекулярная масса МЭРМ может изменяться в пределах 300 – 330 кг/кмоль [2].

Процентное содержание углерода, водорода и кислорода в МЭРМ таково: C = 77,5 %, H = 12 % и O = 10,5 %. С учетом сказанного можно записать формулу для усредненного гипотетического метилового эфира  $C_{19,6}H_{36,6}O_2$ . Предполагается, что при полном сгорании топлива в результате реакций углерода и водорода с кислородом воздуха будут образовываться соответственно углекислый газ и водяной пар [2].

Метиловые эфиры жирных кислот рапсового масла являются кислородосодержащим веществом, его низшая теплота сгорания  $Q_H$  меньше, чем у ДТ, из-за различного процентного содержания C, H и O в ДТ и МЭРМ ниже значения величины характеристики топлива  $\beta$ , а для полного сгорания МЭРМ массой 1 кг требуется меньше киломолей  $M_0$  и килограммов  $L_0$  воздуха (соответственно 0,435 кмоль/кг топлива и 12,6 кг воздуха/кг топлива).

К показателям топлива, влияющим на процессы испарения, смесеобразования и сгорания относятся плотность топлива  $\rho$ , кинематическая  $\nu$  и динамическая  $\mu$  вязкость, поверхностное натяжение  $\sigma$ .

На рисунке 1 приведены диаграммы изменения физико-химических показателей ДТ и МЭРМ в интервале температур 20 – 70 °С, так как именно до этих температур нагревается топливо при его сжатии в нагнетательной секции топливного насоса тепловозного дизеля.

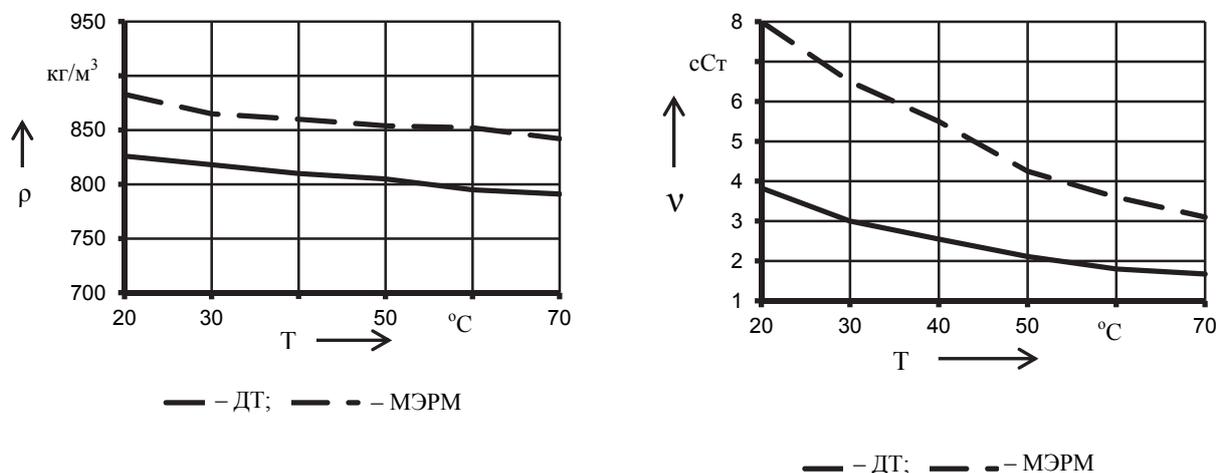


Рисунок 1 – Диаграммы изменения плотности и кинематической вязкости ДТ и МЭРМ в интервале температур 20 – 70 °С

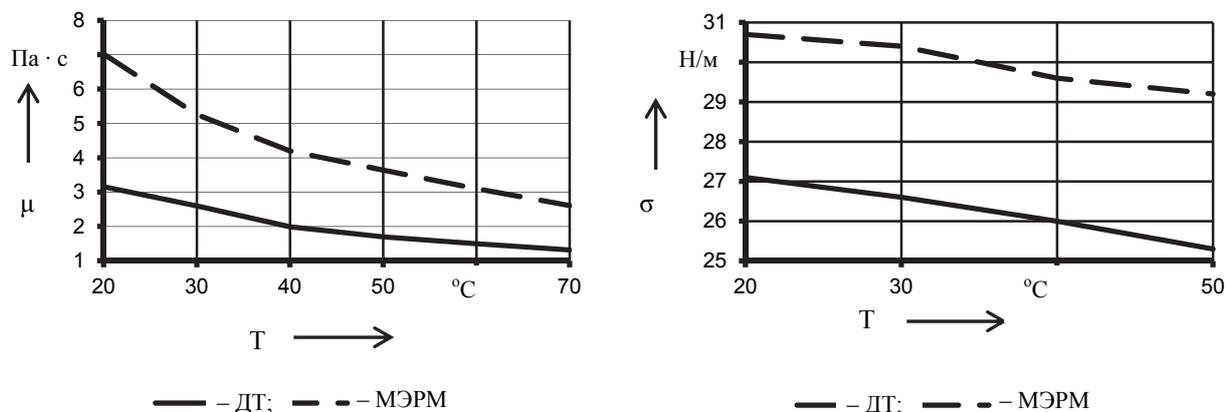


Рисунок 2 – Диаграммы изменения динамической вязкости и поверхностного натяжения ДТ и МЭРМ в интервале температур 20 – 70°С

Анализ диаграмм показал, что кинематическая и динамическая вязкость МЭРМ больше вязкости ДТ в два раза. Рост вязкости приводит к увеличению дальности топливной струи, уменьшению угла рассеяния топливного факела, что уменьшает долю объемного смесеобразования, большая часть топлива при этом будет попадать на стенки камеры сгорания.

Рост поверхностного натяжения МЭРМ по отношению к ДТ на 14 % является причиной увеличения неоднородности распыливания топлива. Повышение плотности МЭРМ по отношению к ДТ на 6 % увеличивает максимальное давление топлива перед форсункой дизельного двигателя и сдвигает в сторону увеличения момент начала подачи топлива.

Пользуясь известными математическими зависимостями, предложенными А. С. Лышевским [3], можно смоделировать процессы влияния  $\rho$ ,  $\sigma$  и  $\mu$  метиловых эфиров рапсового масла на характеристики впрыскивания и распыливания.

При получении критериальных зависимостей использовалось топливо, для которого плотность  $\rho_T$ , динамическая вязкость  $\mu_T$  и поверхностное натяжение  $\sigma_T$  изменялись в следующих пределах:  $\rho_T = (750 - 950) \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ ;  $\mu_T = (0,45 - 98,5) \cdot 10^{-3} \text{ Па}\cdot\text{с}$ ;  $\sigma_T = (20 - 29,7) \times 10^{-3} \text{ Н/м}$ .

Исходя из того, что для жидких альтернативных топлив  $\rho_T$ ,  $\mu_T$  и  $\sigma_T$  не выйдут за пределы крайних значений указанных величин (для рапсового масла  $\rho_T = 915 \text{ кг/м}^3$ ;  $\mu_T = 69 \times 10^{-3} \text{ Па}\cdot\text{с}$ ), можно сделать вывод о том, что характеристики впрыскивания и динамику развития струи можно рассчитывать по критериальным зависимостям А. С. Лышевского [3].

Рассматривая структуру выражений для определения величин дальности  $l_T$ , угла раскрытия топливной струи  $\gamma_T$ , мелкости распыливания  $d_T$  можно отметить, что при неизменных режимных, конструктивных и регулировочных параметрах тепловозного дизеля в случае применения альтернативного топлива претерпевают изменения значения величин  $\rho_{Ta}$ ,  $\mu_{Ta}$  и  $\sigma_{Ta}$ .

Рассмотрим математические выражения, по которым определяются характеристики впрыскивания топлива, и проведем оценку влияния физических параметров топлива на характеристики впрыскивания и распыливания. При проведении этой оценки предполагаем, что изменяются только физические параметры дизельного (традиционного) топлива и метиловых эфиров рапсового масла (альтернативного топлива), а режимные, регулировочные и конструктивные параметры дизеля остаются без изменений.

Рассчитаем путь, проходимый топливной струей от распылителя форсунки до границы между начальным и основным участками развития струи. Для этого запишем выражение для расчета границы между начальным и основным участками развития струи:

$$l_T = c_s d_c W_e^{0,25} \mu^{0,4} \rho^{-0,6}, \quad (1)$$

где  $c_s = 8,85$  – эмпирический коэффициент;

$d_c$  – диаметр распыливающего отверстия форсунки тепловозного двигателя;

$W_e = \frac{U_0^2 d_c \rho_T}{\sigma_T}$  – критерий Вебера;

$\rho = \frac{\rho_a}{\rho_T}$  – отношение плотностей воздуха и топлива;

$\rho_a$  – плотность воздуха в цилиндре тепловозного двигателя;

$$l_T = c_s d_c (U_0^2 d_c \rho_T \sigma^{-1})^{0,25} (\mu_T^2 \rho_T^{-1} d_c^{-1} \sigma_T^{-1})^{0,4} \left( \frac{\rho_B}{\rho_T} \right)^{-0,6}, \quad (2)$$

где  $U_0 = \frac{V_{ци}}{\mu f_c i \rho_T \tau_{впр}}$  – средняя скорость за время впрыскивания цикловой порции топлива;

$V_{ци}$  – цикловая порция топлива;

$\mu f_c$  – площадь эффективного проходного сечения распыливающих отверстий форсунки;

$i$  – количество распыливающих отверстий;

$\tau_{впр}$  – продолжительность впрыскивания порции топлива.

После ряда несложных преобразований получим выражение  $l_T$  функции величин  $\rho_T$ ,  $\mu_T$  и  $\sigma_T$ :

$$l_T = A \rho_T^{-0,05} \sigma_T^{-0,65} \mu_T^{0,8}, \quad (3)$$

где  $A$  – множитель, включающий в себя постоянные величины.

Аналогично уравнению (3) запишем выражение для альтернативного топлива:

$$l_{та} = A \rho_{та}^{-0,05} \sigma_{та}^{-0,65} \mu_{та}^{0,8} . \quad (4)$$

Разделив  $l_{та}$  на  $l_{т}$ , получаем:

$$\frac{l_{та}}{l_{т}} = \left( \frac{\rho_{та}}{\rho_{т}} \right)^{-0,05} \left( \frac{\sigma_{та}}{\sigma_{т}} \right)^{-0,65} \left( \frac{\mu_{та}}{\mu_{т}} \right)^{0,8} . \quad (5)$$

Как видно из выражения (5), увеличение или уменьшение плотности топлива относительно стандартной величины практически не влияет на границу между начальным и основным участками развития струи.

Увеличение поверхностного натяжения и уменьшение вязкости топлива без изменения прочих условий распыла приводит к приближению к распылителю границы участков. Основным фактором, влияющим на расположение границы между участками, является величина динамической вязкости топлива, так как ее значение в зависимости от вида топлива может изменяться в десятки раз, тогда как поверхностное натяжение изменяется в 1,3 – 1,5 раза.

Проведем оценку относительного времени достижения струей альтернативного топлива стенки камеры сгорания. Для этого рассчитаем относительное время  $\tau_{sa} / \tau_s$  достижения струей альтернативного топлива стенки камеры сгорания. При проведении расчетов принимаем, что путь, проходимый струей традиционного и альтернативного топлива, одинаков и равен расстоянию от распылителя форсунки до стенки камеры сгорания.

Запишем выражение для определения дальности струи топлива на основном участке ее развития:

$$l_{т} = B_s^{0,5} \tau_s^{0,5} , \quad (6)$$

где  $B_s = \frac{d_c U_0 W_e^{0,21} M^{0,16}}{D_s \rho \sqrt{2}} ;$

$D_s = 4 - 5$  – коэффициент молекулярной диффузии.

Время достижения топливной струей стенки камеры сгорания  $\tau_s$  запишем так:

$$\tau_s = l_{т}^2 \frac{D_s \rho \sqrt{2}}{d_c U_0 W_e^{0,21} M^{0,16}} , \quad (7)$$

где  $M = \frac{\mu_{т}^2}{\rho_{т} d_c \sigma_{т}}$  – критерий, характеризующий соотношение сил поверхностного натяжения и вязкости.

После преобразований получим выражение:

$$\tau_s = l_{т}^2 D_s \rho_{т}^{0,37} \sigma_{т}^{0,37} \mu_{т}^{-0,32} \sqrt{2} . \quad (8)$$

Для альтернативного топлива

$$\tau_{sa} = l_{т}^2 D_s \rho_{та}^{0,37} \sigma_{та}^{0,37} \mu_{та}^{-0,32} \sqrt{2} . \quad (9)$$

Относительное время достижения вершиной струи топлива стенки камеры сгорания

$$\frac{\tau_{sa}}{\tau_s} = \left( \frac{\rho_{та}}{\rho_{т}} \right)^{0,37} \left( \frac{\sigma_{та}}{\sigma_{т}} \right)^{0,37} \left( \frac{\mu_{та}}{\mu_{т}} \right)^{-0,32} . \quad (10)$$

Как видно из выражения (10), по мере увеличения  $\rho_{та}$  и  $\sigma_{та}$  по сравнению с аналогичными величинами для летнего дизельного топлива и постоянном значении  $\mu_{та}$  увеличивается

время прохождения топливной струей расстояния от распылителя форсунки до стенки камеры сгорания. Это приводит к увеличению количества испарившегося топлива в объеме камеры сгорания, что оказывает влияние на динамику тепловыделения в начальной фазе процесса сгорания и увеличению «жесткости» работы двигателя.

Если величина динамической вязкости топлива значительно увеличивается (например, рапсовое масло:  $\mu_{та} = 67 \cdot 10^{-3}$  Па·с, летнее дизельное топливо:  $\mu_{т} = 3,8 \cdot 10^{-3}$  Па·с) время  $\tau_{sa}$  уменьшается в 2,5 раза, что, в конечном итоге приводит к увеличению доли пленочного смесеобразования и «мягкой» работе двигателя.

Проведем оценку влияния физических параметров топлива на мелкость его распыливания. Используем уравнение для отыскания средних диаметров капель топливной струи, которое записывается в виде:

$$d_k = E_k d_c (\rho W_e)^{-0,266} M^{0,0733}, \quad (11)$$

где  $E_k$  – постоянный коэффициент, зависящий от конструкции форсунки дизеля.

Распишем составляющие уравнения для отыскания среднего диаметра капель традиционного топлива

$$d_k = E_k d_c \left[ \frac{\rho_a}{\rho_t} \left( \frac{B_c}{\mu f_c i_c \rho_t \tau_{впр}} \right)^2 d_c \frac{\rho_t}{\sigma_t} \right]^{-0,266} \left[ \mu_t^2 \rho_t^{-1} d_c^{-1} \sigma_t^{-1} \right]^{0,0733} = B \rho_t^{0,4587} \sigma_t^{0,1927} \mu_t^{0,1466}, \quad (12)$$

где  $B$  – константа, включающая в себя все величины, неизменные для разных видов топлива.

Уравнение для расчета среднего диаметра капель альтернативного топлива имеет вид:

$$d_{ка} = B \rho_{та}^{0,4587} \sigma_{та}^{0,1927} \mu_{та}^{0,1466}. \quad (13)$$

Относительное изменение диаметра капель при переходе от традиционного топлива к альтернативному

$$\frac{d_{ка}}{d_k} = \left( \frac{\rho_{та}}{\rho_t} \right)^{0,4587} \left( \frac{\sigma_{та}}{\sigma_t} \right)^{0,1927} \left( \frac{\mu_{та}}{\mu_t} \right)^{0,1466}. \quad (14)$$

Как видно из выражения (14), на диаметр капель оказывают влияние  $\rho_{та}$ ,  $\sigma_{та}$  и  $\mu_{та}$ . По мере увеличения  $\rho_{та}$ ,  $\sigma_{та}$  и  $\mu_{та}$  средний диаметр капель возрастает. При применении в качестве топлива рапсового масла средний диаметр капли топлива увеличивается в 1,6 раза по сравнению с дизельным топливом.

Проведем оценку влияния физических параметров топлива на угол рассеивания топливной струи. Критериальное уравнение определения угла раскрытия топливной струи на основном участке имеет вид:

$$\gamma_t = 2 \arctg(F_s W_e^{0,32} M^{-0,07} \rho^{0,5}), \quad (15)$$

где  $F_s = 0,009$  – постоянный коэффициент.

$$\tg\left(\frac{\gamma_t}{2}\right) = F_s W_e^{0,32} M^{-0,07} \rho^{0,5}. \quad (16)$$

Распишем составляющие уравнения (16):

$$\tg\left(\frac{\gamma_t}{2}\right) = F_s \left[ \left( \frac{B_c}{\mu f_s i_c \rho_m \tau_{впр}} \right)^2 d_c \frac{\rho_m}{\sigma_m} \right]^{0,32} \left[ \mu_m^2 \rho_m^{-1} d_c^{-1} \sigma_m^{-1} \right]^{-0,07} \left( \frac{\rho_a}{\rho_m} \right)^{0,5}. \quad (17)$$

После преобразований получим уравнение:

$$\operatorname{tg}\left(\frac{\gamma_{\tau}}{2}\right) = F_c C \rho_{\tau}^{-0,75} \sigma_{\tau}^{-0,25} \mu_{\tau}^{-0,14}. \quad (18)$$

Аналогично для струи альтернативного топлива запишем:

$$\operatorname{tg}\left(\frac{\gamma_{\tau a}}{2}\right) = F_c C \rho_{\tau a}^{-0,75} \sigma_{\tau a}^{-0,25} \mu_{\tau a}^{-0,14}. \quad (19)$$

Относительное изменение угла рассеивания топливной струи при переходе от традиционного топлива к альтернативному

$$\frac{\operatorname{tg}\left(\frac{\gamma_{\tau a}}{2}\right)}{\operatorname{tg}\left(\frac{\gamma_{\tau}}{2}\right)} = \left(\frac{\rho_{\tau a}}{\rho_{\tau}}\right)^{-0,75} \left(\frac{\sigma_{\tau a}}{\sigma_{\tau}}\right)^{-0,25} \left(\frac{\mu_{\tau a}}{\mu_{\tau}}\right)^{-0,14}. \quad (20)$$

При впрыскивании в цилиндр дизеля метиловых эфиров рапсового масла угол рассеивания топливной струи и ее боковая поверхность уменьшаются, что приведет к уменьшению количества испарившегося топлива за период задержки воспламенения, более «мягкой» работе двигателя. Это позволит увеличить число сопловых отверстий и интенсифицировать «закрутку» воздушного заряда, что в конечном итоге положительно отразится на топливной экономичности двигателя. Проведенный анализ показал, что использование метиловых эфиров рапсового масла может привести к увеличению среднего диаметра капель и уменьшению угла рассеивания топливного факела. Изменение данных параметров при работе на метиловых эфирах рапсового масла вызовет увеличение нагарообразования в районе сопловых отверстий и их закоксовывание, при длительной работе возможен выход дизеля из строя ввиду большого нагарообразования на деталях, образующих камеру сгорания.

Поэтому необходимо изменить конструкцию распылителя форсунки либо осуществлять подачу сжатого воздуха в топливный факел при помощи специальной форсунки, что позволит в процессе истечения газожидкостной смеси через сопло распылителя достигнуть взрывного эффекта, когда пузырьки сжатого воздуха на выходе из канала сопла лопаются, разрывая струю, дробя и распыливая топливо. К преимуществам такого впрыскивания исследователи относят дополнительное диспергирование топлива, более качественное распределение его в окислителе за счет расширения пузырьков воздуха и газов на выходе из сопловых отверстий распылителя и улучшение условий его воспламенения, что уменьшает вероятность образования зон, переобогащенных топливом [9].

Так как при применении рапсового масла (РМ) наблюдается ухудшение смесеобразования и увеличение продолжительности сгорания, связанные с особенностями физико-химических свойств топлива, дополнительное перемешивание топливовоздушной смеси за счет явления «микровзрывов» позволит улучшить экономические и экологические показатели.

Использование смесей топлив на основе рапсового масла и дизельного топлива позволит изготовить топливо в условиях производственного предприятия. Механизм получения метиловых эфиров рапсового масла состоит в проведении реакции этерификации – взаимодействия жирных кислот, содержащихся в сырье с метиловым спиртом. Смесь метиловых эфиров рапсового масла и дизельного топлива можно использовать без изменения конструкции тепловозного двигателя, что является существенным преимуществом, способствующим переходу на данный вид альтернативного топлива [9].

На основании анализа влияния физико-химических показателей метиловых эфиров рапсового масла на характеристики впрыскивания и распыливания топлива можно сделать следующие выводы:

предложенная модель изменения физико-химических свойств рапсового масла в качестве моторного топлива для тепловозных дизелей позволяет оценить влияние показателей метиловых эфиров рапсового масла на параметры впрыска и распыливания топлива в цилиндрах дизеля;

впрыскивание в цилиндр дизеля метиловых эфиров рапсового масла приводит к уменьшению количества испарившегося топлива за период задержки воспламенения и более «мягкой» работе дизеля;

топливо для тепловозных дизелей на основе метиловых эфиров рапсового масла можно использовать без изменения конструкции элементов топливной системы дизеля, что является одним из путей экономии натурального дизельного топлива.

## Список литературы

1. Методы оценки технического состояния, эксплуатационной экономичности и экологической безопасности локомотивов: Монография / Под ред. А. И. Володина. – М.: Желдориздат, 2007. – 264 с.
2. Demirbas, A. Biodiesel: a realistic fuel alternative for diesel engines / A. Demirbas // Springer-Verlag. – London Limited, 2008.
3. Лышевский, А. С. Процессы распыливания топлива дизельными форсунками / А. С. Лышевский. – М.: Машгиз, 1963. – 180 с.
4. Двигатели внутреннего сгорания: Теория поршневых и комбинированных двигателей / Д. Н. Вырубов, Н. А. Иващенко и др. – М.: Машиностроение, 1983. – 372 с.
5. Химия жиров / Б. Н. Тютюнников, З. И. Бухштаб и др. – М.: Колос, 1992. – 448 с.
6. Сравнительная оценка эффективности применения растительных топлив в дизельном двигателе / А. П. Марченко, А. А. Прохоренко и др. // Двигатели внутреннего сгорания. – 2004. – № 1. – С. 46 – 51.
7. Marchenko, A. P. Alternative biofuel from rape oil derivatives / A. P. Marchenko, V. G. Semenov // UDC 662.75:629.7 (Chemistry and Technology of Fuels and Oils). – 2001. – № 3. – Vol. 37.
8. Семенов, В. Г. Определение теплоты сгорания биотоплив растительного происхождения / В. Г. Семенов // Физические и компьютерные технологии в народном хозяйстве: Труды междунар. науч.-техн. конф. / ХНПК «ФЭД». – Харьков, 2001. – С. 250 – 253.
9. Лютко, В. Н. Применение альтернативных топлив в двигателях внутреннего сгорания / В. Н. Лютко, В. Н. Луканин, А. С. Хачиян / МАДИ (ТУ). – М., 2000. – 311 с.

## References

1. Volodyn A. I. *Metody otsenki tekhnicheskogo sostoianiia, ekspluatatsionnoi ekonomichnosti i ekologicheskoi bezopasnosti lokomotivov: Monografiia* (Methods for assessing the technical state, operational economics and environmental safety of locomotives: Monograph). Moscow: Zheldorizdat, 2007, 264 p.
2. Demirbas A. Biodiesel: a realistic fuel alternative for diesel engines / Demirbas A.-Springer-Verlag London Limited, 2008.
3. Lyshevsky A. S. *Protsessy raspylivaniia topliva dizel'nyimi forsunkami* (Processes of spraying fuel with diesel injectors). Moscow: Mashgiz, 1963, 180 p.
4. Vyubov D. N., Ivashchenko N. A., Ivin V. I. *Dvigateli vnutrennego sgoraniia: Teoriia porshnevyykh i kombinirovannykh dvigatelei* (Internal combustion engines: The theory of reciprocating and combined engines). Moscow: Mechanical Engineering, 1983, 372 p.
5. Tyutyunnikov B. N., Bukhshtab Z. I., Gladky F. F. *Khimiia zhirov* (Chemistry of fats). Moscow: Kolos, 1992, 448 p.

6. Marchenko A. P., Prokhorenko A. A., Osetrov A. A., Smailys V., Senchila V. Comparative evaluation of the effectiveness of the use of vegetable fuel in a diesel engine [Srvnitel'naia otsenka effektivnosti primeneniia rastitel'nykh top-liv v dizel'nom dvigatele]. *Dvigateli vnutrennego sgoraniia – Engines of internal combustion*. 2004, no. 1, pp. 46 – 51.

7. Marchenko A. P., Semenov V. G. Alternative biofuel from rape oil derivatives UDC 662.75:629.7 (Chemistry and Technology of Fuels and Oils, Vol. 37, No. 3, 2001)

8. Semenov V. G. Determination of the heat of combustion of biofuels of plant origin. - Physical and computer technologies in the national economy [Opredelenie teploty sgoraniia biotopliv rastitel'nogo proiskhozhdeniia]. *Fizicheskie i komp'iuternye tekhnologii v narodnom khoziaistve. – Trudy 4-i Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii – Proceedings of the 4th International Scientific and Technical Conference, 2001*, pp. 250 – 253.

9. Lvotko V., Lukanin V. N., Khachiyani A. S. *Primenenie al'ternativnykh topliv v dviga-teliakh vnutrennego sgoraniia* (Application of alternative fuels in internal combustion engines). Moscow: Publishing house MADI (TU), 2000, 311 p.

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

### Милютина Лариса Владимировна

Омский государственный университет путей сообщения.

Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046, Российская Федерация.

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Локомотивы», ОмГУПС.

Тел.: (3812) 31-34-17.

E-mail: milutina1965@mail.ru

### Чулков Алексей Владимирович

Омский государственный университет путей сообщения.

Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046, Российская Федерация.

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Локомотивы», ОмГУПС.

Тел.: (3812) 31-34-17.

### Петров Павел Геннадьевич

Омский государственный университет путей сообщения.

Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046, Российская Федерация.

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Электрические машины и общая электротехника», ОмГУПС.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Милютина, Л. В. Моделирование процессов влияния физико-химических показателей метиловых эфиров рапсового масла на характеристики впрыскивания и распыливания топлива / Л. В. Милютина, А. В. Чулков, П. Г. Петров // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2017. – № 2 (30). – С. 25 – 33.

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

### Milyutina Larisa Vladimirovna

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx av., Omsk, 644046, Russia.

Ph. D., assistant professor of the department «Locomotives», OSTU.

E-mail: milutina1965@mail.ru

Phone: (3812) 31-34-17.

### Chulkov Alexey Vladimirovich

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx av., Omsk, 644046, Russia.

Ph. D., assistant professor of the department «Locomotives», OSTU.

Phone: (3812) 31-34-17.

### Petrov Pavel Gennadievich

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx av., Omsk, 644046, Russia.

Ph. D., assistant professor of the department «Electric machines and general electrical engineering», OSTU.

## BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Milyutina L. V., Chulkov A. V., Petrov P. G. The modeling of the processes of the influence of physical and chemical indices of rapeseed oil methyl esters on the characteristics of injection and spraying of fuel. *Journal of Transsib Railway Studies*, 2017, vol. 30, no. 2, pp. 25 – 33. (In Russian).

УДК 629.424.1

**В. А. Михеев**

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС), г. Омск, Российская Федерация

## ОЦЕНКА ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ТОПЛИВНОЙ СИСТЕМЫ ДИЗЕЛЬНОЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ ТЕПЛОВОЗА

**Аннотация.** В статье рассматривается подход к оценке технического состояния топливной системы энергетической установки тепловоза с использованием комплексных микропроцессорных систем управления. Представлен подход к обобщенной оценке технического состояния топливной системы. По результатам анализа граф-модели топливной системы выделена совокупность контрольных параметров, разработан алгоритм, позволяющий установить причины выхода контролируемых параметров за допустимые пределы.

**Ключевые слова:** энергетическая установка тепловоза, граф-модель, оперативная оценка технического состояния.

## EVALUATION OF TECHNICAL CONDITION OF THE DIESEL POWER PLANT FUEL SYSTEM

**Vladislav A. Mikheyev**

Omsk State Transport University (OSTU), Omsk, the Russian Federation

**Abstract.** The article discusses the approach to evaluation of technical condition of the diesel locomotive power plant fuel system as a part of an integrated microprocessor control systems. Presents an approach of generalized evaluation of technical condition of the power plant fuel system. By results of the analysis of a fuel system graph model set of control parameters is selected, the algorithm allowing to establish the reasons of controlled parameters output of admissible limits is developed.

**Keywords:** diesel locomotive power plant, graph model, operational evaluation of technical condition.

Топливная система дизельной энергетической установки представляет собой иерархически сложную систему и включает в себя ряд взаимосвязанных функциональных подсистем высокого и низкого давления (рисунок 1). В процессе эксплуатации топливная система подвержена техническим отказам, приводящим к изменению функционального состояния с соответствующим снижением технико-экономических показателей и эксплуатационной надежности не только дизельной энергетической установки, но и тепловоза в целом. Достоверная оценка фактического технического состояния топливной системы в процессе эксплуатации даст возможность определить уровень работоспособности всей энергетической установки в данный момент времени, выявить ее соответствие техническим требованиям, сделать заключение о возможности ее дальнейшей эксплуатации и в конечном итоге назначить комплекс требующихся ремонтных или обслуживающих воздействий.

Практика эксплуатации тепловозов выявила значительное расхождение наработок до отказа узлов и деталей топливной системы, что свидетельствует о необходимости осуществления непрерывного оперативного контроля их технического состояния в условиях эксплуатации. Важным звеном в задаче оперативной оценки и управления техническим состоянием топливной системы тепловозного дизеля являются комплексные микропроцессорные системы управления со встроенными подсистемами диагностики, которыми в настоящее время оборудуются все серийно выпускаемые локомотивы.

Микропроцессорные системы управления имеют возможность осуществлять непрерывное измерение и регистрацию значений достаточно большого перечня аналоговых и дискретных параметров работы оборудования, в том числе и топливного. Однако получаемые системами данные в связи с непродолжительным опытом их эксплуатации и отсутствием па-

раметрических методик обработки регистрируемой информации практически не используются для оперативной оценки технического состояния топливной системы энергетической установки. Расширение функциональных возможностей встроенных подсистем диагностики микропроцессорных систем управления является эффективным и малозатратным способом оперативной оценки технического состояния топливной системы дизельной энергетической установки тепловоза.

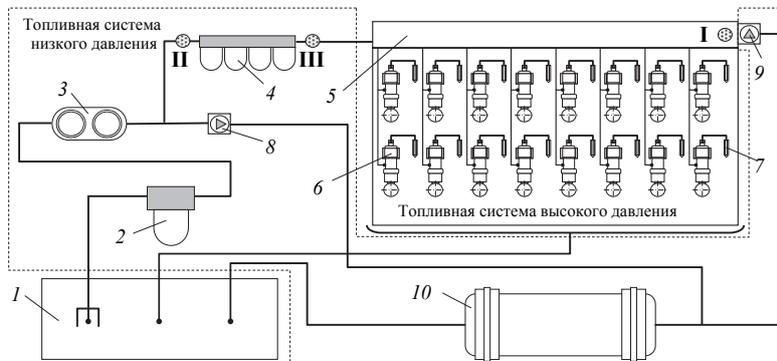


Рисунок 1 – Топливная система дизельной энергетической установки:

1 – топливный бак; 2 – фильтр грубой очистки (ФГО); 3 – топливopодкачивающий насос; 4 – фильтр тонкой очистки; 5 – топливный коллектор; 6 – топливный насос высокого давления; 7 – форсунка; 8 – предохранительный клапан; 9 – перепускной клапан; 10 – топливopодогреватель

В связи с этим актуальной задачей является разработка методик обработки информации, регистрируемой комплексной микропроцессорной системой управления, которые позволяли бы оперативно выявлять факт отклонения технического состояния топливной системы от нормального. Организация достоверной оценки технического состояния топливной системы энергетической установки осложняется необходимостью включения в процедуру идентификации фактического состояния значительного числа разнородных физических величин, признаков и их параметров, отражающих функциональные процессы и взаимодействия различных узлов и деталей подсистем, которые необходимо обрабатывать комплексно. Такое количество информации может трактоваться неоднозначно, что способствует возникновению ошибок первого и второго рода [1]. Поэтому возникает необходимость выделить наиболее значимый информационно емкий признак, а именно выявить информативный обобщающий параметр состояния топливной системы энергетической установки. Суть рассматриваемого подхода заключается в том, что процесс постепенного изменения уровня работоспособности, характеризуемый многими компонентами (физическими величинами, признаками, параметрами), описывается одномерной функцией  $B_{\Sigma}(t)$ , численные значения которой зависят от контролируемых компонентов процесса [2].

Для нахождения обобщающего параметра необходимо определить наиболее рациональную совокупность частных параметров технического состояния топливной системы, которые затем свертываются к обобщенному. Наиболее строгим подходом к определению совокупности частных параметров является путь, основанный на построении и анализе модели исследуемого объекта.

Одним из путей математического описания подобных сложных объектов представляется путь составления граф-модели [3 – 6]. Функционирующий сложный объект представляется топологическим пространством и изображается в виде графа, отображающего существенные свойства функционирования объекта, а также множество взаимосвязей его параметров. Под топологическим пространством понимается пара  $T = (X, \Theta)$ , где  $X$  – конечное абстрактное множество  $X = \{x_1, \dots, x_l\}$ ,  $\Theta$  – топология, определенная в множестве  $X$  заданием на нем би-

нарного отношения  $\varphi$ , связывающего две точки –  $x_i (x_i \in X)$  и  $x_j (x_j \in X)$ , причем  $x_i \neq x_j$  [3, 7].

Составление модели функционирования топливной системы тепловозного дизеля  $G_{ТС}(X, U)$  с использованием метода граф-описания предполагает задание в топологическом пространстве конечного множества функциональных параметров, образующих конечное множество вершин графа  $X$ , соответствующих причинно-следственных связей между ними, образующих конечное множество ребер  $U (X \cap U = \emptyset)$  и трехместного предиката  $P(x, u, y)$ ,  $x, y \in X$  и  $u \in U$  [3, 7].

В работе [3] рекомендованы следующие конечные множества параметров: входные параметры (множество  $K$ ) – параметры воздействий других объектов или окружающей среды; выходные параметры (множество  $R$ ) – параметры рассматриваемого объекта, воздействующие на другие объекты и системы; параметры процесса функционирования (множество  $F$ ) – характеристики множества подпроцессов, составляющих основной процесс функционирования топливной системы; структурные параметры (множество  $E$ ) и дефекты (множество  $D$ ). Выделим параметры указанных множеств на основе рассмотрения физических процессов, отражающих сущность функционирования топливной системы и работоспособность ее структурных элементов.

Функциональная блок-схема топливной системы тепловозного дизеля [8] представлена на рисунке 2, где  $T_o$  – температура окружающей среды;  $T_{ТБ}$  – температура топлива в топливном баке (ТБ);  $h_{ТБ}$  – уровень топлива в ТБ;  $G_{ТБ}$  – количество топлива, забираемого из ТБ;  $H_{ФГО}$  – давление потока топлива после фильтра грубой очистки (ФГО);  $G_{ФГО}$  – количество топлива, проходящего через ФГО;  $T_{ФГО}$  – температура топлива после ФГО;  $n_{ТН}$  – частота вращения вала топливopодкачивающего насоса (ТПН);  $P_{ТН}$  – давление топлива перед фильтром тонкой очистки (ФТО);  $T_{ТН}$  – температура топлива после ТПН;  $G_{ТН}$  – количество топлива, подведенного к ФТО;  $P_{ФТ}$  – давление топлива после ФТО;  $T_{ФТ}$  – температура топлива перед ФТО;  $G_{ФТ}$  – количество топлива, прошедшего через ФТО;  $P_{КТ}$  – давление топлива в надплунжерном пространстве топливного насоса высокого давления (ТНВД);  $T_{КТ}$  – температура топлива в КТ;  $G_{КТ}$  – количество топлива, подведенного к ТНВД;  $l_p$  – выход реек ТНВД;  $n_d$  – частота вращения коленчатого вала дизеля;  $P_{НД}$  – давление топлива в трубопроводах высокого давления на входе в топливную форсунку (Ф);  $G_{НД}$  – цикловая подача топлива ТНВД;  $T_{НД}$  – температура топлива после ТНВД;  $P_t$  – давление впрыскиваемого в цилиндр топлива;  $q_c$  – цикловая подача топлива;  $T_t$  – температура впрыскиваемого топлива;  $P'_{КТ}$  – давление топлива в КТ;  $G'_{КТ}$  – количество топлива, поступающего в КТ;  $P'_{ТН}$  – давление топлива после ТПН;  $G'_{ТН}$  – производительность ТПН;  $G_{ПК}$  – количество топлива, сливаемого через ПК;  $G_{ПрК}$  – количество топлива, сливаемого через перепускной клапан (ПрК);  $T_{ТП}$  – температура топлива на входе в топливopодогреватель (ТП);  $G_{ВП}$  – количество воды, проходящей через ТП;  $P_{ВП}$  – давление потока воды на входе в ТП;  $T_{ВП}$  – температура воды на входе в ТП;  $T'_{ВП}$  – температура воды на выходе из ТП;  $P'_{ВП}$  – давление воды на выходе из ТП;  $G_{ТП}$  – количество топлива, сливаемого в ТБ из ТП;  $T_{ТП}$  – температура топлива на выходе из ТП.

В качестве входных параметров (множество  $K$ ) в соответствии с функциональной блок-схемой (см. рисунок 2) рассматриваются температура окружающего воздуха –  $T_o$ ; выход рейки топливного насоса и частота вращения коленчатого вала дизеля –  $l_p$  и  $n_d$ ; температура, давление и расход воды ТП –  $T_{ВП}$ ,  $P_{ВП}$  и  $G_{ВП}$ ; частота вращения привода ТПН –  $n_{ТПН}$ . Основными выходными характеристиками процесса функционирования топливной системы (множество  $R$ ) служат цикловая подача, температура и давление впрыска топлива –  $q_{ВП}$ ,  $T_{ВП}$  и  $P_{ВП}$ .

Параметры множества  $F$  выделим на основе анализа подпроцессов функционирования. Межблочные взаимосвязи функциональных элементов топливной системы низкого давления можно охарактеризовать уравнением Бернулли для реальной жидкости, которое для рассматриваемой системы запишется в виде [9, 10]:

$$z_{ti} + P_{ti}/(\rho_t g) + (\alpha_i v_{ti}^2)/(2g) = z_{tj} + P_{tj}/(\rho_t g) + (\alpha_j v_{tj}^2)/(2g) + h_{i-j}, \quad (1)$$

где  $z_{ti}$ ,  $z_{tj}$  – высота расположения центра тяжести соответственно  $i$ -го и  $j$ -го сечений потока над плоскостью сравнения (напор положения или уровень жидкости);  $P_{ti}/(\rho_t g)$  – напор давления потока топлива;  $(\alpha_i v_{ti}^2)/(2g)$  – скоростной напор потока топлива;  $h_{i-j}$  – потерянная удельная энергия потока или потеря напора топлива на участке  $i-j$  (гидравлические потери напора);  $v_t = G_t/\omega_t$  – средняя скорость топлива на участке;  $P_t$  – давление в центре тяжести рассматриваемого сечения;  $G_t$  – расход (поток) топлива;  $\omega_t$  – живое сечение потока топлива;  $\rho_t$  – плотность жидкости;  $\alpha$  – коэффициент, учитывающий неравномерность распределения скоростей по сечению потока.

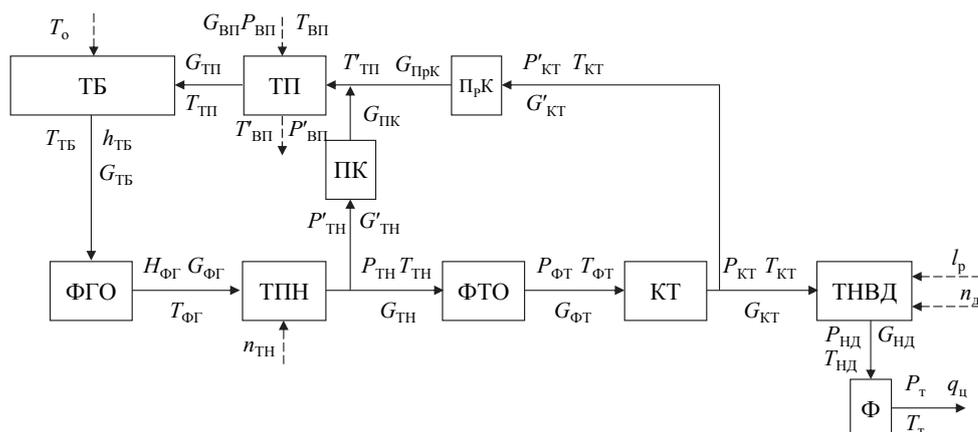


Рисунок 2 – Функциональная блок-схема топливной системы:

ТБ – топливный бак; ТП – топливоподогреватель; ПрК – перепускной клапан; ПК – предохранительный клапан; ФГО – фильтр грубой очистки; ТПН – топливоподкачивающий насос; ФТО – фильтр тонкой очистки; КТ – топливный коллектор; ТНВД – топливный насос высокого давления; Ф – топливная форсунка

Производительность ТПН является одним из важнейших параметров топливной системы тепловозного дизеля, которая характеризуется количеством массовой подачи топлива, проходящего через систему в единицу времени:

$$G_{ТН} = \mu_{ТН} C_{ТН} \rho_t n_{ТН}, \quad (2)$$

где  $\mu_{ТН}$  – коэффициент подачи насоса;  $C_{ТН}$  – постоянная для данного типа насоса;  $\rho_t$  – плотность топлива, которая представляется функцией рабочей температуры топлива в ТБ;  $n_{ТН}$  – частота вращения привода ТПН.

Фильтры тонкой и грубой очистки топлива ФТО и ФГО как элементы гидравлической цепи представляют собой местные сопротивления, для которых на основании уравнения Бернулли можно записать [9, 10]:

$$P_{ТФ} = P_{ТН} - \frac{\xi_{ФТ} \rho_t v_{ФТ}^2}{2}, \quad (3)$$

где  $\xi_{ФТ}$  – коэффициент гидравлического сопротивления фильтра;  $P_{ТН}$ ,  $P_{ТФ}$  – соответственно давление до и после фильтра;  $\rho_t$  – плотность топлива;  $v_{ФТ}$  – средняя скорость топлива в фильтре.

Клапаны ПрК и ПК топливной системы представляют собой подпружиненные шарики, закрывающие отверстия для перепуска топлива. Потери напора на клапанах представляют собой потери в местных сопротивлениях [9, 10]:

$$h_{\text{КЛ}} = \frac{\xi_{\text{ФТ}} \rho_{\text{T}} v_{\text{ФТ}}^2}{2} . \quad (4)$$

Процесс формирования закона подачи топлива в топливной системе высокого давления определяется следующими основными параметрами:  $P_{\text{T}}$ ,  $u_{\text{T}}$ ,  $\rho_{\text{T}}$  – давление, скорость движения и плотность топлива;  $d_{\text{ТВД}}$  – внутренний диаметр нагнетательного трубопровода;  $c_{\text{п}}$  – скорость плунжера;  $f_{\text{и}}$  – площадь поперечного сечения иглы форсунки;  $\tau_{\text{o}}$  – время движения плунжера на активной части хода;  $z$  – жесткость пружины иглы форсунки;  $P_{\text{и}}$  – давление топлива под иглой при ее отрыве от седла;  $P_{\text{o}}$  – давление среды в цилиндре дизеля;  $f_{\text{к}}$  – площадь поперечного сечения нагнетательного клапана;  $y$  – величина подъема нагнетательного клапана;  $\mu_{\text{в}}$  – коэффициент расхода для всасывающего окна;  $\mu_{\text{o}}$  – коэффициент расхода отсечного окна;  $\mu_{\text{с}}$  – коэффициент расхода эффективного сечения распылителя форсунки. Параметры  $c_{\text{п}}$ ,  $\tau_{\text{o}}$ ,  $P_{\text{o}}$  определяют режим работы дизеля,  $f_{\text{к}}$ ,  $\mu_{\text{в}}$ ,  $\mu_{\text{o}}$ ,  $y$  – техническое состояние ТНВД, а  $f_{\text{и}}$ ,  $z$ ,  $\mu_{\text{с}}$  – техническое состояние форсунки.

Исходя из изложенного выше основной цикл работы топливной системы отображаем множество взаимосвязанных функциональных параметров (множество  $F$ ), представляющих давление ( $P_{\text{ТН}}$ ,  $P_{\text{ФТ}}$ , ...,  $P_{\text{КТ}}$ ), температуру ( $T_{\text{ФГ}}$ ,  $T_{\text{ТН}}$ , ...,  $T_{\text{КТ}}$ ) и скорость движения сред ( $v_{\text{ФТ}}$ , ...,  $v_{\text{ФГ}}$ ), расход рабочих сред ( $G_{\text{ТН}}$ ,  $G_{\text{ПК}}$ , ...,  $G_{\text{КТ}}$ ) и гидравлические потери напора ( $h_{\text{ФГ}}$ ,  $h_{\text{ФТ}}$ , ...,  $h_{\text{ПК}}$ ), оказывающие наибольшее влияние на процесс течения потока топлива и его параметры.

Выделенные выше параметры соответствуют режиму нормального функционирования, поэтому для распознавания возможных неисправностей необходимо ввести структурные параметры (множество  $E$ ) и дефекты (множество  $D$ ).

Глубина исследования в нашем случае распространяется до агрегатов и отдельных узлов топливной системы и не рассматривает ее отдельных элементов, поэтому описание структурных параметров подмножества  $E$  здесь и далее реализуем в терминах теории размытых категорий [3]:  $E_{\text{ФГ}}$  – техническое состояние ФГО;  $E_{\text{ТПН}}$  – техническое состояние ТПН;  $E_{\text{ФТ}}$  – техническое состояние ФТО;  $E_{\text{ПК}}$  и  $E_{\text{ПрК}}$  – техническое состояние ПК и ПрК;  $E_{\text{КТ}}$  – техническое состояние КТ;  $E_{\text{НД}}$  – техническое состояние ТНВД;  $E_{\text{Ф}}$  – техническое состояние Ф. Множество структурных параметров отображаются на графе в виде прообразов [3].

Параметры  $E_i$  выделили по следующим соображениям. Основываясь на анализе функциональной схемы и ее содержательного описания, можно констатировать, что в целом снижение давления на входе в ТНВД в эксплуатации может произойти вследствие увеличения перепада давления на ФТО в результате загрязнения фильтрующего элемента ( $E_{\text{ФТ}}$ ), уменьшения производительности и давления, создаваемого топливоподкачивающим насосом, из-за износа его деталей ( $E_{\text{ТПН}}$ ), загрязнении ФГО ( $E_{\text{ФГ}}$ ), а также из-за нарушения в работе клапанов ПК и ПрК ( $E_{\text{ПК}}$  и  $E_{\text{ПрК}}$ ). Техническое состояние топливной подсистемы высокого давления характеризуется техническим состоянием ТНВД и Ф ( $E_{\text{НД}}$  и  $E_{\text{Ф}}$ ). Возникающие в них неисправности ведут к изменению закона топливоподачи, что в конечном счете сказывается на надежности и экономичности тепловозного дизеля.

Каждый структурный параметр представляется возможным состоянием – дефектом, под которым понимаем несоответствие группы структурных параметров допустимым значениям. Число дефектов в структурных элементах топливной системы принимаем конечным и будем рассматривать как один обобщенный, влияющий на параметры  $E_i$ .

Составленная методом граф-описания модель нормального функционирования топливной системы тепловозного дизеля представлена на рисунке 3. Ориентированный граф  $G_{\text{Тс}}$  в пространстве параметров является конечным и содержит вершины трех видов: стоковые (только входящие ребра), истоковые (только исходящие ребра) и смешанные (как входящие, так и исходящие ребра).

Полученная граф-модель топливной системы в пространстве параметров позволяет осуществить процедуру выбора частных параметров технического состояния. Для анализа полученных граф-моделей и установления наиболее рационального подмножества частных параметров (множества  $B$ ) был применен метод покрытия таблицы расстояний [3, 4], который базируется на оценке элементов модели, упорядочивании вершин в соответствии со значением принятого показателя эффективности, нахождении маршрутов отображения дефектов в графе. Оценка элементов модели и упорядочивание вершин осуществлялись на основе расчета показателя эффективности, представляющего собой следующую линейную функцию [3, 4]:

$$\eta_i = \alpha \lambda_i^* + \beta \Omega_i^* + \gamma \psi_i^*, \quad (5)$$

где  $\alpha, \beta, \gamma$  – коэффициенты значимости,  $\alpha + \beta + \gamma = 1$ ;  $\lambda_i^* = \lambda_i / \lambda_{\max}$ ,  $\Omega_i^* = \Omega_i / \Omega_{\max}$ ,  $\psi_i^* = \psi_i / \psi_{\max}$  – нормированные оценки элементов модели по показателям доступности контролю, информативности и различительной способности.

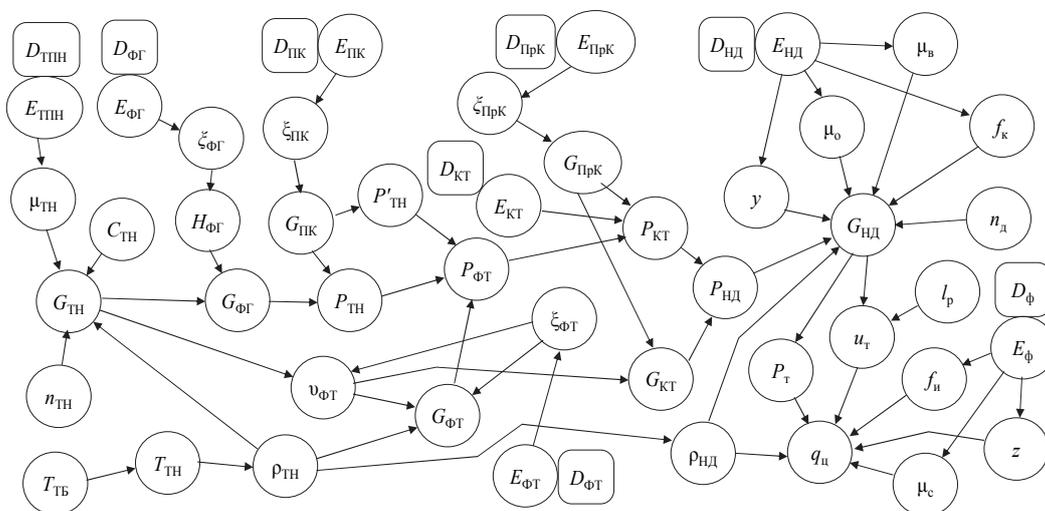


Рисунок 3 – Граф-модель топливной системы  $G_{тс}$

Оценка элементов модели по показателю доступности контролю  $\lambda_i$  осуществляется по специально разработанной шкале, включающей в себя пять ситуаций контроля, абсолютная оценка которых устанавливается в диапазоне значений от 5 до 0, а относительная – от 1 до 0. Оценка элементов модели по информативности  $\Omega_i$  осуществлялась исходя из следующего соотношения: элемент считается тем информативнее, чем от большего количества значений структурных параметров (множество  $E$ ) зависит его значение. Различительная способность  $\psi_i$  элемента модели оценивалась по числу дефектов  $D_i$ , от изображения которых достижима по модели соответствующая вершина. Наилучшей различительной способностью ( $\psi_i = 1$ ) обладает элемент, если соответствующая ему вершина достижима из одного дефекта; наихудшей различительной способностью обладает элемент, достижимый от наибольшего числа дефектов ( $\psi_i = 0$ ). Вершинам модели присваивается номер в соответствии с убыванием значений  $\eta_i$ . Таблица покрытия рассматривается как двудольный граф, где существует бинарное отношение между элементами двух множеств: множества  $E$  и множества вершин графа, поэтому математически задача покрытия таблицы расстояний решается отысканием минимальных внешне устойчивых подмножеств ориентированного графа.

В результате получили схему покрытия в виде двудольного графа (рисунок 4), представляющую собой искомое множество частных параметров топливной системы.

Исходя из того, что выделенные частные параметры технического состояния имеют различную размерность, они приводятся к единой системе безразмерного нормированного исчисления:

$$b'_i(t) = \frac{b_i(t) - b_{in}}{b_{in}}, \quad (6)$$

где  $b_i(t)$  – текущее значение  $i$ -го частного параметра;  $b_{in}$  – допустимое значение  $i$ -го частного параметра в соответствии с нормативной документацией.

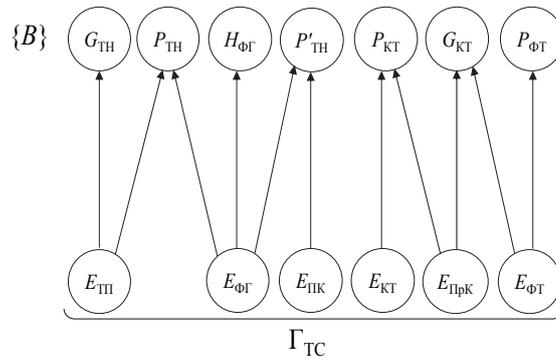


Рисунок 4 – Двудольный граф соответствия топливной системы

Допуски на значения параметров  $b_{in}$  могут быть эксплуатационными или ремонтными. Эксплуатационные допуски устанавливаются системой эксплуатационно-технической документации и технологическими указаниями по выполнению регламентных работ. Ремонтные допуски определяются в ремонтной или в производственно-технологической документации.

В результате получаем совокупность безразмерных величин  $\{G_{ТН}(t), P_{ТН}(t), H_{ФГ}(t), P'_{ТН}(t), P_{КТ}(t), G_{КТ}(t), P_{ФГ}(t)\}$ , которые посредством математического выражения нелинейного среднего сводим к обобщенному параметру:

$$B_{\Sigma}(t) = \frac{\Phi_{G_{ТН}} [G_{ТН}(t)]^{\frac{1}{\Phi_{G_{ТН}}}} + \Phi_{P_{ТН}} [P_{ТН}(t)]^{\frac{1}{\Phi_{P_{ТН}}}} + \Phi_{H_{ФГ}} [H_{ФГ}(t)]^{\frac{1}{\Phi_{H_{ФГ}}}} + \Phi_{P'_{ТН}} [P'_{ТН}(t)]^{\frac{1}{\Phi_{P'_{ТН}}}} + \Phi_{P_{КТ}} [P_{КТ}(t)]^{\frac{1}{\Phi_{P_{КТ}}}} + \Phi_{G_{КТ}} [G_{КТ}(t)]^{\frac{1}{\Phi_{G_{КТ}}}} + \Phi_{P_{ФГ}} [P_{ФГ}(t)]^{\frac{1}{\Phi_{P_{ФГ}}}}}{\Phi_{G_{ТН}} + \Phi_{P_{ТН}} + \Phi_{H_{ФГ}} + \Phi_{P'_{ТН}} + \Phi_{P_{КТ}} + \Phi_{G_{КТ}} + \Phi_{P_{ФГ}}}, \quad (7)$$

где  $\Phi_i$  – весовой коэффициент (линейная функция оценок каждого  $i$ -го частного параметра),

$$\Phi_i = v_{\theta} \theta_i + v_{\vartheta} \vartheta_i + v_{\sigma} \sigma_i; \quad (8)$$

$v_{\theta}$ ,  $v_{\vartheta}$ ,  $v_{\sigma}$  – коэффициенты значимости;  $\theta_i$ ,  $\vartheta_i$ ,  $\sigma_i$  – относительные оценки частных параметров по показателям достоверности контроля, чувствительности и информативности.

Таким образом, свертывание совокупности безразмерных величин частных параметров технического состояния с использованием математического выражения нелинейного среднего позволяет получить одномерную функцию обобщенной параметрической оценки уровня работоспособности функциональных подсистем. Получаемый при этом информационный признак удовлетворяет требованиям достоверности контроля, чувствительности и информативности. Кроме того, оценка уровня работоспособности по обобщенному параметру позволяет прогнозировать временную функцию  $B_{\Sigma}(t)$ , а следовательно, и характер изменения работоспособности во времени. Выполненные исследования позволяют рекомендовать использовать для выделения наиболее рациональной совокупности частных параметров

функциональных подсистем аппарат теории графов. Использование метода граф-описания позволяет получить математическую модель функциональной подсистемы, а известный набор средств анализа топологического пространства – искомое множество частных параметров.

Методику обработки параметров предполагается использовать в виде дополнения к программному обеспечению серийных подсистем диагностики микропроцессорных систем управления, при таком подходе исключается необходимость интегрирования в состав микропроцессорных систем управления дополнительных аппаратных средств и замены регламента работы.

## Список литературы

1. Бервинов, В. И. Техническое диагностирование локомотивов [Текст] / В. И. Бервинов / УМЦ ЖДТ. – М., 2008. – 193 с.
2. Машошин, О. Ф. Диагностика авиационной техники [Текст] / О. Ф. Машошин / МГТУ ГА. – М., 2007. – 141 с.
3. Диагностирование на граф-моделях: на примерах авиационной и автомобильной техники [Текст] / Я. Я. Осис, Я. А. Гельфандбейн и др. – М.: Транспорт, 1991. – 244 с.
4. Харламов, В. В. Методы и средства диагностирования технического состояния коллекторно-щеточного узла тяговых электродвигателей и других коллекторных машин постоянного тока [Текст] / В. В. Харламов / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2002. – 233 с.
5. Сковородников, Е. И. Моделирование процессов функционирования дизель-генераторной установки тепловоза с целью оптимизации количества параметров контроля [Текст] / Е. И. Сковородников, В. А. Михеев // Транспорт Урала. – 2009. – № 1 (20). – С. 59 – 62.
6. Анисимов, А. С. Методы исследования взаимовлияния параметров функционирования тепловоза [Текст] / А. С. Анисимов, В. А. Михеев, Ю. Б. Гришина // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2010. – № 1 (1). – С. 2 – 8.
7. Лекции по теории графов [Текст] / В. А. Емеличев, О. И. Мельников и др. – М.: Наука, 1990. – 383 с.
8. Тепловоз 2ТЭ116 [Текст] / С. П. Филонов, А. И. Гибалов и др. – М.: Транспорт, 1996. – 334 с.
9. Справочник по гидравлическим сопротивлениям [Текст] / Под ред. М. О. Штейнберга. – М.: Машиностроение, 1992. – 672 с.
10. Чиняев, И. А. Судовые системы [Текст] / И. А. Чиняев. – М.: Транспорт, 1984. – 216 с.

## References

1. Bervinov V. I. *Tekhnicheskoe diagnostirovanie lokomotivov* (Technical diagnosing of locomotives). Moscow: UMK, 2008, 193 p.
2. Mashoshin O. F. *Diagnostika aviatsionnoi tekhniki* (Diagnosis of aeronautical engineering). Moscow: MGTCU CA, 2007, 141 p.
3. Osis Ia. Ia. *Diagnostirovanie na graf-modeliakh: Na primerakh aviatsionnoi i avtomobil'noi tekhniki* (Diagnosing on graph models: On examples aviation and automotive vehicles). Moscow: Transport, 1991, 244 p.
4. Kharlamov V. V. *Metody i sredstva diagnostirovaniia tekhnicheskogo sostoianiia kollektorno-shchetochno uzla tiagovykh elektrodvigatelei i drugikh kollektornykh mashin postoiannogo toka* (Methods and tools for diagnosing technical condition number of reflex-brush assembly traction motors and other collector cars post-direct current). Omsk: OSTU, 2002, 233 p.

5. Skovorodnikov E. I., Mikheyev V. A. Modelling of processes functioning of diesel locomotive power for the purpose of optimization the number of control parameters [Modelirovanie protsessov funktsionirovaniia dizel'-generatornoi ustanovki teplo-voza s tsel'iu optimizatsii kolichestva parametrov kontrolia]. *Transport Urala – The Urals Transport Bulletin*, 2009, no. 1 (20), pp. 59 – 62.

6. Anisimov A. S., Mikheyev V. A., Grishina Yu. B Methods of interference locomotive functioning parameters [Metody issledovaniia vzaimovliianiia parametrov funktsionirovaniia teplovoza]. *Izvestiia Transsiba – The Trans-Siberian Bulletin*, 2010, no. 1 (1), pp. 2 – 8.

7. Emelichev V. A. *Lektsii po teorii grafov* (Lectures on graph theory). Moscow: Science, 1990, 383 p.

8. Filonov S. P. *Teplovoz 2TE116* (Locomotive 2TE116). Moscow: Transport, 1996, 334 p.

9. Ed. Steinberg M. O. *Spravochnik po gidravlicheskim soprotivleniiam* (Handbook of hydraulic resistance). Moscow: Mechanical engineering, 1992, 672 p.

10. Chinyaev I. A. *Sudovye sistemy* (Ship systems). Moscow: Transport, 1984, 216 p.

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

### Михеев Владислав Александрович

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046, Российская Федерация.

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Вагоны и вагонное хозяйство», ОмГУПС.

E-mail: Mischeev\_V\_A@mail.ru

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

### Mikheyev Vladislav Aleksandrovich

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx av., Omsk, 644046, Russia.

Ph. D., assistant professor of the department «Cars and carriage economy», OSTU.

E-mail: Mischeev\_V\_A@mail.ru

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Михеев, В. А. Оценка технического состояния топливной системы дизельной энергетической установки тепловоза [Текст] / В. А. Михеев // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2017. – № 2 (30). – С. 34 – 42.

## BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Mikheyev V. A. Evaluation of technical condition of the diesel power plant fuel systems. *Journal of Transsib Railway Studies*, 2017, vol. 30, no. 2, pp. 34 – 42. (In Russian).

УДК 629.4

**В. А. Нехаев, В. А. Николаев**

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС), г. Омск, Российская Федерация

## О ПАРАДИГМЕ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ДИНАМИКИ ПОДВИЖНОГО СОСТАВА И ИХ УСТОЙЧИВОСТИ

**Аннотация.** Представлены результаты исследования влияния реально существующей продольной неравноупругости железнодорожного пути, обусловленной наличием шпал и других факторов, на вертикальную динамику подвижного состава. Получены формулы для определения границ простых и комбинационных параметрических резонансов. Построены области динамической неустойчивости электровоза ЭП2К.

**Ключевые слова:** продольная неэластичная железнодорожная колея, вертикальная динамика транспортного средства, простые комбинационные и параметрические резонансы, динамическая неустойчивость электровоза.

Victor A. Nekhaev, Victor A. Nikolaev

Omsk State Transport University (OSTU), Omsk, the Russian Federation

## ON THE PARADIGM OF MATHEMATICAL MODELS OF ROLLING STOCK DYNAMICS AND SUSTAINABILITY OF THEM

**Abstract.** *Explores the impact of truly existing longitudinal non-elastic railway track caused by the presence of sleepers and other factors on the vertical dynamic of vehicle. Formulas to determine the bounds of simple combination and parametric resonances is obtained. Areas of dynamic instability of electric locomotive EP2K is built.*

**Keywords:** *longitudinal non-elastic railway track, vertical dynamic of vehicle, simple combinational and parametric resonances, dynamic instability of electric locomotive.*

Хорошо известно, что железнодорожный путь не является равноупругим ни в продольном, ни в поперечном направлении [1 – 4]. Следовательно, математические модели колебаний подвижного состава в принципе не могут представляться системами дифференциальных уравнений с постоянными коэффициентами, что в действительности имеет место в настоящее время.

Применение дифференциальных уравнений с постоянными коэффициентами, вообще говоря, ничего нового для развития науки не несет, так как алгоритм их интегрирования давно представлен в курсе высшей математики [5, 6]. Разумеется, исключением являются нелинейные дифференциальные уравнения, за редкими исключениями обладающие точными решениями, однако регулярные методы их решения отсутствуют, т. е. существуют конкретные приближенные методы их интегрирования. При их применении необходимо обязательно тщательно проверять условия соответствующих теорем, в противном случае полученным результатам нельзя доверять. Прикладники чаще всего бездумно вводят в математические модели малый параметр, в конечном итоге приравнивая его к единице. В действительности, асимптотические методы интегрирования нелинейных дифференциальных уравнений используются в асимптотическом смысле, т. е. при стремлении малого параметра к нулю, а не к единице.

Авторы работы имеют достаточно полное представление о новых веяниях в теории колебаний динамических систем, например, о странных аттракторах (детерминированных динамических системах не обязательно высокого порядка, в которых нет ничего случайного, но они рождают детерминированный хаос – новый раздел математики, появившийся в конце прошлого века).

Параметрический резонанс в отличие от обычного имеет три существенных особенности.

1. Спектр частот, при которых возникают колебания с неограниченно возрастающей амплитудой, при обычном резонансе является точечным и совпадает с совокупностью собственных частот системы; при параметрическом – состоит из ряда малых интервалов, длины которых зависят от амплитуды возбуждения и стягиваются к нулю, когда амплитуда стремится к нулю. Значения частот, к которым стягиваются эти интервалы, называются критическими, а не резонансными.

2. Возрастание амплитуды колебаний динамической системы при обычном резонансе происходит по степенному закону, как правило, – линейному, при параметрическом – по показательному.

3. В диссипативных динамических системах при обычном резонансе трение ограничивает максимальные, резонансные амплитуды колебаний, а в параметрических системах оно создает пороговые условия для коэффициентов параметрического воздействия и при превышении этих порогов амплитуды колебаний неограниченно возрастают.

В дальнейшем под устойчивостью динамической системы там, где это не будет вызывать недоразумений, будем понимать ограниченность решений систем дифференциальных уравнений с переменными параметрами на бесконечности.

Итак, мы полагаем, что динамика подвижного состава должна описываться системами дифференциальных уравнений со случайными коэффициентами [7] (параметрические системы) и случайным возмущением, но на сегодняшний день это чрезвычайно сложно и доступно только математикам. Мы полагаем, что обсуждению данное утверждение не подлежит, ибо с математической точки зрения другого просто не дано. Нам всем, в том числе и авторам настоящей статьи, необходимо поднимать уровень математической культуры.

В конце прошлого века в транспортной механике появились работы, посвященные неравноупругости железнодорожного пути [3, 8–12], причем работа Михаила Прокопьевича Пахомова (нашего учителя) была выполнена раньше, чем появилась знаменитая книга [4].

На наш взгляд, настало время ученым-железнодорожникам поменять парадигму дифференциальных уравнений с постоянными коэффициентами и случайной правой частью на парадигму дифференциальных уравнений со случайными коэффициентами и случайной правой частью.

Чтобы несколько упростить ситуацию, будем изучать параметрическую систему и из всех факторов, создающих продольную неравноупругость железнодорожного пути, учитывать только наличие шпал. Хорошо известно, что технические требования, предъявляемые к эпюре шпал, такие жесткие, что мы вправе считать возмущение, которые они вносят в динамическую систему, узкополосным или на первых порах – гармоническим и представлять его в дальнейшем периодической функцией вида:

$$f(V, t) = 2\mu \cos 2\Omega t, \quad (1)$$

здесь  $\mu$  – коэффициент параметрического возбуждения, б/р;  $\Omega = \frac{\pi V}{3,6l_{\text{шп}}}$  – частота параметрического возмущения, 1/с;  $V$  – скорость движения поезда, которую будем считать постоянной, км/ч;  $l_{\text{шп}}$  – расстояние между шпалами, определяемое эпюрой шпал, м, например, для эпюры 1840 штук на 1 километр имеем  $l_{\text{шп}} = 0,543$ ; 3,6 – переводной коэффициент из километров в час в метры в секунду.

Таким образом, учеными-железнодорожниками должны изучаться динамические системы с детерминированным параметрическим возмущением и случайной правой частью. Если ограничиться экипажем с линейными силовыми характеристиками, то поведение таких систем описывается системами дифференциальных уравнений вида:

$$A\ddot{\vec{z}} + B\dot{\vec{z}} + (C + 2\mu F \cos 2\Omega t)\vec{z} = \vec{\zeta}(t) + \vec{\xi}(t), \quad (2)$$

где  $\vec{z}(t)$  – вектор обобщенных координат, отсчитываемых от положения статического равновесия, имеющий размерность  $n$  (число степеней свободы подвижной единицы);  $A$ ,  $B$ ,  $C$  и  $F$  – постоянные  $n \times n$  – матрицы, причем матрицы масс, диссипации и жесткостей  $A$ ,  $B$  и  $C$  – симметричные и положительно-определенные,  $\mu$  – коэффициент мультипликативного (параметрического) возбуждения. Через  $\vec{\zeta}(t)$  обозначен вектор случайного внешнего возмущения, представляющего собой стационарный процесс с нулевыми средними значениями и соответствующими спектральными плотностями. Вектор  $\vec{\xi}(t)$  описывает детерминированный возмущающий фактор с частотой  $\Omega$ , связанный с продольной, шпальной неравноупругостью железнодорожного пути.

Будем рассматривать влияние продольной неравноупругости железнодорожного пути на динамику подвижного состава, используя расчетную схему условного одноосного экипажа, обладающего тремя степенями свободы (рисунок 1).

Уравнения движения такой динамической системы легко находятся с помощью энергетического метода – уравнений Лагранжа второго рода. Опуская рутинные действия, связанные с вычислением кинетической и потенциальной энергий и диссипативной функции и взятием прямых и частных производных от соответствующих энергетических характеристик, запишем систему дифференциальных уравнений, которые представляют математическую модель принятого к рассмотрению экипажа в виде:

$$\begin{cases} m_k \ddot{z}_k + \beta_u (\dot{z}_k - \dot{z}_t) + c_u (z_k - z_t) = m_k g; \\ m_t \ddot{z}_t - \beta_u (\dot{z}_k - \dot{z}_t) + \beta_o (\dot{z}_t - \dot{z}_{к.п}) - c_u (z_k - z_t) + c_o (z_t - z_{к.п}) = m_t g; \\ m_{к.п} \ddot{z}_{к.п} - \beta_o (\dot{z}_t - \dot{z}_{к.п}) + \beta_n (\dot{z}_{к.п} - \dot{\eta}) - c_o (z_t - z_{к.п}) + c_n (z_{к.п} - \eta) = m_{к.п} (g + \ddot{\eta}), \end{cases} \quad (3)$$

где  $m_k, m_t, m_{к.п}$  – соответственно масса кузова, тележки и колесной пары, приходящиеся на одну колесную пару экипажа;  $\beta_u, \beta_o, \beta_n$  – коэффициенты вязкого трения в центральном и буксовом подвешиваниях подвижного состава и пути;  $c_u, c_o, c_n$  – жесткости центрального и буксового подвешиваний подвижного состава и пути;  $z_k, z_t, z_{к.п}$  – подпрыгивания кузова, тележки и колесной пары экипажа;  $\eta$  – геометрическая неровность железнодорожного пути, имеющая случайный характер;  $g$  – ускорение свободного падения на Земле.

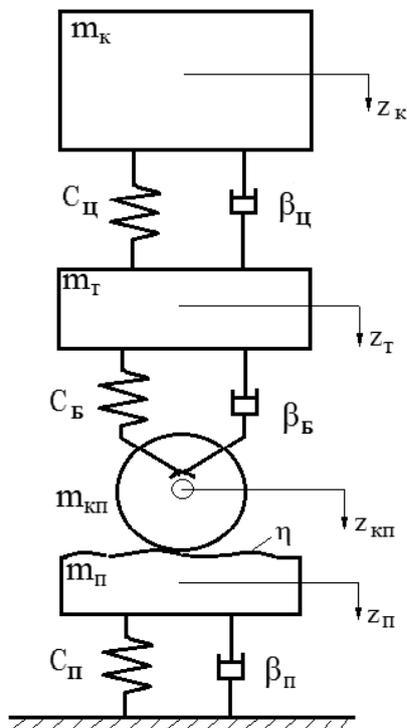


Рисунок 1 – Схема условного одноосного железнодорожного экипажа

Из уравнений (3) нетрудно видеть, что в правых частях дифференциальных уравнений стоят постоянные величины, от которых необходимо избавиться, что упростит алгоритм поиска решения. Положим, что

$$\begin{cases} z_k = f_k + q_k; \\ z_t = f_t + q_t; \\ z_{к.п} = f_{к.п} + q_{к.п}, \end{cases} \quad (4)$$

здесь  $f_k, f_t, f_{к.п}$  – переменные, подлежащие определению из условия, что обнуляют правые части, кроме последнего уравнения системы (3);  $q_k, q_t, q_{к.п}$  – новые обобщенные координаты, отсчитываемые от положений статического равновесия, ибо жесткость железнодорожного пути по протяженности является функцией времени в предположении движения экипажа с постоянной скоростью:

$$c_n = c_0 (1 - 2\mu \cos 2\Omega t), \quad (5)$$

где  $\mu = \frac{1}{2} \frac{c_{\max} - c_{\min}}{c_{\max} + c_{\min}}$  – коэффициент параметрического

возбуждения от шпальной неравноупругости;  $c_{\max}$  – жесткость железнодорожного пути над серединой шпалы;  $c_{\min}$  – жесткость железнодорожного пути в середине междушпального ящика;  $c_0 = \frac{1}{2} (c_{\max} + c_{\min})$  – средняя на рельсовом звене жесткость

пути, которая определяется регионом расположения железной дороги и сезоном года (зима, лето).

Подстановка уравнений (4) в систему (3) и несложные преобразования приводят нас к системе алгебраических уравнений для определения переменных  $f$ :

$$C\vec{f} = \vec{m}g, \quad (6)$$

здесь  $C = \begin{pmatrix} c_{ц} & -c_{ц} & 0 \\ -c_{ц} & c_{ц} + c_{б} & -c_{б} \\ 0 & -c_{б} & c_{б} + c_{п} \end{pmatrix}$  – матрица жесткостных коэффициентов железнодорожного

экипажа;

$\vec{f} = \begin{pmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \end{pmatrix}$  – вектор отыскиваемых переменных;

$\vec{m} = \begin{pmatrix} m_k \\ m_T \\ m_{к.п} \end{pmatrix}$  – вектор масс экипажа.

Решение САУ (6) дается следующими формулами:

$$\begin{cases} f_1 = \Delta_{ц ст} + \Delta_{б ст} + \frac{(m_k + m_T + m_{к.п})g}{c_{п}}; \\ f_2 = \Delta_{б ст} + \frac{(m_k + m_T + m_{к.п})g}{c_{н}}; \\ f_3 = f_{п ст} = \frac{(m_k + m_T + m_{к.п})g}{c_{п}}, \end{cases} \quad (7)$$

где  $\begin{cases} \Delta_{ц ст} = \frac{m_k g}{c_{ц}} = \text{const}; \\ \Delta_{б ст} = \frac{(m_k + m_T)g}{c_{б}} = \text{const} \end{cases}$  – статические прогибы центрального и букового подвешива-

ний железнодорожного подвижного состава. Отдельно рассмотрим последнее выражение в системе (7):

$$f_3 = \frac{(m_k + m_T + m_{к.п})g}{c_0(1 - 2\mu \cos 2\Omega t)} = \frac{f_0}{1 - 2\mu \cos 2\Omega t} \approx f_0(1 + 2\mu \cos 2\Omega t), \quad (8)$$

здесь  $f_0 = \frac{m_k + m_T + m_{к.п}}{c_0} g$  – средний статический прогиб пути под статической нагрузкой от экипажа. Формулы (7) тогда следует записать в виде:

$$\begin{cases} f_1 = \Delta_{ц ст} + \Delta_{б ст} + f_3; \\ f_2 = \Delta_{б ст} + f_3; \\ f_3 = f_0(1 + 2\mu \cos 2\Omega t). \end{cases} \quad (9)$$

Отсюда нетрудно видеть, что переменные  $f_1$ ,  $f_2$  и  $f_3$  являются функциями времени  $t$ , поэтому возьмем от уравнений (9) первую и вторую прямые производные по времени, в результате имеем:

$$\begin{cases} \dot{f}_1 = \dot{f}_2 = \dot{f}_3 = -4\mu\Omega f_0 \sin 2\Omega t; \\ \ddot{f}_1 = \ddot{f}_2 = \ddot{f}_3 = -8\mu\Omega^2 f_0 \cos 2\Omega t. \end{cases} \quad (10)$$

Подставляя уравнения (4) и (10) в систему (3), после несложных преобразований получим математическую модель, описывающую вертикальные колебания подпрыгивания кузова, тележки и колесной пары экипажа при движении по неравноупругому железнодорожному пути с постоянной скоростью:

$$\begin{cases} m_k \ddot{q}_k + \beta_{\text{ц}}(\dot{q}_k - \dot{q}_T) + c_{\text{ц}}(q_k - q_T) = -m_k \ddot{f}_1; \\ m_T \ddot{q}_T - \beta_{\text{ц}}(\dot{q}_k - \dot{q}_T) + \beta_0(\dot{q}_T - \dot{q}_{\text{к.п}}) - c_{\text{ц}}(q_k - q_T) + c_0(q_T - q_{\text{к.п}}) = -m_T \ddot{f}_2; \\ m_{\text{к.п}} \ddot{q}_{\text{к.п}} - \beta_0(\dot{q}_T - \dot{q}_{\text{к.п}}) + \beta_{\text{п}} \dot{q}_{\text{к.п}} - c_0(q_T - q_{\text{к.п}}) + c_{\text{п}} q_{\text{к.п}} = -m_{\text{к.п}} \ddot{f}_3 + m_{\text{к.п}} \ddot{\eta} + \beta_{\text{п}} \dot{\eta} + c_0 \eta. \end{cases} \quad (11)$$

Возмущение от геометрических неровностей железнодорожного пути в виде вектора записывается так:

$$\vec{\zeta}(t) = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ m_{\text{к.п}} \ddot{\eta} + \beta_{\text{п}} \dot{\eta} + c_0 \eta \end{pmatrix}, \quad (12)$$

а вектор воздействия от продольной, шпальной неравноупругости имеет вид:

$$\vec{\xi}(t) = - \begin{pmatrix} m_k \ddot{f}_1 \\ m_T \ddot{f}_2 \\ m_{\text{к.п}} \ddot{f}_3 \end{pmatrix} \quad (13)$$

и физически представляет собой переносные ускорения, действующие на кузов, тележку и колесную пару подвижного состава.

Вводя матрицы масс, диссипации и упругости

$$\left\{ \begin{aligned} A &= \begin{pmatrix} m_k & 0 & 0 \\ 0 & m_T & 0 \\ 0 & 0 & m_{\text{к.п}} \end{pmatrix} = \text{diag}(m_k, m_T, m_{\text{к.п}}); \\ B &= \begin{pmatrix} \beta_{\text{ц}} & -\beta_{\text{ц}} & 0 \\ -\beta_{\text{ц}} & \beta_{\text{ц}} + \beta_0 & -\beta_0 \\ 0 & -\beta_0 & \beta_0 + \beta_{\text{п}} \end{pmatrix}; \\ C &= \begin{pmatrix} c_{\text{ц}} & -c_{\text{ц}} & 0 \\ -c_{\text{ц}} & c_{\text{ц}} + c_0 & -c_0 \\ 0 & -c_0 & c_0 + c_0 \end{pmatrix}; \\ F &= \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -2\mu c_0 \end{pmatrix} \end{aligned} \right. \quad (14)$$

и вектор обобщенных координат

$$\vec{z} = \begin{pmatrix} q_k \\ q_T \\ q_{\text{к.п}} \end{pmatrix}, \quad (15)$$

в конечном итоге приходим к форме записи дифференциальных уравнений (2). Проверяем условие малости диссипативных сил в подвижном составе [11]:

$$\frac{\|(A^{-1}B)^2\|}{\|A^{-1}C\|} \ll 1. \quad (16)$$

Здесь символ  $\|\dots\|$  означает евклидову норму матрицы. Действительно, недиагональные элементы матрицы коэффициентов диссипативных сил малы по сравнению с элементами, стоящими на главной диагонали. Это подтверждает вычисление отношения норм матриц (16), которое выполняем с помощью математического пакета Mathcad 13, в результате получаем  $0,462503 \ll 1$ . Кроме того, колебания экипажа считаем малыми (это обычное допущение дисциплины «Динамика подвижного состава»), а движение колесной пары по рельсам – безотрывным.

Определяем собственные частоты консервативной системы (для примера воспользуемся параметрами электровоза ЭП2К) с помощью стандартной функции математического пакета Mathcad 13  $\omega = \text{eigenvals}(A^{-1} \cdot C)$ , в результате имеем (таблицы 1, 2):

Таблица 1 – Собственные частоты подпрыгиваний частей экипажа

Собственная частота подпрыгиваний		
кузова	тележки	колесной пары
5,159497 рад/с (0,82116 Гц)	18,364974 рад/с (2,922876 Гц)	150,178311 рад/с (23,901621 Гц)

Таблица 2 – Парциальные частоты подпрыгиваний частей экипажа

Собственная частота подпрыгиваний		
кузова	тележки	колесной пары
7,195950 рад/с (1,145271 Гц)	17,725900 рад/с (2,821165 Гц)	150,171332 рад/с (23,900510 Гц)

Из изучения данных таблиц 1 и 2 следует, что ошибка парциальных частот может быть достаточно большой: так, например, если взять для сравнения данные по кузову экипажа, то отличие достигает почти 50 %. Поэтому парциальные частоты можно, видимо, использовать только в экспертных оценках динамических качеств подвижного состава железных дорог России.

Таблица 3 – Парциальные коэффициенты колебаний частей экипажа

Собственная частота подпрыгиваний		
кузова	тележки	колесной пары
0,353779	0,66846	0,276161

По данным таблицы 3 можно сделать вывод о том, что колебания подпрыгивания тележки электровоза ЭП2К несколько передемпфированы. К данным, представленным в таблице 3, нужно подходить с той же меркой, о которой говорилось выше. Однако согласно критерию (16) диссипативные силы, действующие в экипаже, являются малыми. Это утверждение можно усилить рассмотрением матрицы парциальных коэффициентов колебаний, если ввести такое понятие:

$$\Delta = \begin{pmatrix} \frac{b_{1,1}}{2m_1\omega_{01}} & -\frac{b_{1,1}}{2m_1\omega_{01}} & 0 \\ -\frac{b_{1,1}}{2m_2\omega_{02}} & \frac{b_{2,2}}{2m_2\omega_{02}} & -\frac{b_{2,3}}{2m_2\omega_{02}} \\ 0 & -\frac{b_{2,3}}{2m_3\omega_{03}} & \frac{b_{3,3}}{2m_3\omega_{03}} \end{pmatrix}.$$

Подстановка значений, входящих в строки этой матрицы, дает:

$$\Delta = \begin{pmatrix} 0,353779 & -0,353779 & 0 \\ -0,384790 & 0,668460 & -0,283670 \\ 0 & -0,050704 & 0,276161 \end{pmatrix}.$$

Пользуясь уже указанным математическим пакетом Mathcad 13, перейдем в системе (11) к нормальным координатам с помощью матрицы нормированных собственных векторов системы  $V = \text{eigenvecs}(A^{-1} \cdot C)$ :

$$\begin{cases} \tilde{z} = V\tilde{x}; \text{ переход к нормальным координатам;} \\ \tilde{C} = V^{-1} A^{-1} C V = \text{diag}(\omega_{0к}, \omega_{0т}, \omega_{0кп}); \\ \tilde{B} = V^{-1} A^{-1} B V; \\ \tilde{F} = V^{-1} A^{-1} F V; \\ \tilde{\zeta} = V^{-1} A^{-1} \zeta; \\ \tilde{\xi} = V^{-1} A^{-1} \xi, \end{cases}$$

тогда можно написать:

$$E\ddot{\tilde{q}} + \tilde{B}\dot{\tilde{q}} + \tilde{C}(E + 2\mu\tilde{F} \cos 2\Omega t)\tilde{q} = \tilde{\xi}(t) + \tilde{\zeta}(t), \quad (17)$$

где  $\tilde{B} = \begin{pmatrix} 2,032506 & -1,317261 & -1,737168 \\ -2,949121 & 26,522443 & -8,972689 \\ -6,203859 & -14,312718 & 83,177571 \end{pmatrix}$  – матрица диссипативных коэффициентов

для нормальных координат электровоза ЭП2К,

$$\tilde{C} = \begin{pmatrix} 26,620413 & 0 & 0 \\ 0 & 337,272266 & 0 \\ 0 & 0 & 22553,525129 \end{pmatrix} = \text{diag}(26,620413; 337,272266; 22553,525129)$$
 – матрица жесткостных коэффициентов

для нормальных координат электровоза (или квадратов собственных частот консервативной системы, когда  $B \equiv 0$ ),

$$\tilde{F} = \begin{pmatrix} -0,028013 & -0,063945 & -5,433346 \\ -0,025757 & -0,058796 & -4,995833 \\ -0,014859 & -0,033919 & -2,882076 \end{pmatrix}$$
 – матрица коэффициентов параметрического

возбуждения для нормальных координат электровоза.

Нетрудно видеть, что нормальные координаты не разделились, а связаны между собой через матрицы диссипативных коэффициентов и коэффициентов мультипликативного возмущения. Этого, разумеется, следовало ожидать; три матрицы практически никогда не приводятся к диагональным видам одновременно.

Преимущества последней формы записи состоят в том, что для нее уже найдены формулы для определения границ простых и комбинационных параметрических резонансов. Так, для главных областей неустойчивости (параметрических резонансов) имеем [7, 13,14]:

простые параметрические резонансы –

$$\Omega_{1,2} \approx \omega_k \left( 1 \pm \sqrt{\mu^2 f_{k,k}^2 - 4\gamma_k^2} \right) \quad (k=1,2,3), \quad (18)$$

комбинационные резонансы суммарного типа –

$$\Omega_{1,2} \approx \frac{\omega_i + \omega_k}{2} \pm \frac{\gamma_i \omega_i + \gamma_k \omega_k}{4\sqrt{\gamma_i \gamma_k}} \sqrt{\mu^2 f_{i,k} f_{k,i} - 4\gamma_i \gamma_k} \quad (i, k = 1, 2, 3), \quad (19)$$

комбинационные резонансы разностного типа –

$$\Omega_{1,2} \approx \frac{|\omega_i - \omega_k|}{2} \pm \frac{|\gamma_i \omega_i - \gamma_k \omega_k|}{4\sqrt{\gamma_i \gamma_k}} \sqrt{\mu^2 |f_{i,k} f_{k,i}| - 4\gamma_i \gamma_k} \quad (i, k = 1, 2, 3), \quad (20)$$

Здесь введенный в формулы (18) – (20) коэффициент является парциальным коэффициентом колебания  $\gamma_i = b_{i,i}/\omega_i$ , так, например, для одноступенной механической системы это есть  $\delta = n/\omega$ . Для рассматриваемого подвижного состава вектор

$$\vec{\gamma} = \begin{pmatrix} 0,393935 \\ 1,444186 \\ 0,553859 \end{pmatrix}.$$

Перейдем в выражениях (18) – (20) к скорости движения экипажа, в результате получим такие формулы:

$$V_{k1,2} \approx \frac{3,6l_{\text{ин}}}{\pi} \omega_k \left( 1 \pm \sqrt{\mu^2 f_{k,k}^2 - 4\gamma_k^2} \right) \quad (k = 1, 2, 3); \quad (21)$$

$$V_{ik1,2} \approx \frac{3,6l_{\text{ин}}}{\pi} \left[ \frac{\omega_i + \omega_k}{2} \pm \frac{\gamma_i \omega_i + \gamma_k \omega_k}{4\sqrt{\gamma_i \gamma_k}} \sqrt{\mu^2 f_{i,k} f_{k,i} - 4\gamma_i \gamma_k} \right] \quad (i, k = 1, 2, 3); \quad (22)$$

$$V_{ik1,2} \approx \frac{3,6l_{\text{ин}}}{\pi} \left[ \frac{|\omega_i - \omega_k|}{2} \pm \frac{|\gamma_i \omega_i - \gamma_k \omega_k|}{4\sqrt{\gamma_i \gamma_k}} \sqrt{\mu^2 |f_{i,k} f_{k,i}| - 4\gamma_i \gamma_k} \right] \quad (i, k = 1, 2, 3). \quad (23)$$

Расчетом установлено, что критические коэффициенты параметрического возбуждения (в смысле, что подкоренные выражения должны быть положительными или равными нулю) для простых параметрических резонансов имеют следующие значения: 28,125326 – для кузова; 49,125327 – для тележки; 0,384347 – для колесной пары.

Следовательно, в чистом виде простых параметрических резонансов на железнодорожном подвижном составе мы не можем наблюдать, так как коэффициент параметрического возбуждения  $\mu$ , зарегистрированный на практике, находится в пределах 0,04 – 0,05.

Графики изменения границ зон параметрического резонанса показаны на рисунках 2 – 4.

Из рисунков 1 и 2 можно сделать очевидный вывод о том, что резонансные скорости кузова и тележки электровоза ЭП2К находятся значительно ниже зоны эксплуатационных скоростей, да и диссипативные силы в локомотиве таковы, что критические значения коэффициентов параметрического возмущения чрезвычайно велики (об этом речь пойдет далее).

Из рисунка 4 следует, что колесная пара может находиться в области главного параметрического резонанса, но он в чистом виде невозможен, поскольку критическое значение коэффициента мультипликативного возбуждения все же достаточно высоко и равно 0,384347.

Относительно комбинационных параметрических резонансов суммарного или разностного типов можно утверждать, что, во-первых, в консервативных системах они в принципе не могут возникнуть и развиваться, во-вторых, критические коэффициенты параметрического возбуждения комбинационных резонансов равны соответственно: 37,170766 – для под-

системы «кузов – тележка»; 3,2879 – для подсистемы «кузов – колесная пара» и 4,345247 – для подсистемы «тележка – колесная пара».

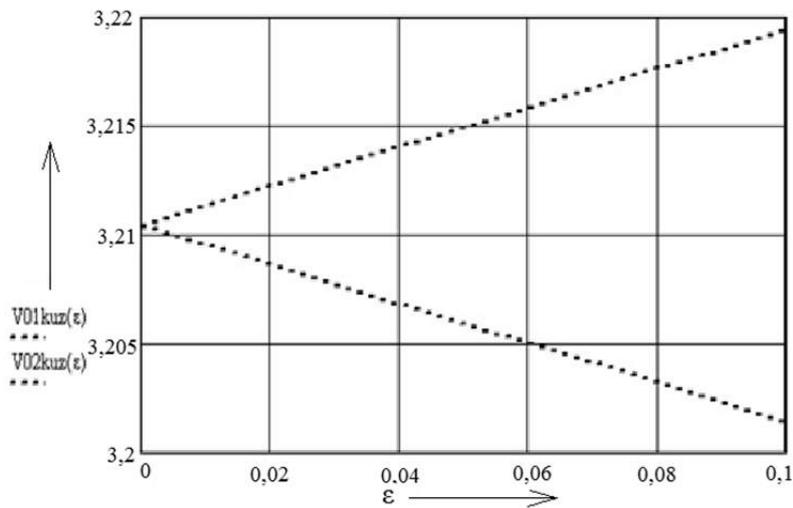


Рисунок 2 – Главная область неустойчивости кузова ЭП2К для консервативного случая

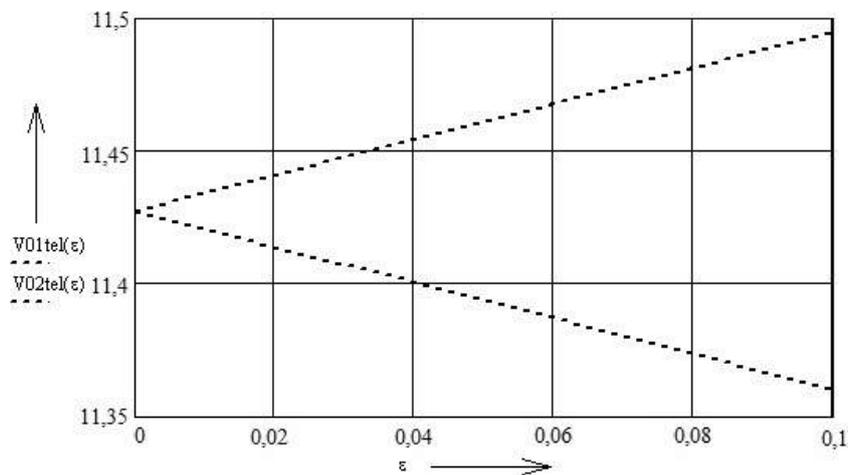


Рисунок 3 – Главная область неустойчивости тележки ЭП2К в консервативном случае

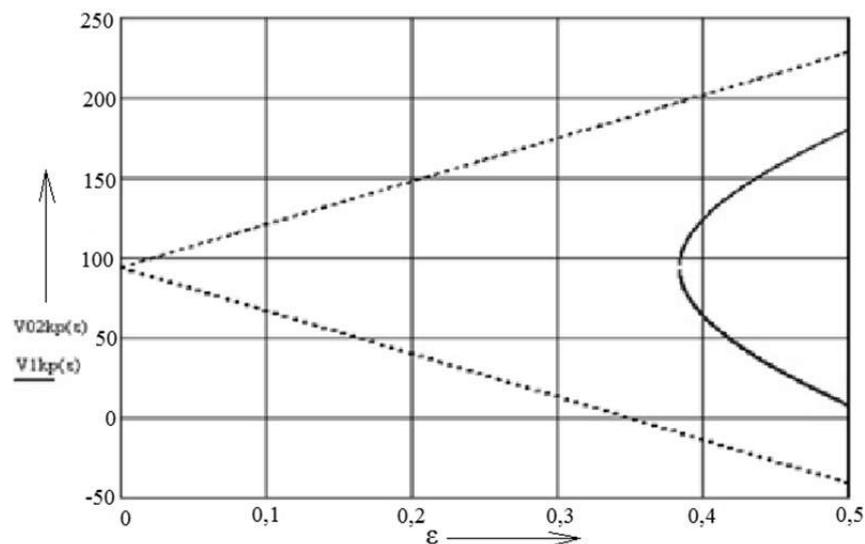


Рисунок 4 – Главная область неустойчивости колесной пары ЭП2К: пунктирная кривая – для консервативного случая, сплошная кривая – для диссипативного случая

У не совсем искущенного исследователя, вероятно, возникнет вопрос – зачем мы переходим в другую парадигму, если ничего в чистом виде нельзя наблюдать. Ответ на это «немой» вопрос такой. Во-первых, мы учли только продольную, шпальную неравноупругость железнодорожного пути, но хорошо известно из работ ученых ДИИТа, что имеются и другие длины скрытых периодичностей в спектральной плотности жесткости пути и по величине они гораздо больше междушпального расстояния. Следовательно, на них могут среагировать как кузов, так и тележка экипажа. Во-вторых, нельзя забывать о том, что продольная, шпальная неравноупругость железнодорожного пути создает аддитивное возмущение в правой части (это – переносные ускорения соответствующих частей экипажа).

Кроме того, в зонах простых параметрических колебаний обычно возможно возникновение и развитие явления взаимодействия параметрически возбуждаемых и чисто вынужденных колебаний (в рассматриваемом случае внешнее возмущение обязано содержать скрытую периодичность с длиной волны, равной, например, двум междушпальным расстояниям).

Таким образом, остаются пока неразрешенными две проблемы – это исследование влияния продольной неравноупругости железнодорожного пути на случайное возмущение, действующее со стороны пути на колесные пары (прохождение геометрических неровностей). Конечно же, математической моделью такой задачи является система дифференциальных уравнений (17), когда в правой части отсутствует аддитивное возмущение от продольной неравноупругости пути. Вторая из них: необходимо, на наш взгляд, нормировать продольную неравноупругость пути, как это уже сделано для геометрической неровности, где нормируется градиент. Математическая модель для решения данного вопроса также выводится из системы дифференциальных уравнений (17) при условии, что геометрических неровностей на пути нет. Напоминаем, что хотя исходная математическая модель является параметрической, она остается линейной и для нее справедлив принцип суперпозиции.

Кроме того, развитие данной области исследований требует учета изложенного выше, что в конечном счете позволит оценить границы применения и погрешности ныне используемых математических моделей.

### *Список литературы*

1. Нехаев, В. А. Неравноупругость железнодорожного пути как возмущающий фактор [Текст] / В. А. Нехаев, Р. Д. Сабиров // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2013. – № 3. – С. 42 – 54.
2. Нехаев, В. А. Особенности составления математической модели условной двухосной тележки, движущейся по неравноупругому железнодорожному пути в продольном направлении [Текст] / В. А. Нехаев, Р. Д. Сабиров // Материалы II всерос. конф. с междунар. участием «Технологическое обеспечение ремонта и повышение качества подвижного состава» / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2013. – С. 185 – 191.
3. Нехаев, В. А. Взаимодействие экипажа с квазиинвариантной системой подвешивания и неравноупругого по протяженности пути [Текст] / В. А. Нехаев: Дис.. канд. техн. наук. – Омск, 1983. – 217 с.
4. Болотин, В. В. Динамическая устойчивость упругих систем [Текст] / В. В. Болотин / ГИИТЛ. – М., 1956. – 600 с.
5. Понтрягин, Л. С. Обыкновенные дифференциальные уравнения [Текст] / Л. С. Понтрягин. – М.: Наука, 1970. – 332 с.
6. Смирнов, В. И. Курс высшей математики: В 5 т. [Текст] / В. И. Смирнов. – М.: Наука, 1974. – Т. 2. – 656 с.
7. Диментберг, М. Ф. Случайные процессы в динамических системах с переменными параметрами [Текст] / М. Ф. Диментберг. – М.: Наука, 1989. – 176 с.
8. Пахомов, М. П. Исследование вертикальных колебаний и воздействия электровозов на путь [Текст] / М. П. Пахомов: Дис... доктора техн. наук. – М., 1958. – 311 с.

9. Панькин, Н. А. Колебательные движения экипажей при параметрическом стохастическом возмущении [Текст] / Н. А. Панькин, И. М. Стесин, В. П. Ценов // Вестник ВНИИЖТа. – М. – № 1. – 1978. – С. 27 – 30.
10. Гавриленко, А. К. Планирование подъемочного ремонта и планово-предупредительной выправки железнодорожного пути с учетом критерия неравноупругости [Текст] / А. К. Гавриленко: Дис... канд. техн. наук. – Екатеринбург, 2007. – 121 с.
11. Привалов, С. В. Влияние жесткости подрельсового основания на взаимодействие экипажа и пути [Текст] / С. В. Привалов: Дис... канд. техн. наук. – М., 2004. – 118 с.
12. Курган, Д. Н. К решению задач расчета пути на прочность с учетом неравноупругости подрельсового основания [Текст] / Д. Н. Курган. <https://cyberleninka.ru/article/n/kresheniyu-zadach-rascheta-puti-na-prochnost-s-uchetom-neravnouprugosti-podrelsovogo-osnovaniya>
13. Болотин, В. В. Случайные колебания упругих систем [Текст] / В. В. Болотин. – М.: Наука, 1979. – 336 с.
14. Вибрации в технике: Справочник: В 6 т. / Под ред. В. Н. Челомея. – М.: Машиностроение, 1978. – Т.1. Колебания линейных систем / Под ред. В. В. Болотина. 1978. – 352 с.

## References

1. Nekhaev V. A., Sabirov R. D. Non-elasticity of the railway track as a disturbing factor [Neravnouprugost' zheleznodorozhnogo puti kak vozmushchaiushchii faktor]. *Izvestiia Transsiba – The journal of Transsib Railway Studies*, 2013, no. 3, pp. 42 – 54.
2. Nekhaev V. A., Sabirov R. D. Features of the compilation of a mathematical model of a conditional biaxial trolley moving along an unequal-elastic railway track in the longitudinal direction [Osobennosti sostavleniia matematicheskoi modeli uslovnoi dvukhosnoi telezhki, dvizhushcheisia po neravnouprugomu zheleznodorozhnomu puti v prodol'nom napravlenii]. *Materialy II vserossiyskoy konferencii «Tekhnologicheskoe obespechenie remonta i povyshenie kachestva podvizhnogo sostava» – Proceedings of the II All-Russian Conference «Technological maintenance of repair and improvement of quality of a rolling stock»*. – Omsk, 2013, pp. 185 – 191.
3. Nekhaev V. A. *Vzaimodeistvie ekipazha s kvaziinvariantnoi sistemoi podveshivaniia i neravnouprugogo po protiazhennosti puti* (Interaction of a crew with a quasi-invariant suspension system and a non-uniformly elastic path length). PhD thesis, Omsk, OSTU, 1983, 217 p.
4. Bolotin V. V. *Dinamicheskaiia ustoiichivost' uprugikh sistem* (Dynamic stability of elastic systems). Moscow: GITTL, 1956, 600 p.
5. Pontriagin L. S. *Obyknovennye differentsial'nye uravneniia* (Ordinary differential equations). Moscow: Nauka, 1970, 332 p.
6. Smirnov V. I. *Kurs vysshei matematiki* (The course of higher mathematics). Moscow: Nauka, 1974, 656 p.
7. Dimentberg M. F. *Sluchainye protsessy v dinamicheskikh sistemakh s peremennymi parametrami* (Random processes in dynamical systems with variable parameters). Moscow: Nauka, 1989, 176 p.
8. Pakhomov M. P. *Issledovanie vertikal'nykh kolebaniy i vozdeistviia elektrovozov na put'* (Investigation of vertical oscillations and the impact of electric locomotives on the path). Doctor's thesis, Moscow, 1958, 311 p.
9. Pan'kin N. A., Stesin I. M., Tsenov V. P. Oscillatory motion of crews under a parametric stochastic perturbation [Kolebatel'nye dvizheniia ekipazhei pri parametricheskom stokhasticheskom vozmushchenii]. *Vestnik VNIIZhT – Vestnik VNIIZhT*, 1978, no. 1, pp. 27 – 30.
10. Gavrilenko A. K. *Planirovanie pod'emochного remonta i planovo-predupreditel'noi vypravki zheleznodorozhnogo puti s uchetom kriteriia neravnouprugosti* (Planning of lifting repair and preventive adjustment of the railway track, taking into account the criterion of non-equal-elasticity). PhD thesis, Ekaterinburg, USTU, 2007, 121 p.

11. Privalov S. V. *Vliianie zhestkosti podrel'sovogo osnovaniia na vzaimodeistvie ekipazha i puti* (Influence of the rigidity of the under-rail base on the interaction of the crew and the track). PhD thesis, Moscow, 2004, 118 p.

12. Kurgan D. N. *K resheniiu zadach rascheta puti na prochnost' s uchetom neravnouprugo-sti podrel'sovogo osnovaniia* (To solving problems of calculating the path to strength with allowance for the non-equal-elasticity of the under-rail base) <https://cyberleninka.ru/article/n/k-resheniyu-zadach-rascheta-puti-na-prochnost-s-uchetom-neravnouprugosti-podrelsovogo-osnovaniya>

13. Bolotin V. V. *Sluchainye kolebaniia uprugikh sistem* (Random oscillations of elastic systems). Moscow: Nauka, 1979, 336 p.

14. Chelomei V. N. *Vibratsii v tekhnike. Kolebaniia lineinykh sistem* (Vibration in engineering). Moscow: Mashinostroenie, 1978, 352 p.

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

### Николаев Виктор Александрович

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046, Российская Федерация.

Доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Теоретическая механика», ОмГУПС.

Тел.: +7 (3812) 37-60-82.

E-mail: NikolaevVA@omgups.ru

### Нехаев Виктор Алексеевич

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046, Российская Федерация.

Доктор технических наук, профессор кафедры «Теоретическая механика», ОмГУПС.

Тел.: +7 (3812) 37-60-82.

E-mail: NehaevVA@omgups.ru

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Нехаев, В. А. О парадигме математических моделей динамики подвижного состава и их устойчивости [Текст] / В. А. Нехаев, В. А. Николаев // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2017. – № 2 (30). – С. 42 – 54.

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

### Nikolaev Viktor Aleksandrivich

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx st., Omsk, 644046, the Russian Federation.

Doctor of Technical Sciences, Professor, leader of the department «Theoretical Mechanics», OSTU.

Phone: +7 (3812) 37-60-82.

E-mail: NikolaevVA@omgups.ru

### Nekhaev Viktor Alekseevich

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx st., Omsk, 644046, the Russian Federation.

Doctor of Technical Sciences, Professor of the department «Theoretical Mechanics», OSTU.

Phone: +7 (3812) 37-60-82.

E-mail: NehaevVA@omgups.ru

## BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Nehaev V. A, Nikolaev V. A. On the paradigm of mathematical models of rolling stock dynamics and stability of them Journal of Transsib Railway Studies, 2017, vol. 30, no. 2, pp. 42 – 54 (In Russian).

УДК 629.423.31; 629.4.01

## В. В. Харламов, Д. И. Попов, А. И. Стретенцев

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС), г. Омск, Российская Федерация,

## РАЗРАБОТКА ЦИФРОВОГО ПРИБОРА КОНТРОЛЯ КОММУТАЦИИ ТЯГОВЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ ПОДВИЖНОГО СОСТАВА

**Аннотация.** В статье сформулированы основные требования к цифровому прибору контроля коммутации тяговых электродвигателей подвижного состава и приведены результаты разработки и апробирования данного устройства на испытательном стенде. Обоснована целесообразность применения входного фильтра верхних частот при питании испытуемого тягового двигателя от тиристорного преобразователя. Описана методика обработки диагностического сигнала с разнополярных щеток с целью фильтрации помех различной физической природы.

**Ключевые слова:** коммутация, тяговый электродвигатель, подвижной состав, диагностирование, разнополярные щетки, микроконтроллер, обработка сигнала.

**Victor V. Kharlamov, Denis I. Popov, Andrey I. Stretentsev**  
Omsk State Transport University (OSTU), Omsk, the Russian Federation

## DEVELOPMENT OF RAILWAY TRACTION MOTORS COMMUTATION CONTROL DIGITAL DEVICE

**Abstract.** The article presents the main requirements for the development of traction motors commutation control digital device and the results of the development and testing of this device on the test bench. Justified the expediency of application of the input highpass filter when the power of the testing traction engine from the thyristor converter. Presented the technique of processing the diagnostic signal from bipolar brushes to filter out noise of different physical nature.

**Keywords:** commutation, traction motor, rolling stock, diagnosis, bipolar brush, microcontroller, signal processing.

В процессе диагностирования тяговых электродвигателей (ТЭД) подвижного состава железных дорог важной проблемой является потеря информации, связанной с обработкой диагностического сигнала. Как правило, исходный диагностический сигнал подвергается нескольким ступеням обработки. При этом на каждой ступени обработки сигнал претерпевает искажения, связанные с особенностями работы элементов электронных схем.

Не менее важным вопросом является способ фильтрации сигнала от помех различного рода, обусловленных внешними магнитными полями, генерацией помех самой электронной схемой, которая его обрабатывает, а также формой напряжения питания испытуемого ТЭД. При этом, как правило, при деповских испытаниях ТЭД используются тиристорные источники питания, вносящие значительные помехи.

Таким образом, решение задачи уменьшения количества ступеней преобразования сигнала и рационального подбора способа и алгоритмов его обработки позволит повысить достоверность диагностирования ТЭД.

Решения поставленной задачи можно добиться путем применения в известном приборе контроля коммутации (ПКК) [1] системы, позволяющей произвести оцифровку диагностического сигнала и его последующую математическую обработку наиболее приемлемым способом.

Для целей цифровой обработки сигналов в зависимости от требований, предъявляемых к устройству, в большинстве случаев применяют либо стационарные персональные ЭВМ, либо встраиваемые системы и микроконтроллеры. К недостаткам систем, построенных на базе микроконтроллеров, можно отнести низкую производительность по сравнению с персональными компьютерами (ПК). Этот недостаток компенсируется мобильностью и низким энергопотреблением таких систем. Выбор в пользу мобильности позволит производить диагностирование тяговых электродвигателей непосредственно в эксплуатации, что значительно ускоряет процесс постановки диагноза. Кроме того, современные микроконтроллеры обладают достаточной производительностью для решения широкого спектра задач цифровой обработки сигналов.

Наличие встроенного в микроконтроллер аналого-цифрового преобразователя (АЦП) упрощает задачу разработки прибора контроля коммутации, так как не требуется интерфейс взаимодействия между микроконтроллером и АЦП, а следовательно, нет необходимости заниматься его разводкой на плате.

При выборе частоты дискретизации АЦП нужно задаться приемлемым количеством измерений на минимально значимом по длительности импульсе искрения. Длительность импульсов напряжения дуговых разрядов тяговых электрических машин варьируется в преде-

лах от единиц до сотен микросекунд [2]. При регистрации импульса в 1 мкс зададимся десятью измерениями. При таких параметрах период дискретизации должен составлять 100 нс.

Следующим немаловажным критерием выбора микроконтроллера является его возможность цифровой обработки сигналов. Здесь следует отдать предпочтение микроконтроллерам со специальным набором инструкций, который содержит типовые операции, используемые при обработке массивов оцифрованных значений аналогового сигнала. Скорость математических расчетов зависит также от наличия аппаратной поддержки вычислений чисел с плавающей запятой, поэтому приоритетными являются устройства с поддержкой набора операций над числами с плавающей запятой и 32-разрядной архитектурой.

В целях статистической обработки необходимо хранить и обрабатывать одновременно выборку сигнала за несколько оборотов якоря, поэтому нужно иметь достаточный для этого объем оперативной памяти. Чтобы определить объем оперативной памяти, необходимой для хранения выборки сигнала, нужно знать продолжительность измерения и разрядность АЦП. Частота вращения тяговых электродвигателей в часовом режиме составляет порядка 700 – 800 об/мин. Например, для хранения выборки четырех оборотов в часовом режиме при разрядности АЦП 12 бит и частоте дискретизации 10 МГц потребуется 6,8 Мбайт оперативной памяти. Скорость обработки крупных массивов данных во многом зависит от скорости обмена информацией между АЦП, оперативной памятью и процессором, поэтому предпочтительны микроконтроллеры с наличием встроенного контроллера прямого доступа к памяти.

Автономность устройства подразумевает наличие в его составе помимо собственного источника питания средств ввода-вывода информации, а также энергонезависимого запоминающего устройства для сохранения результатов диагностирования. В качестве внешнего энергонезависимого накопителя информации предпочтительнее использовать SD-карты, которые имеют большой объем памяти и собственный контроллер памяти при малых габаритах самой карты, а также могут быть легко извлечены из устройства для передачи данных на ПК.

Для того чтобы использовать прибор при контроле коммутации ТЭД без дополнительных инструментов, таких как осциллограф, важно предусмотреть возможность отображения графической информации об оцифрованном сигнале, поэтому микроконтроллер должен иметь интерфейс связи с контроллером графического дисплея. В лучшем случае микроконтроллер должен иметь встроенный контроллер графического дисплея, что позволяет упростить разработку печатной платы и сократить количество элементов в схеме. Ввод управляющей информации можно организовать, задействовав готовый дисплейный модуль с сенсорной панелью. В таком случае достигается максимальная эргономичность и компактность прибора за счет сокращения площади панели управления до размеров дисплейного модуля.

В итоге добавлены следующие требования к микроконтроллеру для цифрового прибора контроля коммутации (МПКК) ТЭД: наличие интерфейса взаимодействия с SD-картами; наличие интерфейса взаимодействия с контроллером графического дисплея (либо наличие встроенного контроллера графического дисплея); наличие периферийных последовательных интерфейсов (SPI, I2C) для взаимодействия с контроллером сенсорной панели; наличие USB-интерфейса для связи с ПК.

На основании описанных требований был выбран микроконтроллер STM32F746NG фирмы STMicroelectronics. Краткое описание технических характеристик выбранного микроконтроллера [3]:

32-разрядный процессор Cortex-M7 с поддержкой однократных операций над числами с плавающей запятой одинарной точности, набором команд для цифровой обработки сигналов (ЦОС) и максимальной тактовой частотой 216 МГц;

1 Мбайт Flash памяти программ, 320 кбайт статической оперативной памяти;

контроллер графического дисплея стандарта XGA со встроенным контроллером прямого доступа к памяти;

32-битный контроллер внешней оперативной памяти;  
три 12-разрядных АЦП с максимальной частотой дискретизации 7,2 МГц (10 МГц при разрядности 8 бит);  
два 8-канальных контроллера прямого доступа к памяти;  
интерфейсы: I2C – 4 шт., УСАПП – 4 шт., SPI – 6 шт., SDMMC, HDMI, USB 2.0 HS, USB 2.0 FS и др.

Максимальная частота дискретизации АЦП, как указано в документации, менее 10 МГц, но благодаря системе делителей тактовой частоты микроконтроллера есть возможность запустить АЦП при повышенной частоте дискретизации, но с меньшим разрешением – 8 бит.

Дополнительным преимуществом в выборе микроконтроллера стало наличие большого количества демонстрационных отладочных плат для микроконтроллеров фирмы STMicroelectronics, а в частности, для выбранного STM32F746NG. Отладочная плата STM32F746G-DISCO содержит в своем составе дисплейный модуль с емкостной сенсорной панелью и микросхему синхронной динамической оперативной памяти объемом 8 Мбайт [3].

При большом объеме испытаний тяговых электродвигателей подвижного состава оценку состояния коммутации целесообразно осуществлять по сигналу с разнополярных щеток. Данный метод измерений прост, эффективен в условиях массового производства, не требует каких-либо первичных преобразователей и позволяет осуществлять оценку интенсивности искрения отдельно от пере- и недокоммутированных секций якорной обмотки испытуемой машины [4].

Однако сигнал с разнополярных щеток содержит не только импульсы напряжения дуговых разрядов, но и другие составляющие, которые не несут полезной информации о процессе коммутации. Во-первых, высоковольтная постоянная составляющая напряжения питания, попадание которой на измерительную схему может привести к выходу последней из строя. Во-вторых, если питание электродвигателя осуществляется от тиристорного преобразователя (ТП), то переменная составляющая сигнала содержит импульсные помехи с частотой 300 Гц, амплитуда которых в несколько раз выше амплитуды импульсов напряжения дуговых разрядов. В-третьих, наличие низкочастотных оборотных, полюсных и зубцовых пульсаций напряжения [2].

Постоянную составляющую напряжения питания можно исключить с помощью разделительного конденсатора. Период импульсных помех тиристорного преобразователя  $T_2$  является бóльшим по сравнению с периодом импульсов дуговых разрядов  $T_1$ , поэтому можно предположить, что такую помеху можно ослабить путем цифровой фильтрации сигнала. Однако в случае оцифровки сигнала с тиристорными импульсами число квантов АЦП  $n_1$ , приходящихся на импульс дугового разряда, оказывается значительно меньшим, чем число квантов  $n_2$ , приходящихся на тиристорный импульс (рисунок 1, а). И после цифровой фильтрации размах сигнала  $n'$  оказывается в значительно меньшем диапазоне значений, чем полный диапазон АЦП  $N$  (рисунок 1, б), т. е. теряется достаточно большой объем диагностической информации. Чтобы минимизировать потери информации при ЦОС, нужно уравнивать напряжения тиристорных и дуговых импульсов до оцифровки сигнала, применив аналоговый фильтр верхних частот (ФВЧ).

Таким образом, для разрабатываемого прибора реализован активный фильтр верхних частот второго порядка по схеме фильтра Чебышева. Частота среза фильтра  $f_c$  выбрана равной 700 Гц по методике, предложенной в монографии [2, с. 107 – 113]. Такая частота среза обеспечивает затухание низкочастотных пульсаций и помех ТП, но при этом не оказывает значительного влияния на импульсы напряжения дуговых разрядов. Амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) фильтра представлена на рисунке 2.

Уровень высокочастотных помех, находящихся в области выше частоты Найквиста (5 МГц), является достаточно низким по сравнению с полезным сигналом, поэтому этими помехами можно пренебречь.

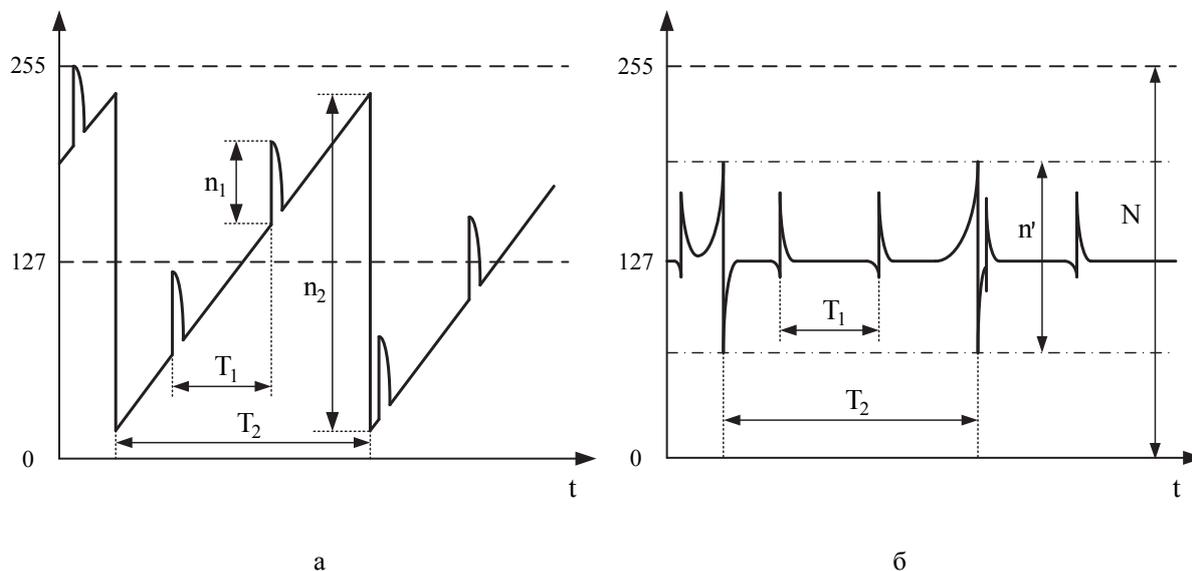


Рисунок 1 – Оцифрованный сигнал: а – без обработки; б – после цифрового фильтра верхних частот

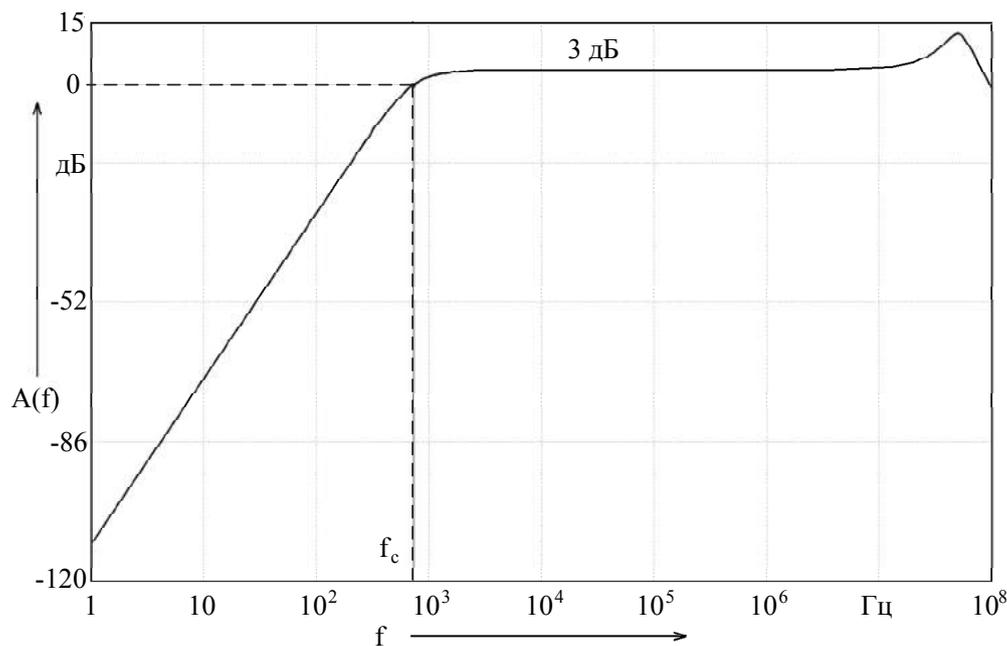


Рисунок 2 – Амплитудно-частотная характеристика ФВЧ второго порядка

Блок-схема разработанного устройства МПКК представлена на рисунке 3.

Сигнал от разнополярных щеток поступает на входное устройство (ВУ), которое представляет собой два разделительных конденсатора и резистивный делитель напряжения. Переменная составляющая сигнала через ФВЧ попадает на масштабирующее устройство (МУ), предназначенное для смещения нулевой точки сигнала и приведения его к диапазону АЦП от 0 до 3 В. Сигнал оцифровывается при частоте дискретизации 10 МГц и разрядности 8 бит и сохраняется в синхронной динамической оперативной памяти (СДОЗУ) до момента обработки. После ввода параметров обработки сигнала и подачи соответствующей управляющей

команды с помощью сенсорной панели сохраненная выборка обрабатывается микроконтроллером. Результат обработки выводится на дисплей и может быть сохранен на  $\mu$ SD-карте или передан на ПК через USB-порт. Блок питания (БП) преобразует напряжение двух аккумуляторных батарей и осуществляет питание всего устройства.

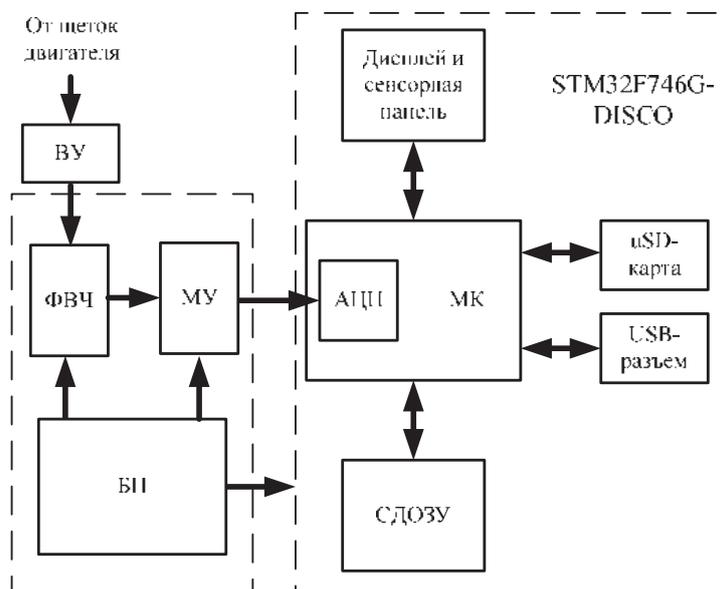


Рисунок 3 – Блок-схема МПКК

Качество коммутации определяет надежность коллекторно-щеточного узла, следовательно, и оценка искрения должна быть связана с надежностью его работы. При этом диагностический сигнал должен иметь функциональную связь с процессами износа щеток и коллектора, а параметры сигнала должны достаточно просто измеряться в процессе испытаний ТЭД.

Оценка качества коммутации, определяемая интенсивностью износа контактной пары, как и любая диагностическая задача, должна осуществляться путем измерения параметра, характеризующего исследуемый процесс, и сравнения его с эталонным значением. Износ контактной пары зависит от количества электричества, прошедшего через дугу [5]:

$$Q_d = \int_0^{\tau_d} i_p dt; \quad (1)$$

$$i_p = \frac{1}{L_p} \int_0^{\tau_d} U_d dt. \quad (2)$$

где  $i_p$  – ток разрыва коммутируемой секции, А;

$\tau_d$  – длительность импульса дугового разряда, с;

$L_p$  – индуктивность коммутируемой секции, Гн;

$U_d$  – напряжение импульса дугового разряда, В.

С учетом того, что ток в дуге спадает до нуля по линейному закону, значение, полученное путем интегрирования выражений (1) и (2), прямо пропорционально количеству электричества  $Q_d$ , прошедшему при дуговом разряде через контактную пару «щетка – коллектор» [2, 6]:

$$Q_d = \frac{U_d \tau_d^2}{2L_p}, \quad (3)$$

где  $U_d$  – среднее значение напряжения импульса дугового разряда, В.

Поэтому для определения интенсивности импульсов дуговых разрядов при ЦОС достаточно просто реализуется расчет площади под кривой напряжения импульса. При этом учитывается не только длительность импульсов  $\tau_d$ , но и их напряжение  $U_d$ .

Разработанный прибор МПКК применен для оценки состояния коммутации двигателя постоянного тока ПЗ1М, входящего в состав экспериментального стенда для испытания электрических машин методом взаимной нагрузки.

На рисунке 4 представлен участок оцифрованного массива, на котором отмечены один период импульсов дуговых разрядов  $T$  и длительность  $\tau_1$  и  $\tau_2$  двух соседних импульсов дуговых разрядов при питании машины от генератора постоянного тока и частоте вращения 3049 об/мин.

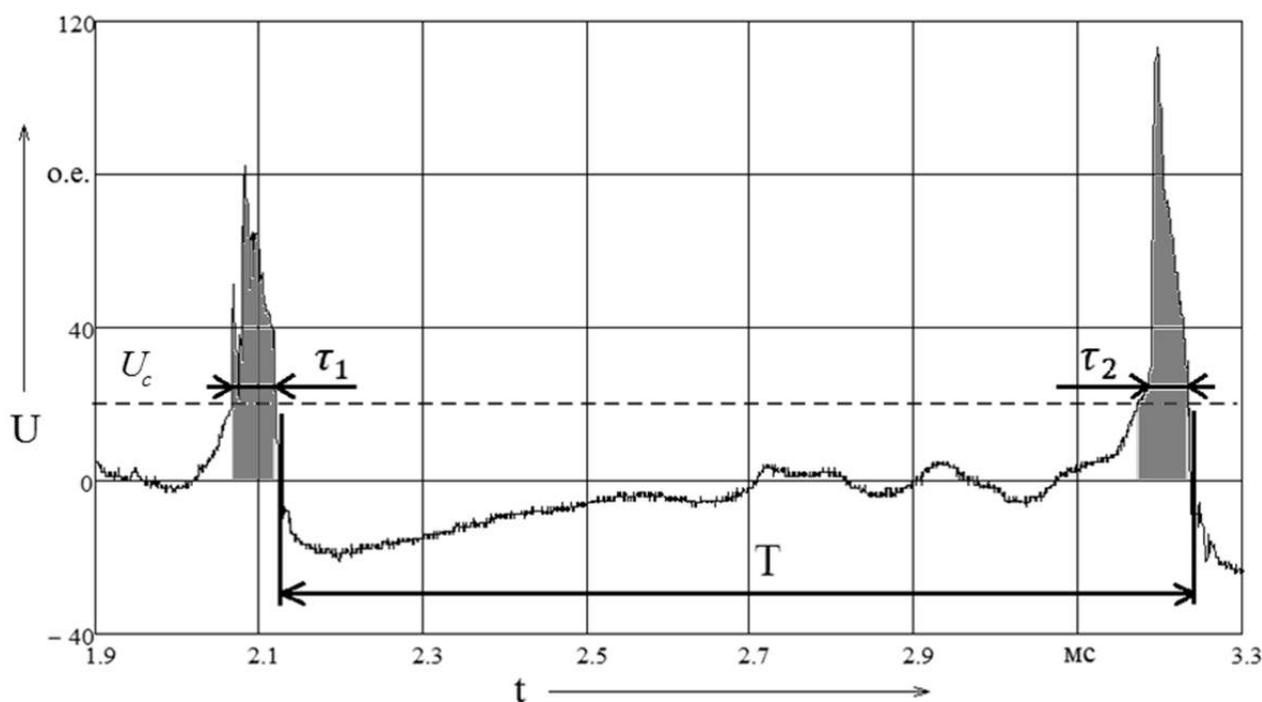


Рисунок 4 – Сигнал с разнополярных щеток испытуемого двигателя при питании от генератора постоянного тока

Кроме импульсов дуговых разрядов в сигнале присутствуют высокочастотные помехи. Отфильтровать такие помехи с помощью фильтра нижних частот не представляется возможным, так как диапазон частот этих помех пересекается с диапазоном частот импульсов дуговых разрядов. Для исключения данных помех из диагностического сигнала используют такой параметр, как напряжение селекции  $U_c$ , с которым сравнивается текущее значение сигнала. Если текущее значение ниже напряжения селекции, то оно не учитывается при подсчете результата. Напряжение селекции зависит от типа испытуемой машины и задается оператором во время калибровки прибора. На рисунке 4 заливкой выделена площадь, которая будет учитываться при данном уровне  $U_c$ . Таким образом, интенсивность искрения щеток  $A_k$   $k$ -го оборота двигателя, определяемая количеством электричества  $Q$ , рассчитывается по формуле:

$$A_k = N \cdot \sum_{i=0}^N x_i, \quad (4)$$

где  $x_i$  – значение  $i$ -го отсчета выборки  $k$ -го оборота, удовлетворяющее условию  $x_i > U_c$ ;

$N$  – количество отсчетов  $x_i$  за  $k$ -й оборот.

После расчета интенсивности  $A_k$  для каждого оборота остается только получить среднее арифметическое полученных значений  $\bar{A}$ , которое показывает среднюю интенсивность искрения по коллектору:

$$\bar{A} = \frac{1}{M} \sum_{k=0}^M A_k, \quad (5)$$

где  $M$  – число оборотов в общей выборке.

Питание диагностируемого тягового электродвигателя от ТП требует внесения корректив в алгоритм работы прибора контроля коммутации, так как импульсы ТП оказываются выше напряжения селекции и могут быть ошибочно учтены при подсчете результата как импульсы дуговых разрядов.

На рисунке 5 представлен участок оцифрованного массива при питании испытуемой машины от ТП и частоте вращения 3012 об/мин. На графике обозначены  $\tau_{mn1}$  и  $\tau_{mn2}$  – длительность двух соседних импульсов тиристорной помехи,  $T_{mn}$  – период импульсов тиристорного преобразователя. Из рисунка видно, что импульсы тиристорной помехи имеют большую длительность и амплитуду, чем импульсы напряжения дуговых разрядов. Этим можно воспользоваться для разработки методики исключения влияния тиристорной помехи на результат диагностирования.

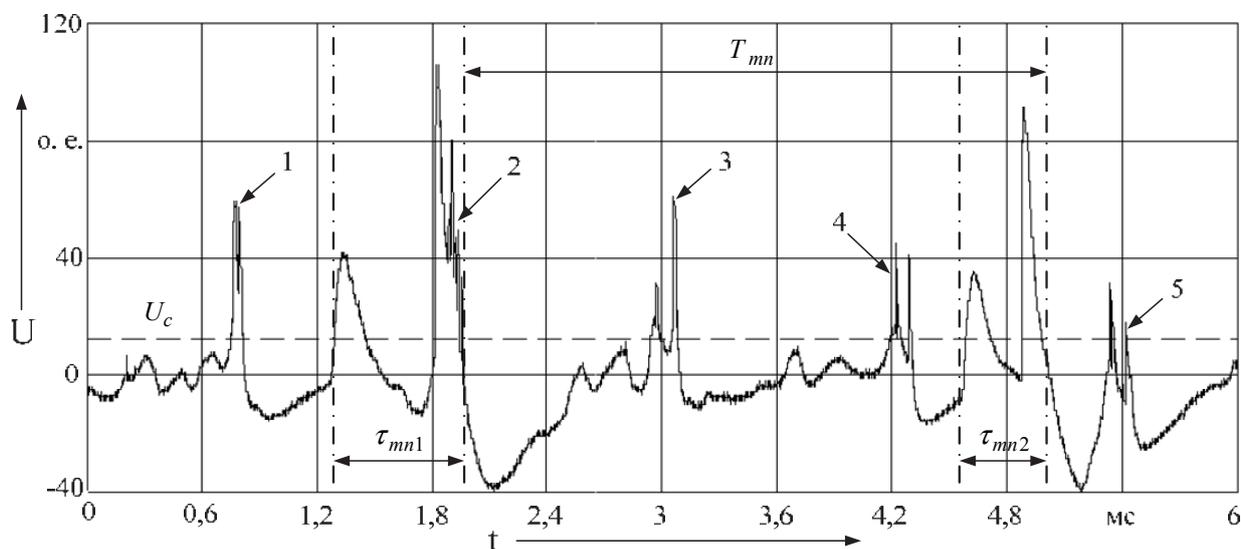


Рисунок 5 – Сигнал с разнополярных щеток испытуемого двигателя при питании от тиристорного преобразователя

Зная период следования импульсной помехи, можно определить ее фазу путем умножения исходной выборки на прямоугольную оконную функцию единичной амплитуды. Сдвигая оконную функцию от начала до конца периода  $T_{mn}$  с шагом, равным одному отсчету, нужно суммировать значения отсчетов, попавших в окно, и сохранять суммы для каждого шага окна:

$$S_i = \sum_{j=0}^{\tau_0} x_{i+j} \quad \text{при } i = \frac{\tau_0}{2}, \frac{\tau_0}{2} + 1, \frac{\tau_0}{2} + 2, \dots, T_{\text{ТП}} + \frac{\tau_0}{2}, \quad (6)$$

где  $x_{i+j}$  –  $i+j$  отсчет выборки;

$\tau_0$  – ширина окна, с.

После этого необходимо сравнить полученные суммы  $S_i$  и выявить наибольшую, индекс которой и будет указывать на местонахождение импульса помехи в периоде  $T_{mn}$ . Для увеличения точности можно находить сумму сразу для нескольких периодов импульсов помехи.

Следует обратить внимание на то, что длительность тиристорной помехи может колебаться от периода к периоду ( $\tau_{mn1} \neq \tau_{mn2}$ ). После проведения измерений была установлена средняя длительность импульса тиристорного преобразователя, равная 800 мкс. При подсчете интенсивности искрения эти участки должны исключаться в каждом периоде  $T_{mn}$ , из-за чего попавшие на данный участок импульсы дуговых разрядов не будут учтены. Это вносит некоторую погрешность в результат. На рисунке 5 импульсы под номерами 1, 3 и 4 будут учтены при подсчете интенсивности искрения, а импульс под номером 2, который совпал с тиристорной помехой, не будет учтен. Импульс под номером 5 значительно смещен относительно нулевого потенциала, поэтому при суммировании не вся его площадь попадет в результат.

Представленный метод измерения интенсивности искрения при питании электродвигателя от ТП имеет два недостатка:

- 1) не учитываются импульсы дуговых разрядов, совпавшие с импульсами тиристорного преобразователя;
- 2) площадь импульсов дуговых разрядов, смещенных относительно нулевого потенциала, учитывается некорректно.

Однако данные недостатки не связаны с применением цифровой обработки сигнала, а присущи также и устройствам с аналоговой обработкой сигнала.

При частоте следования импульсов дуговых разрядов, кратной частоте следования импульсов ТП, погрешность, связанная с первым недостатком, зависит от сдвига фазы импульсов дуговых разрядов относительно импульсов ТП. Устранение данной погрешности возможно при таком рассогласовании частоты ТП  $f_{mn}$  и частоты вращения якоря  $n/60$ , когда за время оцифровки сигнала  $T$  фазовый сдвиг между импульсами ТП и импульсами искрения изменяется на величину периода следования импульсов искрения  $T_d$ , т. е. выполняется условие [7]

$$\left| 1 - \frac{n}{n'} \right| \cdot T = T_d, \quad (7)$$

где  $n'$  – требуемая частота вращения, об/мин;

$n$  – текущая частота вращения, об/мин.

Следует отметить, что при аналоговой обработке сигнала для исключения влияния тиристорной помехи на результат диагностирования, как правило, применяют опорный сигнал напряжения из сети, что приводит к увеличению подключаемых кабелей и усложнению схемы испытаний, усложнению монтажных и отладочных работ и увеличению количества преобразователей сигнала в составе ПКК. Следовательно, применение ЦОС позволяет избавиться от всех указанных недостатков.

Таким образом, применение прибора контроля коммутации на базе микроконтроллера с ЦОС позволяет получить следующие практически значимые результаты:

повысить достоверность диагностирования состояния коммутации тяговых двигателей постоянного тока за счет уменьшения количества аналоговых преобразований диагностического сигнала и более точного учета количества электричества, прошедшего при дуговых разрядах между щеткой и коллектором;

повысить мобильность и эргономичность диагностического устройства;

упростить работу оператора по настройке, калибровке и проведению диагностических операций.

Представленный в данной работе подход может быть применен для определения параметров разрабатываемого прибора контроля коммутации тяговых двигателей электровозов подвижного состава.

## Список литературы

1. Харламов, В. В. Диагностирование состояния коммутации коллекторных электродвигателей с использованием прибора ПКК-5М [Текст] / В. В. Харламов, П. К. Шкодун, А. П. Афонин // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2011. – № 3 (7). – С. 52 – 57.

2. Харламов, В. В. Методы и средства диагностирования технического состояния коллекторно-щеточного узла тяговых электродвигателей и других коллекторных машин постоянного тока: Монография [Текст] / В. В. Харламов. – Омск, 2002. – 233 с.

3. STM32F746NG - High-performance and DSP with FPU, ARM Cortex-M7 MCU with 1 Mbyte Flash, 216 MHz CPU, Art Accelerator, L1 cache, SDRAM, TFT - STMicroelectronics [Электронный ресурс]. Режим доступа: [http://www.st.com/content/st\\_com/en/products/microcontrollers/stm32-32-bit-arm-cortex-mcus/stm32f7-series/stm32f7x6/stm32f746ng.html](http://www.st.com/content/st_com/en/products/microcontrollers/stm32-32-bit-arm-cortex-mcus/stm32f7-series/stm32f7x6/stm32f746ng.html)

4. Карасев, М. Ф. Оценка искрения и контроль качества коллекторов электрических машин [Текст] / М. Ф. Карасев, В. П. Суворов / Известия вузов. Электромеханика. – 1962. – № 7. – С. 818 – 823.

5. Хольм Р. Электрические контакты [Текст] / Р. Хольм. – М.: Иностранная литература, 1961. – 464 с.

6. Стрельбицкий, Э. К. Износ коллекторов машин постоянного тока коммутационным искрением и расчет долговечности коллекторов [Текст] / Э. К. Стрельбицкий, В. С. Стукач, А. Я. Цирулик // Известия Томского ордена Трудового Красного Знамени политехн. ин-та им. С. М. Кирова / Томский политехн. ин-т. – Томск, 1970. – С. 111 – 115.

7. Харламов, В. В. Оценка качества работы коллекторно-щеточного узла машин постоянного тока инструментальными методами [Текст] / В. В. Харламов: Дис... канд. техн. наук: 05.09.01. – Томск, 1990. – 254 с.

## References

1. Kharlamov V. V., Shkodun P. K., Afonin A. P. Application device PKK-5M for commutation condition diagnostic of dc motors (Diagnostirovanie sostoiania kommutacii kollektornikh elektrodvigateli s ispolzovaniem pribora PKK-5M). *Izvestiia Transsiba – The journal of Transsib Railway Studies*, 2011, no. 3 (7), pp. 52 – 57.

2. Kharlamov V. V. *Metodi i sredstva diagnostirovaniya tehnicheskogo sostoyania kollektornoschetochno uzla tyagovih electrodvigatalei i drugih kollektornyh mashin postoyannogo toka: monografiya* (Methods and means for diagnosing the technical condition of the traction motors collector-brush assembly and other collector DC machines: monograph). Omsk: OSTU, 2002, 233 p.

3. STM32F746NG – High-performance and DSP with FPU, ARM Cortex-M7 MCU with 1 Mbyte Flash, 216 MHz CPU, Art Accelerator, L1 cache, SDRAM, TFT – STMicroelectronics. Access mode: [http://www.st.com/content/st\\_com/en/products/microcontrollers/stm32-32-bit-arm-cortex-mcus/stm32f7-series/stm32f7x6/stm32f746ng.html](http://www.st.com/content/st_com/en/products/microcontrollers/stm32-32-bit-arm-cortex-mcus/stm32f7-series/stm32f7x6/stm32f746ng.html)

4. Karasev M. F., Suvorov V. P. Sparking evaluation and electrical machines commutators quality control (Ocenka iskreniya i control kachestva kollektorov elektricheskikh mashin). *Izvestia vuzov. Elektromekhanika – Izvestiya Vuzov. Electromechanics*, 1962, no. 7, pp. 818 – 823.

5. Holm R. *Electric contacts* (Elektricheskie kontakty). Moscow: Foreign literature, 1961, 464 p.

6. Strelbitski E. K., Stukach V. S., Tsirulik A. I. Sparking wear of DC machines commutator and commutator durability computation (Iznos kollektorov mashin postoiannogo toka kommutatsionnym iskreniem I raschet dolgovechnosti kollektorov). *Izvestia Tomskogo ordena trudovogo krasnogo znameni politehnicheskogo instituta imeni S. M. Kirova – Proceedings of the Tomsk Order of the Red Banner Institute*. Tomsk, 1970, 211, pp.111 – 115.

7. Kharlamov V. V. *Otsenka kachestva raboty kollektorno-shetochnogo uzla mashin postoiannogo toka instrumentalnymi metodami* (Evaluation of DC machines commutator work quality by instrumental methods). PhD thesis, Tomsk, 1990, 254 p.

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

### **Харламов Виктор Васильевич**

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046, Российская Федерация.

Доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Электрические машины и общая электротехника» ОмГУПС.

E-mail: emoe@omgups.ru

### **Попов Денис Игоревич**

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046, Российская Федерация.

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Электрические машины и общая электротехника» ОмГУПС.

E-mail: Popovomsk@yandex.ru

### **Стретенцев Андрей Игоревич**

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046, Российская Федерация.

Аспирант кафедры «Электрические машины и общая электротехника» ОмГУПС.

E-mail: utes.gorniy@yandex.ru

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Харламов, В. В. Разработка цифрового прибора контроля коммутации тяговых электродвигателей подвижного состава [Текст] / В. В. Харламов, Д. И. Попов, А. И. Стретенцев // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2017. – № 2 (30). – С. 52 – 64.

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

### **Kharlamov Victor Vasilyevich**

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx st., Omsk, 644046, the Russian Federation.

Doctor of technical science, professor, the head of department «Electrical machines and general electrical engineering» OSTU.

E-mail: emoe@omgups.ru

### **Popov Denis Igorevich**

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx st., Omsk, 644046, the Russian Federation.

PhD, associate professor of the department «Electrical machines and general electrical engineering» OSTU.

E-mail: Popovomsk@yandex.ru

### **Stretentsev Andrey Igorevich**

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx st., Omsk, 644046, the Russian Federation.

Postgraduate of the department «Electrical machines and general electrical engineering» OSTU.

E-mail: utes.gorniy@yandex.ru

## BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Kharlamov V. V., Popov D. I., Stretentsev A. I. Development of traction motors commutation control digital device. *Journal of Transsib Railway Studies*, 2017, vol. 30, no. 2, pp. 52 – 64. (In Russian).

УДК 629.4.077-592-52(07):656.2.08(07)

**А. П. Шатохин, Н. В. Есин**

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС), г. Омск, Российская Федерация

## **ПОВЫШЕНИЕ БЕЗОПАСНОСТИ ДВИЖЕНИЯ ГРУЗОВЫХ ЭЛЕКТРОВОЗОВ ЗА СЧЕТ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ПОРЯДКА ПРОВЕРКИ ЦЕЛОСТНОСТИ ТОРМОЗНОЙ МАГИСТРАЛИ ПЕРЕД ОТПРАВЛЕНИЕМ НА УЧАСТОК СЛЕДОВАНИЯ**

***Аннотация.** В статье рассматривается вопрос, связанный с безопасностью движения, а именно проверка целостности тормозной магистрали грузового поезда перед отправлением. Приведены данные отчетности по отсутствию проверки целостности тормозной магистрали локомотивными бригадами. Приведена информация по усовершенствованию порядка проверки и по проведению его апробации. Внесены предложения по усовершенствованию приборов безопасности в части автоматизации проверки целостности тормозной магистрали.*

***Ключевые слова:** безопасность движения, целостность тормозной магистрали, локомотивные устройства безопасности, автоматические тормоза, грузовой электровоз.*

**Andrey P. Shatokhin, Nicholai V. Esin**

Omsk State Transport University (OSTU), Omsk, the Russian Federation

## **THE SAFETY'S INCREASE OF THE FREIGHT ELECTRIC LOCOMOTIVE'S TRAFFIC ON ACCOUNT OF THE IMPROVEMENT OF THE INTEGRITY'S VERIFICATION OF THE BRAKING HIGHWAY'S ORDER BEFORE THE DEPARTURE TO THE FOLLOWING SECTION**

***Abstract.** The article discusses a question, which is bonded with the traffic safety, namely the integrity's verification of the braking highway's of the freight train before the departure. There was given a range of reports in the absence of the braking highway's integrity's test by the locomotive crews. There was the verification's order developed and his testing done. There were made the suggestions for improvement of the safety devices in terms of automation of the integrity's verification of the braking highway.*

***Keywords:** the traffic safety, the braking highway's integrity, the locomotive safety devices, the automatic brake, the electric freight locomotive.*

В настоящее время перед отправлением грузового поезда локомотивная бригада обязана в соответствии с протоколом № 60 от 6 – 7 мая 2014 г. Совета по железнодорожному транспорту государств-участников Содружества проверить целостность тормозной магистрали для исключения отправления поезда на участок следования без тормозов. Часто между машинистом и его помощником не в полном объеме выполняется регламент переговоров «Минута готовности», что приводит к пропуску такого важного этапа, как проверка целостности тормозной магистрали.

Данное нарушение отчетливо видно после расшифровки скоростемерных лент и электронных носителей информации с комплексных локомотивных устройств безопасности и безопасных объединенных комплексов локомотивов (КЛУБ, БЛОК), внесенных в программу автоматизированных систем управления нарушений безопасности движения (АСУ НБД).

На рисунке 1 представлен отчет по расшифровке скоростемерных лент и электронных носителей информации о количестве случаев отсутствия проверки целостности тормозной магистрали перед отправлением грузового поезда на участок следования за период с 01.01.2015 по 31.12.2015 по различным депо железной дороги *N*.

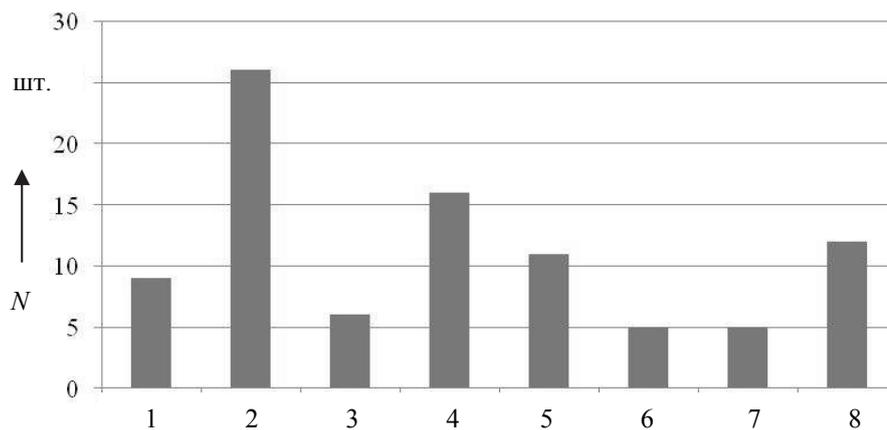


Рисунок 1 – Анализ по расшифровке скоростемерных лент и электронных носителей информации о количестве случаев отсутствия проверки целостности тормозной магистрали перед отправлением грузового поезда на участок следования

На рисунке 2 представлен отчет по расшифровке скоростемерных лент и электронных носителей информации о количестве случаев отсутствия проверки целостности тормозной магистрали перед отправлением грузового поезда на участок следования за период с 01.01.2015 по 31.12.2015 по месяцам одной из железных дорог нашей страны.

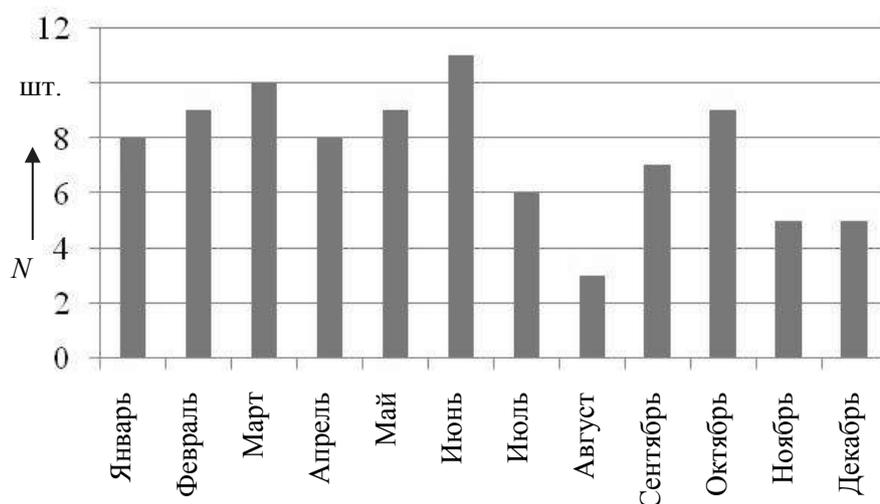


Рисунок 2 – Анализ по расшифровке скоростемерных лент и электронных носителей информации о количестве случаев отсутствия проверки целостности тормозной магистрали перед отправлением грузового поезда на участок следования за период с 01.01.2015 по 31.12.2015 по месяцам

Из анализа представленных данных видно, что за 2015 г. было зарегистрировано 114 случаев отправления грузового поезда на участок следования без проверки целостности тормозной магистрали, что могло послужить отправлению на участок поезда без тормозов и возможному крушению.

Аналогичная ситуация просматривается и в одном из депо железной дороги *P* (рисунки 3, 4).

Анализируя полученные данные, можно сделать вывод о том, что за последние пять лет в данном депо достигнуто значительное уменьшение количества подобных нарушений, но 124 случая, допущенные в 2016 г., говорят о том, что данная проблема остается актуальной и сегодня.

Правилами технического обслуживания тормозного оборудования и управления тормозами железнодорожного подвижного состава (далее – Правила) для предотвращения случаев

отправления поездов с укороченной по причине перекрытия разобшительных кранов или наличия ледяной или иной пробки из-за попадания посторонних предметов и материалов во время погрузки вагонов определен порядок выполнения проверки целостности тормозной магистрали перед отправлением поездов. Проверка целостности тормозной магистрали грузового поезда перед отправлением выполняется путем постановки управляющего органа крана машиниста в положение, обеспечивающее повышение давления в тормозной магистрали выше зарядного давления с выдержкой в этом положении 3 – 4 с.

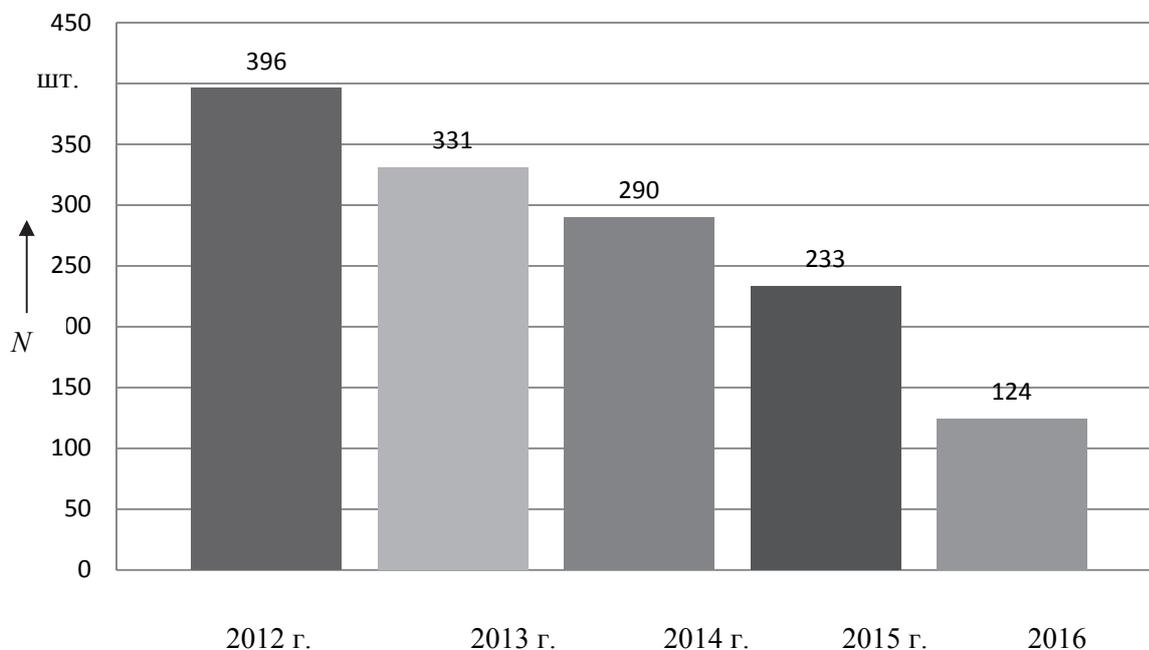


Рисунок 3 – Случаи отправления грузового поезда на участок следования без проверки целостности тормозной магистрали с 2012 по 2016 г. в депо железной дороги Р

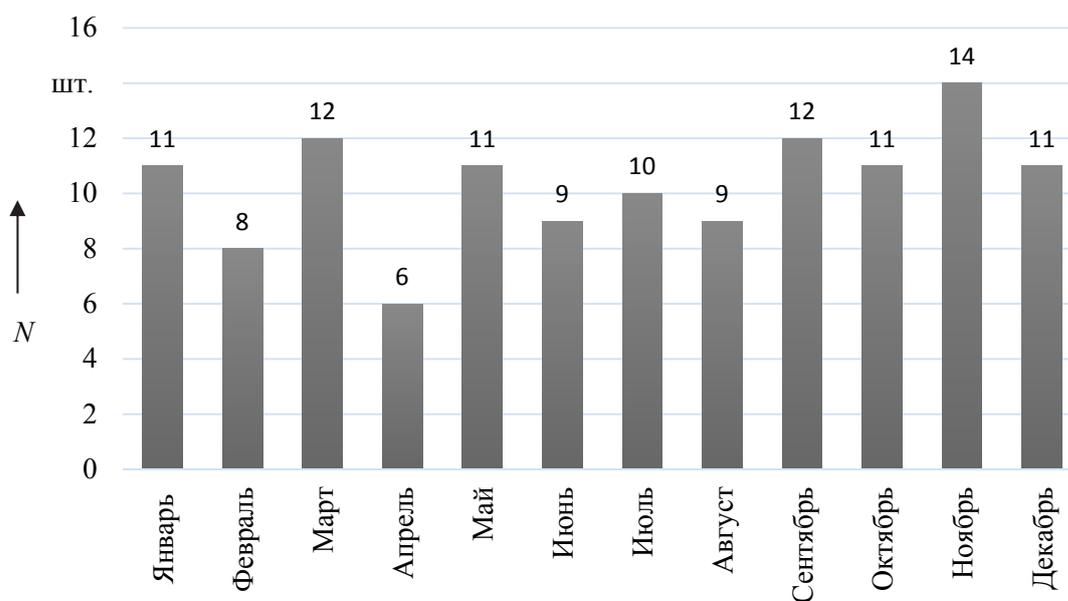


Рисунок 4 – Случаи отправления поезда без проверки целостности тормозной магистрали за 12 месяцев 2016 г. в депо железной дороги Р

Машинист осуществляет контроль за показаниями манометров тормозной и питательной магистрали. В случае, если разница показаний давлений тормозной и питательной магистрали составляет  $0,5 \text{ кгс/см}^2$  и более, тормозная магистраль поезда считается целостной.

Для поездов с локомотивами в голове наименьшее допустимое время снижения давления при проверке плотности тормозной магистрали в зависимости от длины состава и объема главных резервуаров локомотивов указано в таблице 1.

Таблица 1 – Время снижения давления на  $0,05 \text{ МПа}$  ( $0,5 \text{ кгс/см}^2$ ) в главных резервуарах при проверке плотности тормозной магистрали грузового поезда [1]

Общий объем главных резервуаров локомотива, л	Время, с, при длине состава в осях									
	до 100	101 – 150	151 – 200	201 – 250	251 – 300	301 – 350	351 – 400	401 – 450	451 – 480	481 – 530
1000	58	40	29	25	23	20	17	15	13	11
1200	69	46	34	29	25	22	20	18	15	13
1500	80	58	46	34	31	26	23	21	17	15
1800	98	69	52	46	38	33	29	26	22	20
2000	104	75	58	52	40	36	32	29	24	22
2500	129	93	71	64	51	45	40	36	30	28
3000	207	138	102	87	75	66	60	51	45	33

#### Примечания.

При проверке плотности тормозной магистрали грузового поезда при зарядном давлении  $0,52 - 0,54 \text{ МПа}$  ( $5,3 - 5,5 \text{ кгс/см}^2$ ) норму времени, указанную в таблице, уменьшить на 10 %.

При работе по системе многих единиц, когда главные резервуары локомотивов объединены в общий объем, указанное время увеличивать пропорционально изменению объемов главных резервуаров.

При общем объеме главных резервуаров локомотива, отличном от представленного в таблице, объем принимать по ближайшему наименьшему объему, приведенному в таблице.

На каждом локомотиве на видном месте должна быть выписка с указанием общего объема главных резервуаров.

Такой способ проверки целостности тормозной магистрали не является достаточно надежным и не дает гарантии целостности тормозной магистрали, так как величина завышения давления в тормозной магистрали может зависеть от многих факторов, таких как общий объем тормозной магистрали поезда, зависящий от количества вагонов в составе поезда, и давление в главных резервуарах локомотива на момент проверки.

Кроме того, расход воздуха из главных резервуаров при меньшем количестве осей будет меньше, а в тормозную магистраль – больше, при большем количестве осей расход из главных резервуаров больше и наполнение в тормозной магистрали меньше, то есть разница между давлениями питательной и тормозной магистралями будет всегда больше чем  $0,5 \text{ кгс/см}^2$  и не будет существенного различия при разном количестве осей, что дает ложное представление о целостности тормозной магистрали поезда.

Таким образом, установленный Правилами порядок не позволяет определить с точностью, удовлетворяющей требованиям безопасности движения поездов, количество включенных вагонов в поезде, а значит, и целостность тормозной магистрали.

Помимо установленного Правилами технического обслуживания тормозного оборудования и управления тормозами железнодорожного подвижного состава порядка существует также ряд признаков, обнаруженных опытным путем, на которые машинисту следует обращать внимание для контроля изменения длины тормозной магистрали:

- увеличение плотности тормозной сети поезда;
- увеличение времени между очередными включениями компрессоров;
- резкое увеличение интенсивности перемещения стрелки манометра тормозной магистрали при постановке управляющего органа крана машиниста в положение, обеспечивающее повышение давления в тормозной магистрали выше зарядного давления;
- продолжительный сброс воздуха через кран машиниста при переводе его ручки из отпущенного положения в поездное;

- уменьшение эффективности тормозов;
- короткий выпуск воздуха через кран машиниста при второй ступени торможения.

Данные признаки также имеют упущения. Так, Правилами технического обслуживания тормозного оборудования и управления тормозами железнодорожного подвижного состава установлен допустимый предел увеличения плотности тормозной сети поезда, который составляет 20 % от замеренной при полном опробовании тормозов и указанной в справке об обеспечении поезда тормозами и исправном их действии. Следовательно, создается вероятность того, что при незначительном изменении длины тормозной магистрали ее плотность останется в соответствии с требованиями Правил, что является недопустимым.

Признаки, связанные с контролем длины тормозной магистрали по сбросу и выпуску воздуха через отверстия в кране машиниста, частично утратили свою актуальность ввиду того, что к кабине управления локомотива предъявлены современные требования эргономики. Для уменьшения уровня шума в кабинах современных локомотивов располагается лишь контроллер крана машиниста, а исполнительная часть с блоком электропневматических приборов в шкафу за пределами кабины. По этой причине не всегда можно проконтролировать сброс воздуха.

Для подтверждения изложенного выше необходимо провести анализ данных расшифровки электронных носителей для различных серий локомотивов и поездов разной длины.

Для этого были отобраны файлы поездок машинистов депо железной дороги Р на электровазоне серий 2ЭС6 № X, №Y, ВЛ10 № X, ВЛ-10к № Y за апрель 2017 г. Выбранные серии электровазонов различаются между собой объемами главных резервуаров, конструкцией крана машиниста, типом и мощностью компрессорной установки.

В качестве примера приведем данные, полученные при расшифровке поездок на электровазоне серии 2ЭС6 № X (таблицах 2), а зависимость давлений от количества осей – на рисунке 5.

Таблица 2 – Данные о проверке целостности тормозной магистрали, полученные при расшифровке поездок на электровазоне 2ЭС6 № X за апрель 2017 года

Количество осей	Давление в УР, кгс/см <sup>2</sup>	Давление в ТМ, кгс/см <sup>2</sup>
64	5,52	6,24
124	5,68	6,28
160	5,48	6,28
164	5,32	6,00
200	5,48	6,04
256	5,44	5,96
280	5,28	5,88
324	5,4	5,72

Из представленного на рисунке 5 графика видно, что при различном количестве осей в составе поезда величина давления в тормозной магистрали в рассмотренных случаях всегда менее установленного нижнего предела давления главных резервуаров (ГР), который равен 7,5 кгс/см<sup>2</sup>, а разность нижнего предела давлений в главных резервуарах, обеспечиваемого работой компрессорной установки, и давления в тормозной магистрали всегда более 0,5 кгс/см<sup>2</sup>.

Следовательно, при исправной работе компрессорной установки показания манометров (с данными поездами) при проверке всегда будут в соответствии с Правилами в пределах нормы (рисунки 6, 7).

Таким образом, данный анализ подтверждает необходимость совершенствования порядка проверки целостности тормозной магистрали перед отправлением.

Кроме того, анализ файлов поездок также показывает, что нередко во избежание случаев срабатывания автотормозов поезда ввиду перезарядки тормозной магистрали грузового поезда машинисты выдерживают рукоятку управляющего органа крана машиниста в положе-

нии, обеспечивающем повышение давления в тормозной магистрали выше зарядного за меньшее установленное Правилами время, что приводит к искажению данных при проверке целостности тормозной магистрали. Для исключения таких случаев необходимо доработать существующий порядок и внести изменения в работу приборов безопасности КЛУБ, БЛОК. На сегодняшний день в данных приборах безопасности отсутствует возможность измерения и контроля давления в питательной магистрали, запрет на отправление поезда без проверки целостности тормозной магистрали поезда.

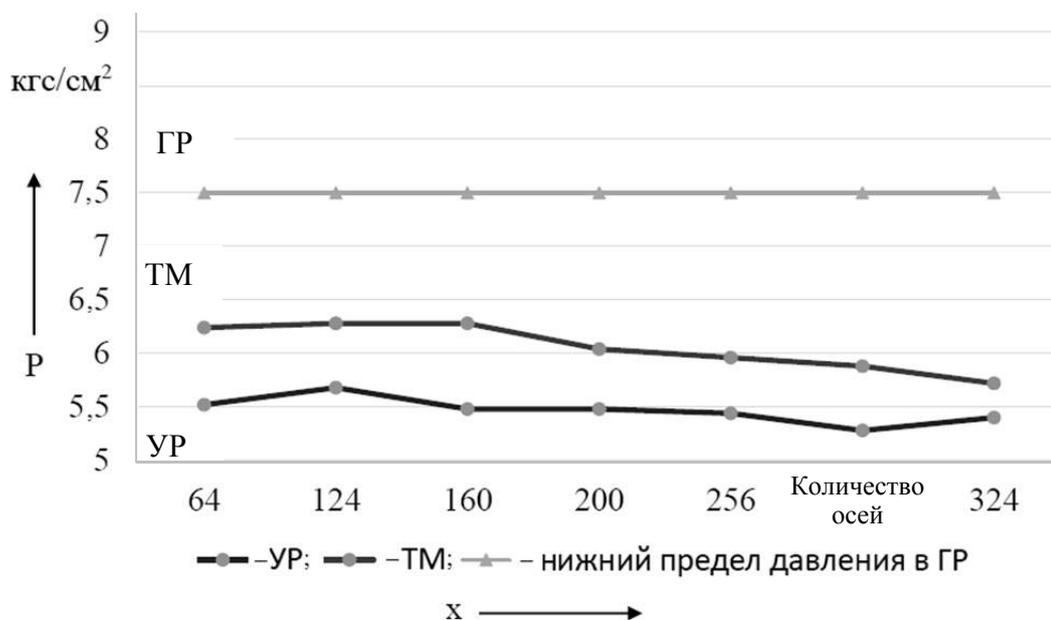
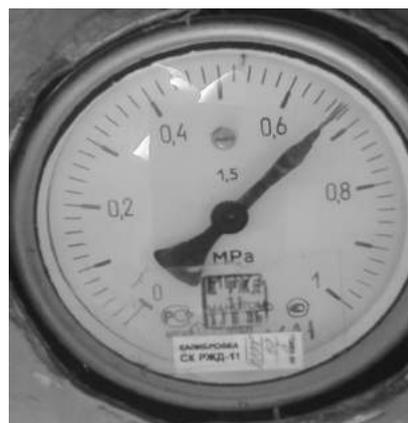


Рисунок 5 – График сравнения давления в уравнительном резервуаре (УР) и тормозной магистрали (ТМ) с нижним пределом давления в главных резервуарах (ГР) при постановке управляющего органа крана машиниста в положение, обеспечивающее повышение давления в тормозной магистрали выше зарядного для электровоза 2ЭС6 № X



а



б

Рисунок 6 – Давление при длинной тормозной магистрали в главных резервуарах (а) и в тормозной магистрали (б)

Для решения указанной проблемы можно доработать электронные приборы безопасности (КЛУБ, БЛОК) путем установки дополнительных датчиков давления в питательной маги-

страли и отправки цифровых сигналов в блоки. Тогда целостность тормозной магистрали и ее длину можно определить по разнице давлений  $\Delta P$  в тормозной и питательной магистралях (рисунок 8).

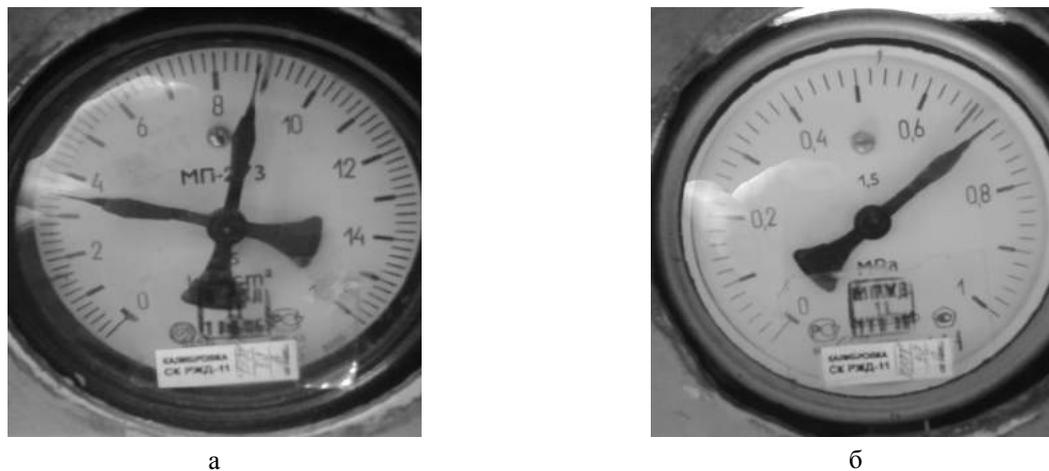


Рисунок 7 – Давление при короткой тормозной магистрали в главных резервуарах (а) и в тормозной магистрали (б)

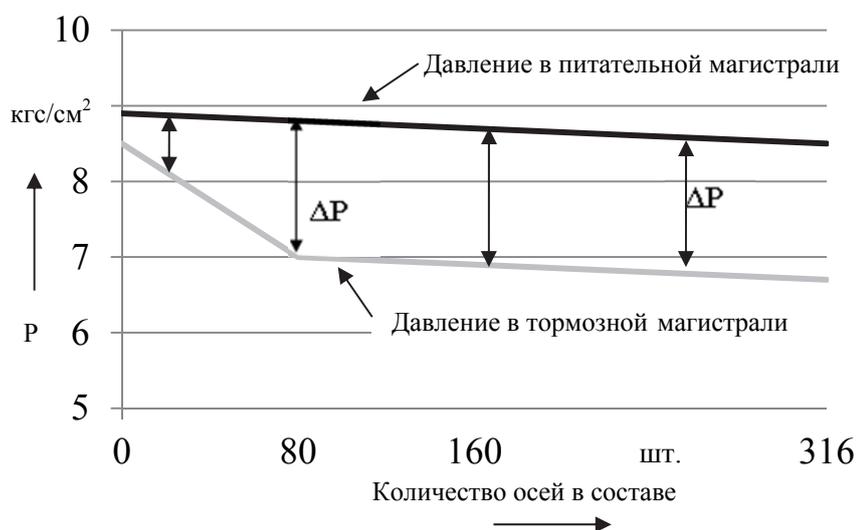


Рисунок 8 – График давления в тормозной и питательной магистралях при постановке ручки крана машиниста в первое положение

Для организации такой проверки требуются дополнительные денежные затраты на установку датчиков давления в питательную магистраль и передачи цифровых сигналов в электронные блоки помимо доработки алгоритма работы самих блоков.

Поэтому предлагается пойти вторым путем, а именно сравнением имеющихся цифровых сигналов тормозной магистрали и уравнильных резервуаров, что позволит определить длину магистрали, а при определенной доработке алгоритма работы электронных блоков давать запрет на отправление без проверки целостности магистрали. Использование уравнильных резервуаров удобно тем, что при постановке ручки крана машиниста в первое положение давление в уравнильном резервуаре не претерпевает больших изменений ввиду конструктивной особенности крана машиниста. Целостность тормозной магистрали и ее длину предлагается определять путем сравнения давления в тормозной магистрали и уравнильных резервуарах по их разнице (рисунок 9).

Для проверки адекватности предложенных решений необходимо провести экспериментальные исследования.

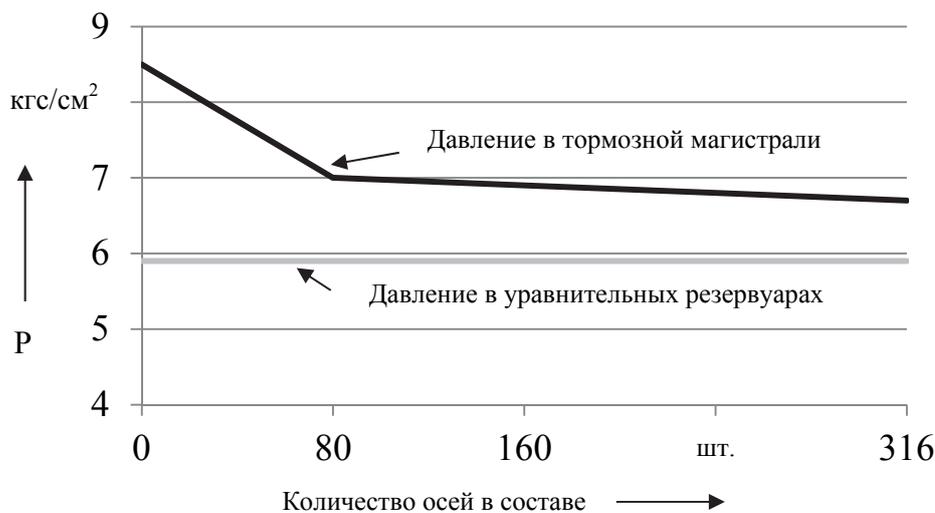


Рисунок 9 – График давления в тормозной магистрали и уравнильном резервуаре при постановке ручки крана машиниста в первое положение

Проведение экспериментальных исследований необходимо, чтобы доказать возможность применения усовершенствованного порядка проверки целостности тормозной магистрали перед отправлением грузового поезда на участок следования, а также для получения аналитических зависимостей давления в тормозной магистрали от длины состава поезда, т. е. количества осей в его составе для автоматизации процесса проверки целостности тормозной магистрали поезда.

Для проведения экспериментальных исследований был составлен план, включающий в себя четыре этапа:

первый этап – изыскание возможности проведения эксперимента, согласование его проведения с причастными службами (дирекция тяги, дирекция управления движением, дирекция вагонного хозяйства);

второй этап – разработка рационального способа проверки поезда с учетом обеспечения безопасности движения поездов, безопасности работников при проведении эксперимента, и минимизации затрат на его проведение;

третий этап – выполнение экспериментальных исследований на станции Московка Западно-Сибирской железной дороги;

четвертый этап – обработка и анализ полученных с электронных носителей информации данных.

Разработанный технологический процесс исследования тормозной магистрали производится при исправном тормозном оборудовании локомотива и поезда, исправных регистрирующих приборах.

Для сокращения времени на восстановление давления в тормозной магистрали поезда после включения очередной группы вагонов, после замеров с использованием полного состава поезда было принято решение сокращать количество включенных осей путем перекрытия концевых кранов тормозной магистрали с отключением вагонов группами по 10 подвижных единиц.

Таким образом, были исследованы тормозные системы двух поездов: первый поезд составом 61 вагон (244 оси) с электровозом 2ЭС6 № 002 приписки ТЧЭ-5 Свердловской железной дороги в голове; второй поезд составом 65 вагонов (260 осей) с электровозом 2ЭС6 № 636 приписки ТЧЭ-2 Западно-Сибирской железной дороги в голове.

Проверки производились при величине зарядного давления тормозной магистрали 5,0 кгс/см<sup>2</sup>.

На начальном этапе производился замер плотности тормозной магистрали. Затем осуществлялась постановка рукоятки контроллера крана машиниста в положение, обеспечивающее повышение давления в тормозной магистрали выше зарядного, с выдержкой в 3 с. После этого производилось отключение очередной группы вагонов до тех пор, пока количество осей не сократилось до нуля.

Пример протокола расшифровки кассеты регистрации БЛОК, выполненного при помощи программы СУД-У, представлен на рисунке 10. Пример зарегистрированных параметров тормозной системы поезда приведен в таблице 3.

Протокол № 2 от 10.05.2017

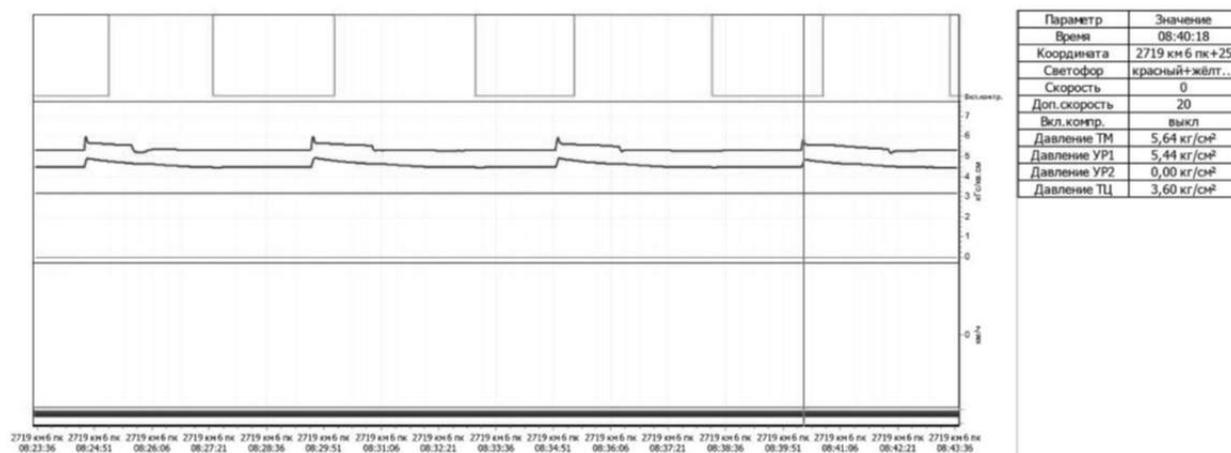


Рисунок 10 – Параметры тормозной системы поезда с электровозом 2ЭС6 № 002 при постановке управляющего органа крана машиниста в положение, обеспечивающее повышение давления в тормозной магистрали выше зарядного при длине состава поезда 244 осей

Таблица 3 – Результаты экспериментальных исследований тормозной магистрали поезда с электровозом 2ЭС6 № 002

Количество осей	Плотность тормозной сети, с	Давление в УР, кгс/см <sup>2</sup>	Давление в ТМ, кгс/см <sup>2</sup>	Давление в ПМ, кгс/см <sup>2</sup>
0	546	5,48	8,3	8,3
20	180	5,48	6,44	8,6
40	94	5,48	5,84	8,1
80	78	5,52	5,72	7,8
120	76	5,44	5,76	8,0
160	66	5,4	5,76	7,9
200	56	5,48	5,72	7,9
244	53	5,44	5,64	7,7

Используя методы математического анализа и экспериментальные данные, получим уравнение, описывающее изменение давления в тормозной магистрали в зависимости от количества осей.

Пригодность приближения будем оценивать по следующим критериям [2 – 4]: сумма квадратов ошибок (*SSE*)

$$SSE = \sum_{k=1}^n (y_k - \hat{y}_k)^2, \quad (1)$$

где  $y_k$  – наблюдаемое значение в  $X_k$ ;  
 $\hat{y}_k$  – предсказанное значение в  $X_k$ ;  
 квадрат смешанной корреляции

$$R^2 = 1 - \frac{SSE}{SST}, \quad (2)$$

где  $SST$  – полная сумма квадратов,

$$SST = \sum_{k=1}^n (y_k - \bar{y})^2, \quad (3)$$

где  $\bar{y}$  – среднее значение переменной  $y$ ;

уточненное значение квадрата смешанной корреляции

$$Adj R^2 = 1 - \frac{SSE(n-1)}{SST(n-m)}, \quad (4)$$

где  $n$  – число данных;

$m$  – число параметров модели  $X_k$ ;

среднеквадратичная ошибка оценки

$$RSME = \sqrt{\frac{SSE}{n-m}}. \quad (5)$$

Наиболее пригодным приближением в результате ряда расчетов оказалась экспоненциальная модель вида:

$$y = a \cdot \exp(b \cdot x) + c \cdot \exp(d \cdot x), \quad (6)$$

где  $a, b, c, d$  – коэффициенты уравнения

По результатам расчетов давление в тормозной магистрали первого поезда (электровоз 2ЭС6 № 002) с учетом уравнения (6) будет иметь вид:

$$y = 2,533 \cdot \exp(-0,06784 \cdot x) + 5,771 \cdot \exp(-0,0001177 \cdot x). \quad (7)$$

Коэффициенты  $a, b, c, d$  находятся в 95 % случаев в доверительном интервале, что говорит о их значимости. Указанные выше критерии оценки пригодности уравнения имеют следующие значения:  $SSE = 0,0197$ ;  $R^2 = 0,9967$ ;  $Adj R^2 = 0,9942$ ;  $RSME = 0,0702$ .

По результатам расчетов давление в тормозной магистрали второго поезда (электровоз 2ЭС6 № 636) с учетом уравнения (6) будет иметь вид:

$$y = 1,864 \cdot \exp(-0,06961 \cdot x) + 6,339 \cdot \exp(-0,0002107 \cdot x). \quad (8)$$

Коэффициенты  $a, b, c, d$  находятся в 95 % случаев в доверительном интервале, что говорит о их значимости. Указанные выше критерии оценки пригодности уравнения имеют следующие значения:  $SSE = 0,0098$ ;  $R^2 = 0,975$ ;  $Adj R^2 = 0,9959$ ;  $RSME = 0,0442$ .

Результаты расчетов показывают отличную значимость предложенного приближения.

Графические изображения кривых давления тормозной магистрали при постановке рукоятки контроллера крана машиниста в положение, обеспечивающее повышение давления в тормозной магистрали выше зарядного, показано на рисунках 11, 12.

Таким образом, используя полученные уравнения, можно в любой момент времени определить целостность и длину тормозной магистрали.

Полученные уравнения имеют общую экспоненциальную модель и одинаковое число коэффициентов, но для разных поездов, отличающихся формированием, получаем разные значения коэффициентов, что говорит о зависимости этих значений от типа включенного в состав поезда подвижного состава и его однородности.

Так как уравнения получены по результатам всего двух экспериментов, для получения более устойчивой зависимости требуется проведение значительно большего ряда экспериментов с поездами различного формирования.

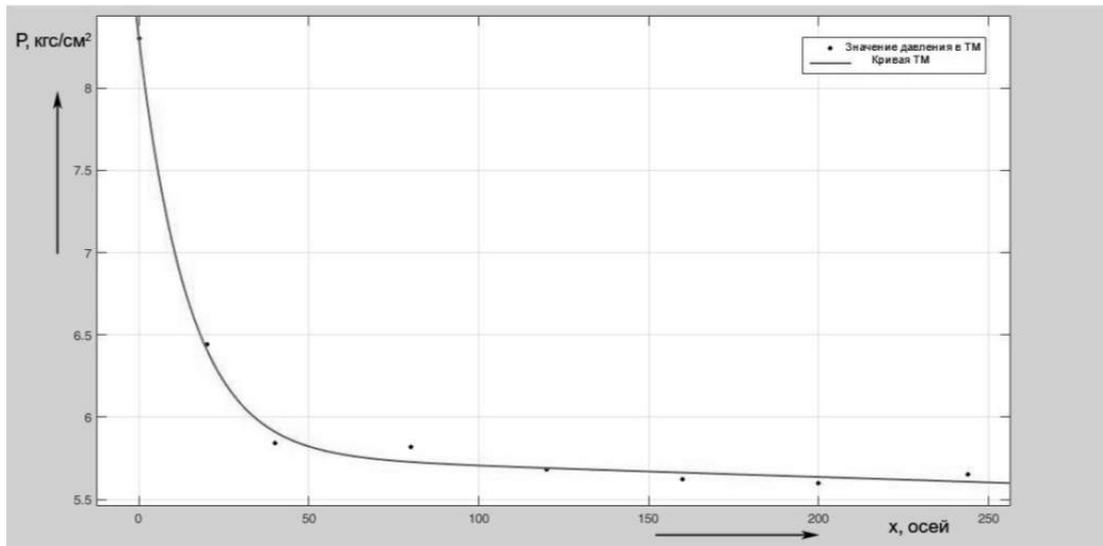


Рисунок 11 – График давления в тормозной магистрали при проведении экспериментальных исследований для первого поезда (электровоз 2ЭС6 № 002)

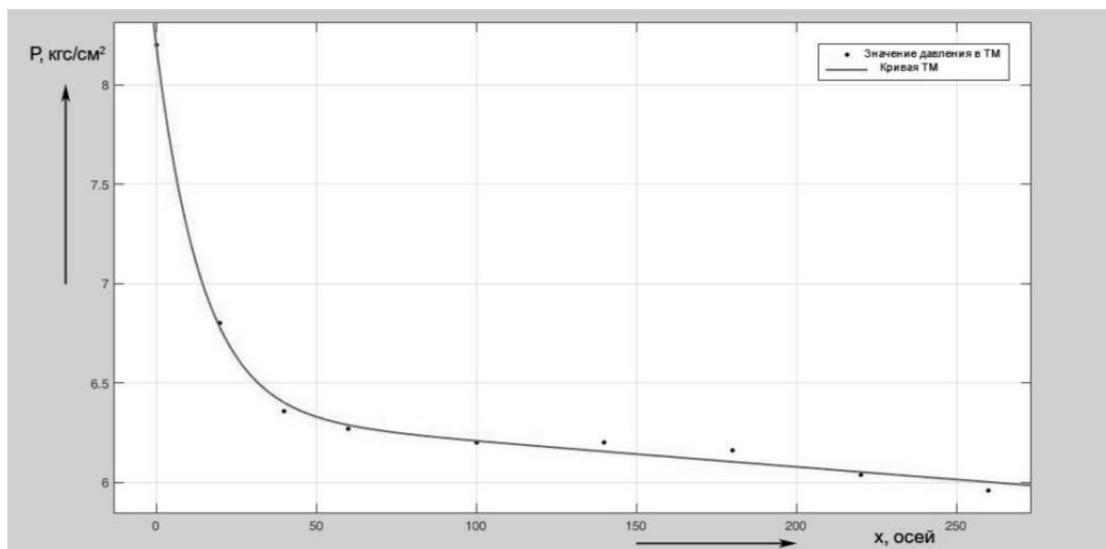


Рисунок 12 – График давления в тормозной магистрали при проведении экспериментальных исследований для первого поезда (электровоз 2ЭС6 № 636)

## Список литературы

1. Правила технического обслуживания тормозного оборудования и управления тормозами железнодорожного подвижного состава, утвержденные Советом по железнодорожному транспорту государств-участников Содружества и приказ Минтранса России от 3 июня 2014 г. № 151 / ОАО «РЖД». – М., 2016. – 162 с.

2. Андронов, А. М. Теория вероятностей и математическая статистика: Учебник [Текст] / А. М. Андронов, Е. А. Копытов, Л. Я. Гринглаз. – СПб: Питер, 2004. – 461 с.
3. Стрижов, В. В. Методы выбора регрессионных моделей [Текст] / В. В. Стрижов, Е. А. Крымова / Вычислительный центр РАН. – М., 2010. – 60 с.
4. Кобзарь, А. И. Прикладная математическая статистика. Для инженеров и научных работников [Текст] / А. И. Кобзарь. – М.: Физматлит, 2006. – 816 с

## References

1. *Pravila tehničkog obsluživanija tormoznog oborudovanja i upravljenja tormozami zheleznodorozhnogo podvizhnogo sastava, utverzhdenne Sovetom po zheleznodorozhnomu transportu gosudarstv- uchastnikov Sodruzhestva i prikaz Mintransa Rossii ot 3 ijunja 2014 goda №151* (The technical maintenance's rules of the braking equipment and of the brake control of the rolling train, which were approved by the Council for rail transport of the state parties of the Commonwealth and by the order of the Ministry of transport of Russia from 3 June 2014, №151). Moscow.
2. Andronov A. M., Kopytov E. A., Gringlaz L. Ya. *Teorija verovatnostej i matematičeskaja statistika* (The probability theory and the mathematical statistics). Sankt-Petersburg, 2004, 461 p.
3. Strizhov V. V., Krymova E. A. *Metody vybora regressionnyh modelej* (The Selection methods of the regressive models). Moscow: Computing center of RAN, 2010, 60 p.
4. Kobzar A. I. *Prikladnaja matematičeskaja statistika. Dlja inzhenerov i nauchnyh rabotnikov* (Applied mathematical statistics. For engineers and scientists). Moscow: Fizmatlit, 2006, 816 p.

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

### Шатохин Андрей Петрович

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046, Российская Федерация.

Преподаватель кафедры «Подвижной состав электрических железных дорог», ОмГУПС.

Тел.: +7 (3812) 37-60-82.

E-mail: Shatohin\_ap@mail.ru

### Есин Николай Васильевич

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046, Российская Федерация.

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Подвижной состав электрических железных дорог», ОмГУПС.

Тел.: +7 (3812) 37-60-82

E-mail: nikve@mail.ru

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Шатохин, А. П. Повышение безопасности движения грузовых электровозов за счет совершенствования порядка проверки целостности тормозной магистрали перед отправлением на участок следования [Текст] / А. П. Шатохин, Н. В. Есин // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2017. – № 2 (30). – С. 65 – 76.

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

### Shatohin Andrei Petrovich

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx st., Omsk, 644046, the Russian Federation.

Lecturer of the department «Railway Rolling Stock», OSTU.

Phone: +7 (3812) 37-60-82.

E-mail: Shatohin\_ap@mail.ru

### Esin Nikolai Vasilevich

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx st., Omsk, 644046, the Russian Federation.

Ph.D., docent of the Department «Railway Rolling Stock», OSTU.

Phone: +7 (3812) 37-60-82.

E-mail: nikve@mail.ru

## BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Shatokhin A. P., Esin N. V. The safety's increase of the freight electric locomotive's traffic on account of the improvement of the integrity's verification of the braking highway's order before the departure to the following section. Journal of Transsib Railway Studies, 2017, vol. 30, no. 2, pp. 65 – 76 (In Russian).

УДК 621.311

**А. Л. Каштанов, М. М. Никифоров, С. Ю. Ушаков**

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС), г. Омск, Российская Федерация

## **НОВЫЕ ПОДХОДЫ К ИССЛЕДОВАНИЮ ПРОБЛЕМЫ НЕБАЛАНСА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ НА ТЯГУ ПОЕЗДОВ**

***Аннотация.** В статье рассмотрены вопросы исследования небаланса электроэнергии на тягу поездов, в том числе описан метод, предусматривающий оценку вклада составляющих небаланса в его общую величину, с возможностью их разнесения между участниками перевозочного процесса: службой электрификации и электроснабжения дирекции инфраструктуры, службой автоматики и телемеханики дирекции инфраструктуры, дирекцией тяги и дирекцией моторвагонного подвижного состава. Описанный метод позволяет более детально проводить анализ факторов, повлиявших на изменение составляющих небаланса, и в дальнейшем разрабатывать организационно-технические мероприятия по его снижению.*

***Ключевые слова:** небаланс, технические потери электроэнергии, коммерческие потери электроэнергии, учет электроэнергии, система тягового электроснабжения, тяга поездов, электроподвижной состав*

**Alexey L. Kashtanov, Mikhail M. Nikiforov, Sergey Y. Ushakov**

Omsk State Transport University (OSTU), Omsk, the Russian Federation

## **THE NEW APPROACHES TO THE PROBLEM OF THE ELECTRIC POWER IMBALANCE IN TRAIN TRACTION RESEARCH**

***Abstract.** In article the issues of electric power imbalance in train traction research are considered, including the method providing an estimation of the contribution of imbalance components to its total value with the possibility of their separation between the participants of the transportation process: the electrification and power supply service, the automatics and telemechanics service, the directorates of locomotive traction and motorized rolling stock. Described method allows in more detail to analyze the factors that affected the change in the components of imbalance and further develop organizational and technical measures to reduce it.*

***Keywords:** imbalance, technical losses of electric power, commercial losses of electric power, electricity accounting, traction power supply system, train traction, electric rolling stock*

Одним из приоритетных направлений совершенствования принципов организации и управления перевозочным процессом, заложенных в Энергетической стратегии ОАО «РЖД» на период до 2020 г. и на перспективу до 2030 г. [1], является развитие систем анализа, планирования и нормирования расхода топливно-энергетических ресурсов (ТЭР) на тягу поездов, в том числе с применением новых подходов и информационных технологий. Актуальность данного направления в рамках развития перевозочного процесса подтверждается тем, что в 2016 г. затраты на приобретение ТЭР в холдинге «РЖД» составили более 227 млрд руб. (из них 87 % приходится на тягу поездов) и доля этих затрат в общих эксплуатационных затратах холдинга постоянно растет.

Одним из критериев, характеризующих состояние учета электроэнергии на тягу поездов, является небаланс электроэнергии, отпущенной с шин тяговых подстанций и потребленной по счетчикам электроподвижного состава (далее – «небаланс» электроэнергии на тягу поездов). На практике величина небаланса на полигоне постоянного тока составляет 12 – 20 % [2]. Для полигона переменного тока величина небаланса находится в диапазоне от 4 до 8 %, хотя в отдельных случаях она может приближаться к нулю, а иногда может принимать и отрицательные значения. Очевидно, что для эффективной борьбы с данным явлением информации об одном только уровне небаланса в границах железной дороги недостаточно, требу-

ется более глубокое изучение природы его происхождения и разработка новых систем мониторинга данной величины.

Учеными Омского государственного университета путей сообщения разработаны соответствующие методики для определения небаланса электроэнергии в границах железных дорог [3, 4], которые до настоящего времени используются в ОАО «РЖД», проведены многочисленные расчетные и натурные эксперименты [5] и аналитические изыскания, посвященные вопросам исследования составляющих небаланса электрической энергии и влияющих на его значения факторов. По их результатам разработана Методика прогнозирования небаланса электрической энергии на тягу поездов в границах железных дорог, утвержденная распоряжением президента ОАО «РЖД» О. В. Белозеровым от 29.12.2016 № 2783/р.

В настоящее время в инициативном порядке начаты работы по созданию методики определения составляющих технических потерь электроэнергии в системах тягового электроснабжения постоянного и переменного тока. Разработка такой методики позволит оценивать долю технических (реальных) потерь электроэнергии в общем уровне небаланса электроэнергии в системе тягового электроснабжения поэлементно в оборудовании тяговых подстанций, контактной и рельсовой сети на уровнях дистанций электроснабжения, железной дороги, сети железных дорог, а также для отдельно взятой тяговой подстанции и межподстанционной зоны, что позволит отслеживать изменение уровня реальных потерь электрической энергии и выявлять очаги их роста, что в свою очередь позволит вырабатывать адресные организационно-технические мероприятия по их снижению. Методика также даст возможность выполнять разнесение потерь между участниками перевозочного процесса: Трансэнерго, службой автоматики и телемеханики дирекции инфраструктуры, дирекцией тяги и дирекцией моторвагонного подвижного состава, службой пути и организациями сервисного обслуживания электроподвижного состава (ООО «ТМХ-Сервис», ООО «СТМ-Сервис»), а также прочими нетяговыми потребителями электроэнергии, получающими питание от контактной сети. Результаты расчета уровня технических потерь электроэнергии позволят также оценить долю коммерческой составляющей потерь электроэнергии в структуре небаланса, обусловленной неудовлетворительным состоянием средств измерения электроэнергии и организации ее учета на тяговых подстанциях и электроподвижном составе.

В соответствии с ГОСТ 32895-2014 небалансом электрической энергии на тягу поездов называют разницу между объемом расхода электроэнергии, относимого на тягу поездов по показаниям счетчиков тяговых подстанций (с включением соответствующей доли – от общего потребления электроэнергии – технических потерь в тяговых трансформаторах и линиях электропередач до границы балансовой принадлежности) и объемом расхода электроэнергии по показаниям счетчиков ЭПС. На практике же в настоящее время значение небаланса электроэнергии на тягу поездов на полигоне постоянного тока определяется без учета потерь электроэнергии в понизительных трансформаторах, а на полигоне переменного тока при наличии учета электроэнергии на фидерах контактной сети тяговых подстанций небаланс определяется без потерь в тяговых трансформаторах.

Как известно, небаланс электроэнергии включает в себя составляющую реальных потерь электроэнергии – технологическую – и условную составляющую – так называемые коммерческие потери (рисунок 1).

Технологические потери включают в себя технические потери электроэнергии, определяемые технологией ее транспортировки от границы балансовой принадлежности системы тягового электроснабжения к электроподвижному составу и работой различных систем и устройств, связанной с организацией перевозочного процесса, а также составляющую, обусловленную погрешностями приборов учета электроэнергии на тяговых подстанциях, электроподвижном составе и у прочих потребителей электроэнергии, получающих питание от контактной сети.

Коммерческая составляющая не связана с реальными потерями электрической энергии и обусловлена в первую очередь следующими причинами: низким качеством технических средств учета электроэнергии, методическими ошибками и погрешностями при определении интегральных значений небаланса в границах расчетного участка.

Приведенные составляющие имеют различную природу происхождения, поэтому и механизмы их определения должны различаться. Так, если технические потери электроэнергии на тягу поездов с достаточно высокой точностью могут быть определены расчетным путем на основе данных о параметрах и режимах работы системы тягового электроснабжения (СТЭ), то коммерческие потери содержат в себе значительную долю случайной составляющей, обусловленную ошибками вычислений, неисправностями приборов учета, случаями несанкционированного вмешательства в систему учета электроэнергии на ЭПС и прочими случайными факторами, учесть которые не представляется возможным.



Рисунок 1 – Структура составляющих небаланса электроэнергии на тягу поездов

В этих условиях наиболее простым и в то же время достоверным способом является определение коммерческой составляющей по остаточному принципу, т. е. по разности значений отчетного небаланса, скорректированного на величину потерь на нетяговое электропотребление, и его технической составляющей, полученной расчетным путем:

$$\Delta W^{\text{ком}} = \Delta W - \Delta W^{\text{н/т}} - \Delta W^{\text{техн}} - \Delta W^{\text{заезд}}, \quad (1)$$

где  $\Delta W$  – отчетное значение небаланса;

$\Delta W^{\text{н/т}}$  – потери электроэнергии, относимые на нетяговое электропотребление от контактной сети;

$\Delta W^{\text{техн}}$  – технические потери электроэнергии в СТЭ;

$\Delta W^{\text{заезд}}$  – составляющая коммерческих потерь, обусловленная различными уровнями небаланса на соседних железных дорогах в условиях взаимозаездов локомотивных бригад.

К элементарным составляющим нетягового потребления электроэнергии от контактной сети расчетного полигона относятся расход на отопление пассажирских вагонов в пути следования, расход на технологические нужды и расход на прочие нетяговые нужды.

Как уже было отмечено выше, расчет составляющих технических потерь электрической энергии на тягу поездов основан на применении известных формул и положений расчета потерь в элементах СТЭ [6]. Технические потери электроэнергии включают в себя следующие потери:

- в преобразовательных агрегатах (ПА) тяговых подстанций постоянного тока, в том числе в преобразовательных трансформаторах и выпрямительных преобразователях ( $\Delta W^{\text{ПА}}$ );
- в сглаживающих устройствах тяговых подстанций постоянного тока ( $\Delta W^{\text{СУ}}$ );
- в контактной сети ( $\Delta W^{\text{КС}}$ );
- в тяговой рельсовой сети, в том числе в рельсовой цепи ( $\Delta W^{\text{РЦ}}$ ) и путевых дроссель-трансформаторах ( $\Delta W^{\text{ДТ}}$ );
- в устройствах компенсации реактивной мощности на участках переменного тока ( $\Delta W^{\text{КУ}}$ ).

На техническую составляющую небаланса оказывают влияние факторы, связанные с изменением сопротивления СТЭ расчетного полигона и объемов электропотребления.

К первым относится изменение параметров СТЭ расчетного полигона, обусловленное изменением состава оборудования СТЭ, схем питания МПЗ, продолжительности работы агрегатов в течение расчетного периода.

К факторам, влияющим на изменение электропотребления, относятся следующие:

- доля работы в грузовом движении;
- средний вес поезда в грузовом и пассажирском движении;
- средняя техническая скорость в грузовом и пассажирском движении;
- коэффициент участковой скорости в грузовом и пассажирском движении;
- доля порожнего пробега грузовых вагонов;
- количество неграфиковых остановок;
- количество задержек у запрещающих сигналов;
- время нагона пассажирских поездов.

Особо следует выделить составляющую технических потерь электроэнергии в контактной сети. В отличие от потерь электрической энергии в оборудовании тяговых подстанций потери в контактной сети зависят не только от ее параметров и нагрузки, но и от расположения поездов в межподстанционной зоне, поэтому наиболее точный результат может быть достигнут при расчете множества мгновенных схем, учитывающих взаимное расположение поездов на зоне и их электропотребление в каждый момент времени, что может быть получено при выполнении имитационного моделирования электропотребления на участке. Данный способ применим в случае выполнения расчета для небольшого участка железной дороги за небольшой период времени (например, при суточном расчете), так как характеризуется чрезвычайно высокой трудоемкостью и требует большого количества исходных данных. На

практике же используются упрощенные (расчетные) методы, содержащие ряд допущений [7].

При анализе потерь электроэнергии в тяговой сети целесообразно отдельно рассматривать составляющую технических потерь электроэнергии, обусловленную наличием перетоков мощности в тяговой сети на участках железных дорог, электрифицированных на переменном токе [8, 9]. Данная составляющая потерь имеет переменный характер и во многом зависит от режимов работы СТЭ.

Составляющая коммерческих потерь электроэнергии, обусловленная различными значениями небаланса на соседних железных дорогах в условиях взаимозаездов, определяется исключительно объемом электропотребления локомотивными бригадами расчетной дороги на территориях соседних и уровнями небаланса на расчетной и соседних дорогах по формуле:

$$\Delta W^{\text{заезд}} = \sum_{v=0}^z \left( W_{\text{ЭПС}_v} \left( \frac{100}{100 - \delta_v} - \frac{100}{100 - \delta} \right) \right), \quad (2)$$

где  $W_{\text{ЭПС}_v}$  – объем электроэнергии, потребленной локомотивными бригадами расчетной железной дороги на территории  $v$ -й соседней железной дороги, по показаниям счетчиков ЭПС, кВт·ч;

$\delta$  – отчетное относительное значение небаланса на расчетной железной дороге, %;

$\delta_v$  – отчетное относительное значение небаланса на  $v$ -й соседней железной дороге, %;

$z$  – количество железных дорог, граничащих с расчетной.

Потребление электроэнергии локомотивными бригадами соседних железных дорог на территории расчетной не оказывает влияния на уровень небаланса в границах расчетной дороги, так как потери, относимые на локомотивные бригады соседних железных дорог, идентичны потерям, относимым на тягу поездов в пределах расчетной железной дороги.

Данная составляющая может принимать как положительные, так и отрицательные значения в зависимости от знака разницы значений небаланса в границах соседних железных дорог. Так, если небаланс в границах расчетной дороги ниже, чем на соседней железной дороге, то значение указанной составляющей примет знак «плюс», что будет увеличивать общий уровень небаланса на расчетной дороге, обратное действие будет иметь место, если уровень небаланса на расчетной железной дороге будет выше, чем на соседней.

Коммерческие потери электроэнергии, обусловленные методическими погрешностями, ошибками, высоким порогом чувствительности приборов учета у потребителей и несанкционированным вмешательством в систему учета на ЭПС, определяются по формуле:

$$\Delta W^{\text{н/у}} = \Delta W^{\text{ком}} - \Delta W^{\text{заезд}}. \quad (3)$$

Определение значения небаланса электроэнергии на тягу поездов характеризуется допустимой погрешностью измерительного комплекса учета электроэнергии, а именно классами точности входящих в его состав измерительных средств (как правило, трансформатора тока (ТТ), трансформатора напряжения (ТН), счетчика электроэнергии (СЭ)), а также потерями в линиях присоединения СЭ к ТН, в соответствии с формулой:

$$\delta_{\text{ИК}} = \pm 1,1 \sqrt{\sum_{i=1}^n (\delta_{\text{СИ}_i}^2 + \delta_{\text{Л}_i}^2)}, \quad (4)$$

где  $\delta_{\text{СИ}_i}$  – допустимая погрешность  $i$ -го средства измерения, входящего в состав измерительного комплекса электроэнергии, при нормальных условиях работы (принимается равной значению класса точности средства измерения);

$n$  – количество средств измерения, входящих в состав измерительного комплекса;

$\delta_{\text{Л}}$  – предел допустимых потерь в линиях присоединения СЭ к ТН.

Результирующая допустимая погрешность определения небаланса в границах расчетного участка постоянного тока определяется по формуле:

$$\delta_{\text{доп}}^{\pm} = \pm \sqrt{\left( \sum_{j=1}^m \left( \delta_{\text{ИК}_j}^{\text{ПА}} \frac{W_{\text{ИК}_j}^{\text{ПА}}}{\sum_{j=1}^m W_{\text{ИК}_j}^{\text{ПА}}} \right)^2 + \sum_{k=1}^p \left( \delta_{\text{ИК}_k}^{\text{ЭПС}} \frac{W_{\text{ИК}_k}^{\text{ЭПС}}}{\sum_{k=1}^p W_{\text{ИК}_k}^{\text{ЭПС}}} \right)^2 \right)}, \quad (5)$$

где  $\delta_{\text{ИК}_j}^{\text{ПА}}$ ,  $\delta_{\text{ИК}_k}^{\text{ЭПС}}$  – допустимые погрешности соответственно  $j$ -го измерительного комплекса учета электроэнергии на вводе ПА тяговой подстанции и  $k$ -го измерительного комплекса учета электроэнергии на борту ЭПС;

$W_{\text{ИК}_j}^{\text{ПА}}$  – расход электроэнергии, измеренный  $j$ -м измерительным комплексом на вводе ПА тяговой подстанции в границах расчетного участка, кВт·ч;

$m$  – количество измерительных комплексов на вводах ПА тяговых подстанций в границах расчетного участка;

$W_{\text{ИК}_k}^{\text{ЭПС}}$  – объем потребленной электроэнергии, измеренный  $k$ -м измерительным комплексом на борту ЭПС в границах расчетного участка (полигона), кВт·ч;

$p$  – количество измерительных комплексов учета электроэнергии на тягу на борту ЭПС в границах расчетного участка.

На участках переменного тока порядок расчета допустимой погрешности зависит от способа измерения расхода электроэнергии на тягу поездов [10].

Прямой способ измерения расхода электроэнергии на тягу поездов на тяговых подстанциях переменного тока подразумевает определение расхода электроэнергии по показаниям измерительных комплексов, установленных непосредственно на фидерах контактной сети (ФКС) тяговых подстанций.

При таком способе учета электроэнергии результирующая допустимая погрешность определения небаланса в границах расчетного участка переменного тока определяется по формуле:

$$\tilde{\delta}_{\text{доп}}^{\pm} = \pm \sqrt{\left( \sum_{j=1}^{m1} \left( \delta_{\text{ИК}_j}^{\text{ФКС}} \frac{W_{\text{ИК}_j}^{\text{ФКС}}}{\sum_{j=1}^{m1} W_{\text{ИК}_j}^{\text{ФКС}}} \right)^2 + \sum_{k=1}^{p1} \left( \delta_{\text{ИК}_k}^{\text{ЭПС}} \frac{W_{\text{ИК}_k}^{\text{ЭПС}}}{\sum_{k=1}^{p1} W_{\text{ИК}_k}^{\text{ЭПС}}} \right)^2 \right)}, \quad (6)$$

где  $\delta_{\text{ИК}_j}^{\text{ФКС}}$  – допустимая погрешность  $j$ -го измерительного комплекса учета электроэнергии на ФКС тяговой подстанции;

$W_{\text{ИК}_j}^{\text{ФКС}}$  – расход электроэнергии, измеренный  $j$ -м измерительным комплексом на ФКС тяговой подстанции в границах расчетного полигона переменного тока, кВт·ч;

$m1$  – количество измерительных комплексов на ФКС тяговых подстанций в границах расчетного полигона переменного тока.

Косвенный способ измерения расхода электроэнергии на тягу поездов на тяговых подстанциях переменного тока подразумевает определение расхода электроэнергии на тягу по разнице показаний измерительных комплексов на вводах 27,5 кВ и измерительных комплексов на фидерах линий ДПР, СЦБ, ТСН, КУ (применяется в случае отсутствия учета электроэнергии на ФКС).

Результирующая допустимая погрешность определения небаланса в границах расчетного полигона переменного тока при косвенном способе измерения определяется по формуле:

$$\delta_{\text{доп.}}^{\sim} = \pm \sqrt{\sum_{j=1}^{m2} \left( \delta_{\text{ИК}_j}^{\text{ВВ27,5}} \frac{W_{\text{ИК}_j}^{\text{ВВ27,5}}}{\sum_{j=1}^{m2} W_{\text{ИК}_j}^{\text{ВВ27,5}}} \right)^2 + \sum_{j=1}^{m3} \left( \delta_{\text{ИК}_j}^{\text{ДПР}} \frac{W_{\text{ИК}_j}^{\text{ДПР}}}{\sum_{j=1}^{m2} W_{\text{ИК}_j}^{\text{ВВ27,5}}} \right)^2 + \sum_{j=1}^{m4} \left( \delta_{\text{ИК}_j}^{\text{СЦБ}} \frac{W_{\text{ИК}_j}^{\text{СЦБ}}}{\sum_{j=1}^{m2} W_{\text{ИК}_j}^{\text{ВВ27,5}}} \right)^2 + \sum_{j=1}^{m5} \left( \delta_{\text{ИК}_j}^{\text{ТСН}} \frac{W_{\text{ИК}_j}^{\text{ТСН}}}{\sum_{j=1}^{m2} W_{\text{ИК}_j}^{\text{ВВ27,5}}} \right)^2 + \sum_{k=1}^{p1} \left( \delta_{\text{ИК}_k}^{\text{ЭПС}} \frac{W_{\text{ИК}_k}^{\text{ЭПС}}}{\sum_{k=1}^{p1} W_{\text{ИК}_k}^{\text{ЭПС}}} \right)^2}, \quad (7)$$

где  $\delta_{\text{ИК}_j}^{\text{ВВ27,5}}$ ,  $\delta_{\text{ИК}_j}^{\text{ДПР}}$ ,  $\delta_{\text{ИК}_j}^{\text{СЦБ}}$ ,  $\delta_{\text{ИК}_j}^{\text{ТСН}}$  – допустимые погрешности  $j$ -х измерительных комплексов учета электроэнергии соответственно на вводе 27,5 кВ, фидерах ДПР, СЦБ и ТСН тяговой подстанции;

$W_{\text{ИК}_j}^{\text{ВВ27,5}}$ ,  $W_{\text{ИК}_j}^{\text{ДПР}}$ ,  $W_{\text{ИК}_j}^{\text{СЦБ}}$ ,  $W_{\text{ИК}_j}^{\text{ТСН}}$  – расход электроэнергии, измеренный  $j$ -м измерительным комплексом соответственно на вводе 27,5 кВ, на фидере ДПР, СЦБ и ТСН тяговой подстанции в границах расчетного полигона переменного тока, кВт·ч;

$m2$ ,  $m3$ ,  $m4$ ,  $m5$  – количество измерительных комплексов соответственно на вводах 27,5 кВ, на фидерах ДПР, СЦБ и ТСН тяговых подстанций в границах расчетного полигона переменного тока.

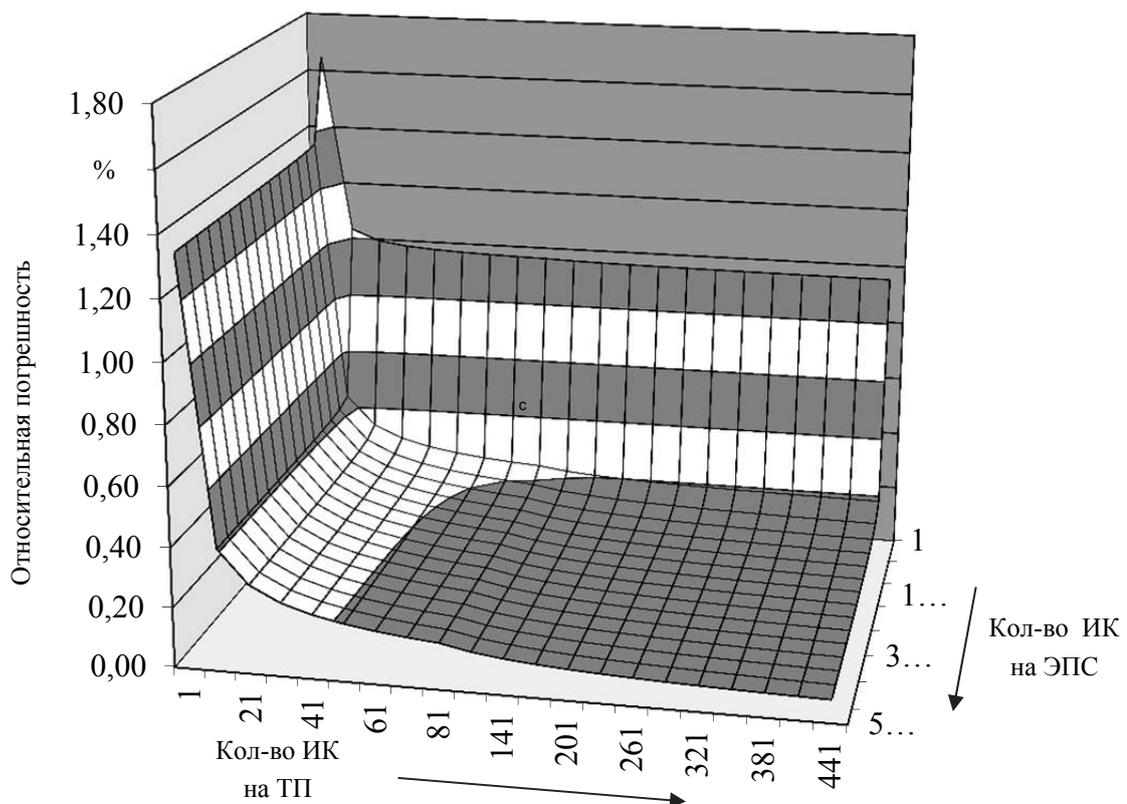


Рисунок 2 – Зависимость допустимой погрешности измерения потерь электроэнергии на тягу поездов от количества задействованных в измерительных комплексов

С увеличением числа задействованных при учете электроэнергии измерительных комплексов при относительно равномерном распределении электропотребления по ним значение  $\delta_{\text{доп}}$  стремится к нулю (см. рисунок 2). Так, при определении потерь электроэнергии в границах крупных расчетных полигонов, количество задействованных ИК на которых превышает 500 единиц за расчетный период (например, дистанция электроснабжения, полигон постоянного или переменного тока железной дороги при расчетном периоде не менее недели), результирующей допустимой погрешностью измерений можно пренебречь. При меньших расчетных участках и за более короткие расчетные интервалы (например, при расчете потерь в границах межподстанционной зоны за сутки)  $\delta_{\text{доп}}$  может достигать  $\pm 0,5\%$  и должна учитываться.

После определения составляющих технологических и коммерческих потерь электроэнергии выполняется их распределение на причастные бизнес-единицы в соответствии со структурой, приведенной на рисунке 3.

Применение представленного подхода к анализу структуры небаланса электроэнергии на тягу поездов позволит обеспечить оперативное выявление участков железных дорог, вплоть до отдельных межподстанционных зон, с повышенным уровнем технологических потерь электроэнергии, разрабатывать и внедрять организационно-технические мероприятия по их устранению.

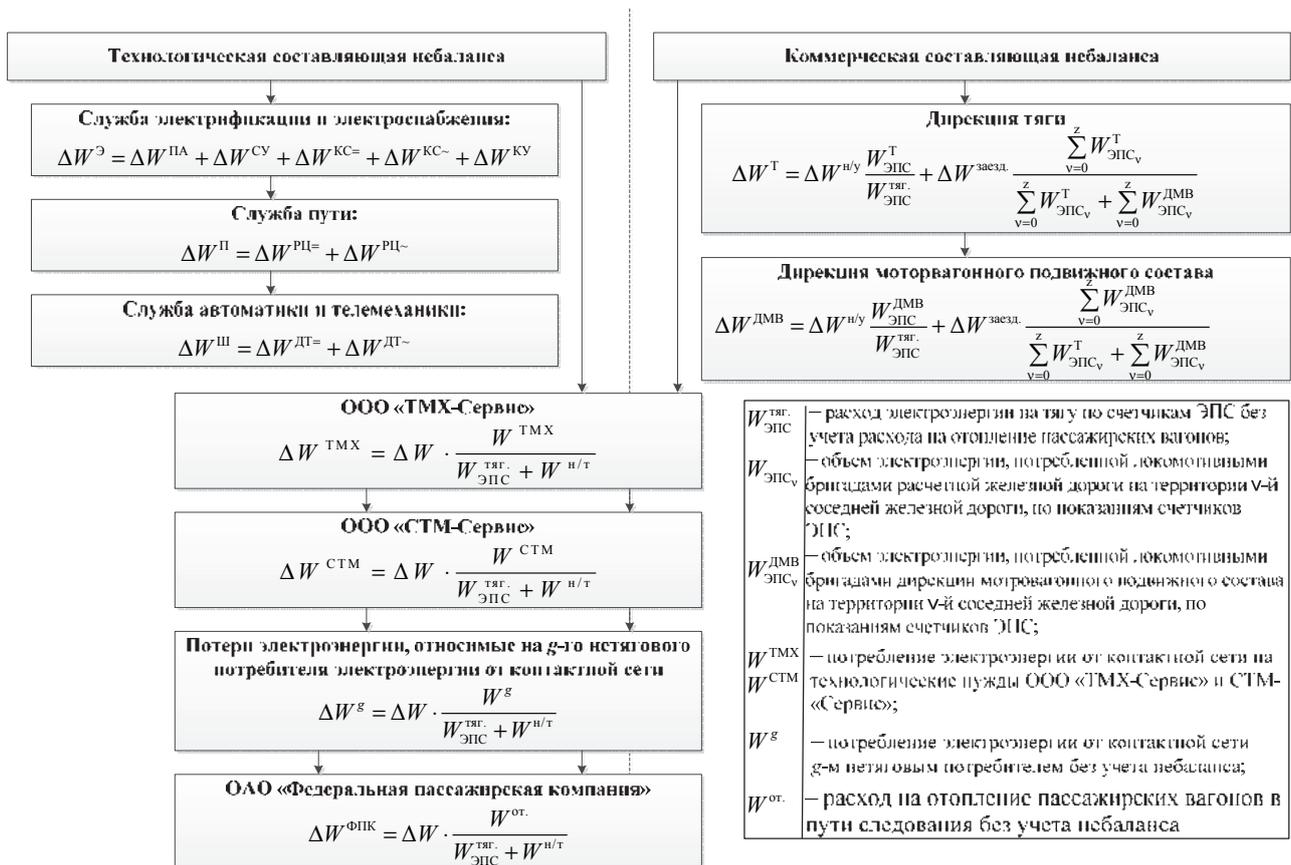


Рисунок 3 – Структура отнесения составляющих небаланса на причастные бизнес-единицы

### Список литературы

1. Энергетическая стратегия холдинга «Российские железные дороги» на период до 2020 года и на перспективу до 2030 года [Текст]. Утверждена распоряжением ОАО «РЖД» от 14 декабря 2016 г. № 2537р. – М., 2016. – 76 с.

2. Никифоров, М. М. Оценка технологических потерь электроэнергии в системе тягового электроснабжения постоянного тока [Текст] / М. М. Никифоров, А. С. Вильгельм, А. В. Язов // Инновационные проекты и новые технологии в образовании, промышленности и на транспорте: Материалы науч.-практ. конф. / Омский гос. ун-т путей сообщения. Омск, 2012. – С. 40 – 45.
3. Зверев, А. Г. Методика расчета электропотребления и небаланса электроэнергии на тягу поездов в границах железных дорог и участков работы локомотивных бригад [Текст] / А. Г. Зверев, М. М. Никифоров, В. Т. Черемисин // Ресурсосберегающие технологии в структурных подразделениях Западно-Сибирской железной дороги: Материалы науч.-практ. конф. / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2005. – С. 133 – 137.
4. Ушаков, С. Ю. О новом порядке определения небаланса электрической энергии на тягу поездов [Текст] / С. Ю. Ушаков // Ресурсосберегающие технологии на Западно-Сибирской железной дороге: Материалы науч.-практ. конф. / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2010. – С. 72 – 76.
5. Черемисин, В. Т. Снижение небаланса электрической энергии на тягу поездов по счетчикам тяговых подстанций и электроподвижного состава [Текст] / В. Т. Черемисин, С. Ю. Ушаков, Е. Л. Емельяненко // Железнодорожный транспорт. – 2011. – № 2. – С. 45 – 48.
6. Марквардт, К. Г. Электроснабжение электрифицированных железных дорог [Текст] / К. Г. Марквардт. – М.: Транспорт, 1982. – 265 с.
7. Методика расчета технологических потерь электроэнергии в устройствах тягового электроснабжения [Текст] / ВНИИЖТ. – М., 1994. – 30 с.
8. Каштанов, А. Л. Оценка перетоков мощности в тяговой сети постоянного тока по данным автоматизированной системы АСМУЭ ФКС [Текст] / А. Л. Каштанов, О. О. Комякова // Вестник Воронежского гос. техн. ун-та. – Воронеж. – 2015. – № 3. – Т. 11. – С. 130 – 133.
9. Алтангэрэ Энх-Амгалан. Теоретические положения в вопросе согласования систем внешнего и тягового электроснабжения при проектировании железных дорог переменного тока [Текст] / Алтангэрэ Энх-Амгалан, А. Л. Каштанов, М. М. Никифоров // Вестник транспорта Поволжья / Самарский гос. ун-т путей сообщения. – Самара, 2017. – № 2 (62). – С. 24 – 29.
10. Ушаков, С. Ю. Оценка точности определения расхода и технических потерь электрической энергии на тягу поездов [Текст] / С. Ю. Ушаков // Инновационные проекты и новые технологии на железнодорожном транспорте: Материалы науч.-практ. конф. / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2009. – С. 116 – 122.

## References

1. The energy strategy of «Russian Railways» holding for the period until 2020 and for the future until 2030 [Energeticheskaya strategiya holdinga «Rossijskie zheleznye dorogi» na period do 2015 goda i na perspektivu do 2030 goda]. Approved by the decree of JSC Russian Railways on December 14, 2016, No. 2537p, 76 p.
2. Nikiforov M. M., Vilgelm A. S., Yazov A. V. Estimation of technological losses of electric power in the DC traction power supply system [Ocenka tekhnologicheskikh poter' ehlektroehnergii v sisteme tyagovogo ehlektrosnabzheniya postoyannogo toka]. *Materialy nauchno-prakticheskoy konferencii, posvyashchennoj Dnyu Rossijskoj nauki: «Innovacionnye proekty i novye tekhnologii v obrazovanii, promyshlennosti i na transporte»* (Materials of the scientific-practical conference dedicated to the Day of Russian Science: «Innovative projects and new technologies in education, industry and transport»). Омск, 2012, pp. 40 – 45.
3. Zverev A. G., Nikiforov M. M. Algorithm for identifying and analyzing the reasons of the train traction electric power imbalance increase within the boundaries of the railway sections [Algoritm vyyavleniya i analiza prichin rosta nebalansa ehlektroehnergii na tyagu poezdov v graniцах uchastkov zheleznoj dorogi]. *Materialy vsrossijskoj nauchno-tekhnicheskoy konferencii s*

*mezhdunarodnym uchastiem: «Resursosberegayushchie tekhnologii na zhelezнодорожном транспорте»* (Proceedings of the All-Russian scientific-technical conference with the international participation: Resource saving technologies in railway transport). In 2 parts. Krasnoyarsk: Grotesk, 2005, part 1, pp. 209 – 212.

4. Ushakov S. Yu. About a new procedure for determining the electrical energy imbalance in train traction [O novom poryadke opredeleniya nebalansa ehlektricheskoy ehnergii na tyagu poezdov]. *Prakticheskaya konferenciya «Matematika-nauka»* (Practical conference «Mathematics-Science»). Omsk: OSTU, 2010. pp. 72 – 76.

5. Cheremisin V. T., Ushakov S. Yu., Yemelyanenkova E. L. Reduction of the electric energy imbalance in train traction determined by the electricity meters on traction substations and electric rolling stock [Snizhenie nebalansa ehlektricheskoy ehnergii na tyagu poezdov po schetchikam tyagovyh podstancij i ehlektropodvizhnogo sostava]. *Zhelezнодорожный транспорт – Railway transport*. 2011, no. 2, pp. 45 – 48.

6. Markvardt K. G. Electricity supply of electrified railways [Elektrosnabzhenie ehlektrificirovannyh zheleznyh dorog]. Moscow: Transport, 1982, 265 p.

7. Methodology for calculating the technological losses of electric power in traction power supply devices [Metodika rascheta tekhnologicheskikh poter' ehlektoenergii v ustrojstvah tyagovogo elektrosnabzheniya]. Moscow: VNIIZhT, 1994, 30 p.

8. Kashtanov A. L., Komyakova O. O. Estimation of power flows in a DC traction network according to the data of the automated system of ASMUE FCS [Ocenka peretokov moshchnosti v tyagovoj seti postoyannogo toka po dan-nym avtomatizirovannoj sistemy ASMUEH FKS]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Bulletin of Voronezh State Technical University*. 2015, no. 3, vol. 11, pp. 130 – 133.

9. Altangere Enkh-Amgalan, Kashtanov A. L., Nikiforov M. M. Theoretical propositions on the coordination of external and traction power supply systems in the design of AC railways [Teoreticheskie polozheniya v voprose soglasovaniya sistem vneshnego i tyagovogo ehlektrosnabzheniya pri proektirovanii zheleznyh dorog peremennogo toka]. *Vestnik transporta Povolzh'ya – Bulletin of Povolzhye Transport*. 2017, no. 2 (62), pp. 24 – 29.

10. Ushakov S. Yu. Estimation of the electric power consumption and technical losses of electric energy determining accuracy in train traction [Ocenka tochnosti opredeleniya raskhoda i tekhnicheskikh poter' ehlektri-cheskoy ehnergii na tyagu poezdov]. *Materialy nauchno-prakticheskoy konferencii: «Innovacionnye proekty i novye tekhnologii na zhelezno-dorozhnom transporte»* (Proceedings of the scientific-practical conference: Innovative projects and new technologies in railway transport). Omsk, 2009. pp. 116 – 122.

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

### **Каштанов Алексей Леонидович**

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046, Российская Федерация.

Кандидат технических наук, начальник научно-производственной лаборатории «Энергосбережение и энергоэффективность на железнодорожном транспорте», доцент кафедры «Теоретическая электротехника», ОмГУПС.

Тел.: +7 (3812) 44-39-23.

E-mail: kesh-al@rambler.ru

### **Никифоров Михаил Михайлович**

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

### **Kashtanov Alexey Leonidovich**

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx av., Omsk, 644046, Russia.

Cand.Tech.Sci., Head of Research and Production Laboratory «Energy saving and energy efficiency on the railway Transport», The Senior Lecturer Of Chair «Theoretical Electrical Engineering», OSTU.

Phone: (3812) 44-39-23.

E-mail: kesh-al@rambler.ru

### **Nikiforov Mikhail Mikhailovich**

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx av., Omsk, 644046, Russia.

Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046, Российская Федерация.

Кандидат технических наук, заместитель директора научно-исследовательского института «Энергосбережение на железнодорожном транспорте», ОмГУПС.

Тел.: +7 (3812) 44-39-23.

E-mail: nikiforovmm@rambler.ru

Cand.Tech.Sci. Deputy Director of the Research Institute "Energy saving on the railway transport", OSTU.

Тел.: +7 (3812) 44-39-23.

E-mail: nikiforovmm@rambler.ru

## Ушаков Сергей Юрьевич

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046, Российская Федерация.

Кандидат технических наук, старший-научный сотрудник научно-исследовательской части, ОмГУПС.

Тел.: +7 (3812) 44-39-23.

E-mail: ushakovsj@gmail.com

## Ushakov Sergey Yurjevich

Omsk State Transport University (OSTU)

35, Marx av., Omsk, 644046, Russia.

Cand.Tech.Sci., Senior Researcher Of Research Sector, OSTU.

Phone: +7 (3812) 44-39-23

E-mail: ushakovsj@gmail.com

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Каштанов, А. Л. Новые подходы к исследованию проблемы небаланса электроэнергии на тягу поездов [Текст] / А. Л. Каштанов, М. М. Никифоров, С. Ю. Ушаков // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2017. – № 2 (30). – С. 77 – 87.

## BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Kashtanov A. L., Nikiforov M. M., Ushakov S. Y. The new approaches to the problem of the electric power imbalance in train traction research. Journal of Transsib Railway Studies, 2017, vol. 30, no. 2, pp. 77 – 87 (In Russian).

УДК 621.311

## В. Л. Незевак

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС), г. Омск, Российская Федерация

## ОСНОВНЫЕ ЗАВИСИМОСТИ ИЗМЕНЕНИЯ ОБЪЕМА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ ОТ ПАРАМЕТРОВ ГРАФИКА ДВИЖЕНИЯ ПЕЗДОВ НА УЧАСТКАХ ПОСТОЯННОГО ТОКА С I-м ТИПОМ ПРОФИЛЯ

**Аннотация.** В статье рассматриваются вопросы оценки влияния графика движения поездов на объем электропотребления на тягу на участках постоянного тока с I-м типом профиля пути. Предложены параметры графика движения поездов, оказывающие влияние на расход электроэнергии на тягу на участках постоянного тока с I-м типом профиля пути. В число основных параметров расписания включены статистические величины и параметры, характеризующие условия пакетного пропуска поездов, остановки и твердые нитки расписания грузовых поездов. На основе имитационного моделирования получены основные зависимости изменения объема электроэнергии на тягу на участке в системе тягового электроснабжения при изменении параметров расписания движения поездов. Полученные зависимости изменения объема электроэнергии на тягу позволяют выполнить оценку и определить диапазоны изменения параметров графика, в которых вариация объема минимальна. в рассмотренных диапазонах изменения параметров графика движения поездов объем электроэнергии для участков постоянного тока с I-м типом профиля изменяется в пределах 1 % при постоянстве прочих факторов.

**Ключевые слова:** система тягового электроснабжения, расход электроэнергии, постоянный ток, технические потери электроэнергии, график движения поездов, параметры расписания движения, имитационное моделирование, статистические показатели, зависимости изменения расхода электроэнергии.

Vladislav. L. Nezevak

Omsk State Transport University, Omsk, Russia

## MAIN DEPENDENCES OF FLOW CHANGE ELECTRICITY FROM THE TRAFFIC TRAFFIC SCHEDULE ON DC CURRENT SITES FOR SECTIONS WITH I TYPE OF PROFILE

**Abstract.** *The article discusses the assessment of the impact of train schedule on the amount of electricity consumption for traction on sections of DC I-th profile type way. The proposed parameters of the train schedule, influencing the electricity consumption for traction on sections of DC I-th profile type way. The major scheduling options included statistical quantities and parameters characterizing the conditions of the batch passing trains, stop and solid thread schedules for truck-driving. Based on simulation modeling provided the main based on changes in the volume of electric energy for traction on the plot of the traction electric supply system when changing the parameters of the timetable. The dependences of the volume change of electrical energy for traction allow you to evaluate and determine the ranges of the parameters of the graph in which the variation of volume is minimal. in the considered ranges of the parameters of the train schedule, the amount of electricity for the areas of DC with the I-th profile type varies within 1 % with the constancy of other factors..*

**Keywords:** *traction power supply system, electric power consumption, direct current, technical losses of electric power, train schedule, timing parameters, simulation simulations, statistical indicators, dependence of changes in electric power consumption.*

Энергетическая эффективность перевозочного процесса зависит от большого количества его участников и целого ряда влияющих на него факторов. На сегодняшний день основной потенциал повышения энергетической эффективности перевозочного процесса связан с двумя хозяйствами железнодорожного транспорта – локомотивным и управления движением [1, 2]. На долю указанных хозяйств приходится около 60 – 70 % потенциальной экономии электроэнергии на электрифицированных участках, на хозяйство электроснабжения – около 10 – 15 %. В этом отношении расход электроэнергии на тягу определяется тремя основными группами факторов, соответствующими указанным хозяйствам: энергетические показатели движения поезда, характеристики системы тягового электроснабжения и условия организации движения. Поиск путей повышения энергетической эффективности с учетом трех групп факторов является актуальной задачей и может быть рассмотрен в аспекте оценки влияния графика движения поездов на расход электроэнергии на тягу и энергетическую эффективность перевозочного процесса.

В настоящее время для анализа и прогнозирования расхода электроэнергии на тягу в холдинге «РЖД» используется свыше двадцати нормообразующих факторов, учитываемых в Методике анализа расхода топливно-энергетических ресурсов на тягу поездов и прогнозирования [3]: средняя масса поезда и средняя нагрузка на ось вагона, техническая скорость, коэффициент участковой скорости, доля порожнего пробега вагонов и др. Указанные факторы оказывают влияние на удельный расход электроэнергии электроподвижного состава (ЭПС) и в конечном счете на расход электроэнергии с учетом технических потерь, потребляемый на тягу электроподвижным составом по данным приборов учета тяговых подстанций.

Необходимо отметить, что при анализе расхода электроэнергии на тягу ЭПС не рассматриваются факторы, связанные со взаимным расположением ЭПС на участке, оказывающие влияние на технические потери, уровень рекуперации и напряжения в контактной сети. Указанное влияние обусловлено зависимостью объема рекуперации и технических потерь электроэнергии в системе тягового электроснабжения от порядка проследования поездами межподстанционных зон системы тягового электроснабжения и их взаимного расположения. В текущей отчетности холдинга «РЖД» эти факторы не учитываются и их влияние не оценивается.

График движения поездов (ГДП) определяется целым рядом параметров, к которым относятся размеры движения, тонно-километровую работу, скорость движения поездов в различных видах движения, коэффициент участковой скорости, расположение поездов на участке (при пакетном, пачечном, пачечно-пакетном пропуске поездов), межпоездные интервалы и др. Оценка влияния графика движения поездов на расход электроэнергии на тягу рассматривается в двух аспектах – влияние расписания движения поездов [4 – 6] и влияние других факторов, в том числе нормообразующих. В дальнейшем рассматривается решение задачи влияния ГДП на расход электроэнергии в первом аспекте.

С целью оценки влияния ГДП на расход электроэнергии необходимо определить его составляющие. Определение расхода электроэнергии на тягу поездов и небаланса электроэнергии в тяговой сети для участка железной дороги в настоящее время осуществляется по данным автоматизированных информационно-измерительных систем коммерческого учета тяговых подстанций (программный комплекс «Энергия Альфа 2»). Для определения небаланса электроэнергии в тяговой сети используются данные приборов учета электроэнергии на электроподвижном составе.

В общем виде расход электроэнергии на тягу на участке складывается из расхода по тяговым подстанциям (ТП) на тягу по всем видам движения ЭПС и отбора от контактной сети на прочие нужды с учетом небаланса:

$$W_{\text{участок}}^{\text{баз}} = W_{\text{ЭЧЭ груз}}^{\text{баз}} + W_{\text{ЭЧЭ хоз}}^{\text{баз}} + W_{\text{ЭЧЭ пас}}^{\text{баз}} + W_{\text{ЭЧЭ ман}}^{\text{баз}} + W_{\text{ЭЧЭ отб}}^{\text{баз}}, \quad (1)$$

при определении расхода по ЭПС на участке

$$W_{\text{участок}}^{\text{баз}} = \frac{100}{100 - \delta_{\text{участок}}^{\text{баз}}} \cdot \left( W_{\text{ЭПС груз}}^{\text{баз}} + W_{\text{ЭПС хоз}}^{\text{баз}} + W_{\text{ЭПС пас}}^{\text{баз}} + W_{\text{ЭПС ман}}^{\text{баз}} + W_{\text{ЭЧЭ отб}}^{\text{баз}} \right), \quad (2)$$

объем электроэнергии на тягу суммарно в грузовом, хозяйственном и пассажирском (дальнего следования и пригородного сообщения) видах движения с учетом небаланса в базовом периоде для полигона постоянного тока определяется по формулам, тыс. кВт·ч:

$$W_{\text{ЭЧЭ (груз+хоз+пас)}}^{\text{баз}} = W_{\text{участок}}^{\text{баз}} - \frac{W_{\text{ЭПС ман}}^{\text{баз}} + W_{\text{ЭЧЭ отб}}^{\text{баз}}}{100 - \delta_{\text{участок}}^{\text{баз}}} \cdot 100, \quad (3)$$

где  $W_{\text{участок}}^{\text{баз}}$  – объем электроэнергии по вводам преобразовательных трансформаторов ТП, питающих контактную сеть, тыс. кВт·ч;  $W_{\text{ЭЧЭ } i}^{\text{баз}}$  – объем электроэнергии с учетом небаланса и рекуперации по вводам преобразовательных трансформаторов ТП по видам движения – грузовое, хозяйственное, пассажирское, маневровая работа, тыс. кВт·ч;  $W_{\text{ЭПС } i}^{\text{баз}}$  – объем электроэнергии с учетом рекуперации и без учета небаланса по видам движения – грузовое, хозяйственное, пассажирское, маневровая работа, тыс. кВт·ч;  $W_{\text{ЭЧЭ отб}}^{\text{баз}}$  – объем электроэнергии без учета небаланса на нетяговые нужды от присоединений контактной сети к ТП (отбор от контактной сети), тыс. кВт·ч;  $\delta_{\text{участок}}^{\text{баз}}$  – относительная величина небаланса на рассматриваемом участке по соответствующему роду тока за базовый период, %, определяется по формуле:

$$\delta_{\text{участок}}^{\text{баз}} = \left( 1 - \frac{W_{\text{ЭПС тяга}}^{\text{баз}} + W_{\text{ЭЧЭ отб}}^{\text{баз}}}{W_{\text{участок}}^{\text{баз}}} \right) \cdot 100; \quad (4)$$

$W_{\text{ЭПС тяга}}^{\text{баз}}$  – объем электроэнергии во всех видах движения и на маневровой работе с учетом рекуперации, тыс. кВт·ч;

$\delta_{\text{участок}}^{\text{баз}}$  – относительная величина небаланса на рассматриваемом участке по соответствующему роду тока за базовый период, %, определяется по формуле:

$$\delta_{\text{участок}}^{\text{баз}} = \left( 1 - \frac{W_{\text{ЭПС тяга}}^{\text{баз}} + W_{\text{ЭЧЭ отб}}^{\text{баз}}}{W_{\text{участок}}^{\text{баз}}} \right) \cdot 100. \quad (5)$$

В общем случае объем электроэнергии на тягу, потребленный по ТП, определяется следующими составляющими: расходом электроэнергии ЭПС, небалансом электроэнергии на тягу и уровнем рекуперации:

$$W_{\text{ЭЧЭ}}^{\text{баз}} = \sum_i W_{i \text{ ЭПС}}^{\text{баз}} + \sum_j W_{\text{ЭЧЭ отб}}^{\text{баз}} + \frac{\delta_{\text{участок}}^{\text{баз}}}{100} \cdot W_{\text{участок}}^{\text{баз}}. \quad (6)$$

Первое слагаемое в выражении (6) содержит зависящие (грузовое, пассажирское, хозяйственное) и независящие от ГДП (маневровая работа) величины – объемы электроэнергии по видам движения. Если принять неизменным второе слагаемое, то изменение объема электропотребления на тягу определяется изменением электропотребления на тягу в грузовом, пассажирском и хозяйственном движении и уровнем небаланса.

Существующие системы формирования прогнозного графика движения поездов, например, аппаратно-программный комплекс «Эльбрус», используемый в ОАО «РЖД» [4], позволяют строить прогнозный график движения поездов с определенными параметрами. Это позволяет проводить работу по сокращению остановок грузовых поездов путем введения твердых ниток и, тем самым, по снижению электропотребления на тягу поездов. Эффект от введения данной технологии рассчитывается путем сравнения приведенных объемов электроэнергии (с учетом массы и технической скорости) до внедрения и после внедрения систем построения графиков движения без учета параметров расписания ГДП.

Оценку влияния расписания движения поездов на расход электроэнергии на тягу в условиях формирования или изменения нормативного ГДП следует проводить на основе данных приборов учета электроэнергии тяговых подстанций, позволяющих провести сравнительный анализ различных вариантов ГДП по критерию расхода электроэнергии или энергетической эффективности. В этом случае расход электроэнергии на маневровую работу и отбор электроэнергии от контактной сети принимается неизменным.

Поскольку на расход электроэнергии или на энергетическую эффективность оказывает влияние множество различных факторов, при решении задачи по оценке влияния параметров ГДП следует принять, что прочие факторы являются неизменными. В связи с этим исследование влияния ГДП следует проводить при постоянстве остальных факторов, не относящихся непосредственно к параметрам графика движения (объемы работы, масса поезда, нагрузка на ось, техническая скорость и др.).

При решении задачи о формировании ГДП в условиях известного объема перевозок, количества ниток поездов, технической скорости следует оценить влияние расписания поездов при неизменности указанных параметров на основе следующих параметров: межпоездной интервал в пакетах (пачках); интервал между пакетами (пачками); количество пакетов и по-

ездов в пакетах графика; количество технологических и продолжительность остановок грузовых поездов, обусловленных стыковками расписаний железных дорог, необходимостью обработки поездов и сбоями в организации движения; количество твердых ниток в графике движения грузовых поездов; относительное время следования поездов в пакетах и др.

Следует отметить, что существуют и другие факторы, проявляющиеся на участках: преобладание пассажирского движения, многочисленные остановки пригородных и пассажирских поездов [7], наличие скоростного движения и др.

В настоящее время известно несколько методов определения тяговой нагрузки, основанных на использовании данных о размерах движения поездов. Условно указанные методы расчетов можно разделить на две группы. К первой группе относятся методы, основанные на заданных размерах движения (объемах перевозок). Рассматриваемые методы основаны на статистической обработке ГДП с целью получения распределения количества грузовых и пассажирских поездов на межподстанционных зонах, интервалов следования между поездами, масс поездов в течение суток и другого с целью получения на их основе графика электрических нагрузок тяговых подстанций. Ко второй группе относятся методы, основанные на размерах движения, заданных ГДП. Данные методы основаны на расписании движения поездов на участке: метод равномерного сечения ГДП, метод характерных сечений ГДП и метод непрерывного исследования ГДП.

Применение методов обеих групп ориентировано на определение расхода электроэнергии по тяговым подстанциям участка железной дороги с различной степенью точности, поскольку в них используются различные интервалы для определения нагрузки поезда и суммарных нагрузок подстанций. В настоящее время используемый для проведения тяговых и электрических расчетов систем тягового электроснабжения комплекс программ «КОРТЭС» реализует метод равномерных сечений ГДП с интервалом расчетов 15, 30, 60 с, что в ряде случаев вводит дополнительную погрешность в результаты расчетов, особенно при отсутствии учета фактора изменения напряжения [8], в то время как современные устройства регистрации параметров движения поезда позволяют сократить интервал измерений до 1 с [9].

Указанный метод позволяет получить оценку величины расхода электроэнергии на участке железной дороги для заданного ГДП. Расчеты для определения влияния ГДП на объем электропотребления на тягу проводятся на основе характеристик СТЭ и ЭПС, а также расписания движения поездов. На первом этапе выполняются тяговые расчеты, позволяющие получить параметры движения поезда в нормальном режиме с учетом остановок. Отдельно выполняются тяговые расчеты для твердых ниток грузовых поездов с учетом имеющегося резерва времени хода по межстанционным перегонам с целью оптимизации выбега. На втором этапе на базе выполненных тяговых расчетов по ГДП осуществляется расчет нагрузок тяговых подстанций, в ходе которого определяется расход электроэнергии на тягу с учетом технических потерь электроэнергии, в том числе в условиях применения рекуперативного торможения.

Для целей оценки влияния ГДП на расход электроэнергии по тяговым подстанциям предлагается использовать метод расчета, основанный на расписании движения поездов и позволяющий учесть целый ряд факторов: рекуперативное торможение ЭПС, потери в тяговой сети и оборудовании подстанций, наличие в графике движения твердых ниток грузовых поездов и остановок поездов в расписании. Недостатком данного метода является относительно большая трудоемкость, связанная с необходимостью проведения целой серии расчетов для различных вариантов формирования ГДП на основе имитационного моделирования. Для этих целей целесообразно использовать программный комплекс «КОРТЭС». Обобщение полученных результатов имитационного моделирования позволяет перейти к аналитическому описанию полученных зависимостей и использовать их в дальнейшем. Необходимо отметить, что имитационное моделирование позволяет сохранить неизменными ряд нормообразующих факторов: объем работы, размеры движения, масса состава, нагрузка на ось и др.

Это позволяет проводить сравнение различных вариантов ГДП в условиях изменения только параметров расписания. Имитационная модель, реализующая взаимодействие СТЭ и ЭПС, позволяет получить результаты по оценке влияния ГДП на расход электроэнергии с учетом следующих основных характеристик участка железной дороги и электроподвижного состава: количество главных путей; тип системы тягового электроснабжения (постоянного тока, переменного тока напряжением 25 кВ или 2×25 кВ); серии электроподвижного состава; тип профиля пути участка.

Реализация в модели различных ГДП при сохранении всех основных нормобразующих факторов позволяет получить данные для анализа изменения расхода электроэнергии на тягу. Основой для получения оценки влияния графика движения поездов на расход электроэнергии будет являться один из вариантов ГДП с минимальным расходом электроэнергии на тягу по тяговым подстанциям. В связи с этим графики движения при имитационном моделировании формируются путем изменения одного или нескольких параметров графика (интервала попутного следования, количества пакетов и поездов в пакетах графика, количества остановок грузовых поездов и количества твердых ниток грузовых поездов в графике).

С целью оценки влияния параметров ГДП на расход электроэнергии на тягу необходимо ввести ряд формализуемых параметров, характеризующих ГДП. Некоторые статистические показатели напрямую для этих целей не подходят, поскольку не в полной мере характеризуют расписание поездов. Например, среднее значение межпоездного интервала в одном направлении определяется по выражению:

$$\tau_{\text{cp}} = \frac{\sum_i \tau_i}{N} = \frac{1440}{N} = \text{const}, \quad (7)$$

где  $\tau_i$  –  $i$ -й межпоездной интервал;  $N$  – количество поездов в ГДП в обоих направлениях; 1440 – количество минут в сутках.

Поскольку в рамках суток сумма в числителе равна продолжительности суток (в минутах), выражение (7) в условиях сохранения количества поездов будет характеризовать различные ГДП одним значением среднего межпоездного интервала при любых межпоездных интервалах и поэтому для характеристики уникальных графиков не подходит. В связи с этим представляется целесообразным использовать среднее значение межпоездного интервала не для всего ГДП, а применительно к пакетам поездов или внепакетному времени ГДП. Среднеквадратичное значение межпоездных интервалов, дающее возможность оценить отклонение межпоездных интервалов от среднего значения, позволяет охарактеризовать изменение межпоездных интервалов:

$$\sigma_{\tau} = \sqrt{\frac{\sum_i (\tau_i - \tau_{\text{cp}})^2}{N}}. \quad (8)$$

Необходимо отметить, что указанная характеристика, определяемая для суточного графика на основе всех интервалов, не позволяет отдельно оценивать межпоездные интервалы в пакете (пачке), интервалы между пакетами (пачками) и количество пакетов (пачек) в графике движения, а также остановки поездов и может применяться только для оценки равномерности межпоездных интервалов в суточном графике движения. В этом случае среднеквадратичное отклонение можно также использовать для пакетного или внепакетного времени отдельно.

Изменение среднеквадратичного значения межпоездных интервалов аналогично изменению среднего значения. В общем случае при увеличении межпоездных интервалов в пакете коэффициент вариации и среднеквадратичное значение межпоездных интервалов снижаются.

ся. Для значения межпакетного интервала 50 мин изменение характера обусловлено исчерпанием времени суток.

Недостатком использования среднеквадратичного отношения межпоездных интервалов является то, что одно и то же значение соответствует множеству вариантов исполненного ГДП с различным расходом электроэнергии на тягу, что затрудняет применение этого параметра при оценке влияния расписания. Например, как это видно из рисунка 2,  $\sigma_\tau$  принимает значение 180 для множества вариантов. Среднеквадратическое отклонение интервалов ГДП увеличивается при росте значения количества поездов в пакете и уменьшении интервала в диапазоне от 20 до 8 мин.

С целью учета параметров ГДП предлагаются следующие показатели графика движения:

- 1) средний межпоездной интервал в пакете и вне пакетов поездов;
- 2) относительные значения времени следования поездов в пакетах и между пакетами поездов;
- 3) среднее количество поездов в пакете графика (при изменении количества поездов в пакетах);
- 4) удельный вес остановок грузовых поездов;
- 5) удельный вес твердых ниток грузовых поездов.

Относительное значение времени следования поездов в пакетах  $\alpha$  (пачках – для однопутных участков), определяется по формуле:

$$\alpha = \frac{\sum_{i=1} \tau_{i \text{ пак}}}{1440 \cdot K_{\text{гл}}}, \quad (9)$$

где  $\tau_{i \text{ пак}}$  –  $i$ -й межпоездной интервал в пакетах (пачках), определяемый в обоих направлениях движения, мин;  $K_{\text{гл}}$  – количество главных путей на расчетном полигоне, шт.

Минимальное количество поездов в пакете для расчета  $\alpha$  принимается равным трем.

Относительное значение времени между пакетами (пачками)  $\alpha_{\text{пак}}$  определяется так:

$$\alpha_{\text{пак}} = \frac{\sum_{i=1} \tau_{i \text{ меж. пак}}}{1440 \cdot K_{\text{гл}}}, \quad (10)$$

где  $\tau_{i \text{ меж. пак}}$  –  $i$ -й интервал между пакетами (пачками), определяемый в обоих направлениях движения, мин.

Интервал между пакетами (пачками) в случае наличия одиночных поездов определяется суммированием времени между последним поездом в пакете и одиночными поездами или между одиночными поездами.

Среднее значение количества поездов в пакетах  $n_{\text{ср}}$  определяется по формуле, шт.:

$$n_{\text{ср}} = \frac{\sum_{i=1} n_i}{K_{\text{пак}}}, \quad (11)$$

где  $n_{\text{ср}}$  – количество поездов в  $i$ -м пакете, шт.;  $K_{\text{пак}}$  – количество пакетов поездов в графике движения, шт.

В случае пропуска одиночных поездов среднее значение количества поездов в пакете (пачке) принимается равным нулю (влияние на ГДП отсутствует).

Удельный вес остановок в графике движения поездов  $\beta$  определяется по формуле, о. е.:

$$\beta = \frac{n_o}{N \cdot K_{гл}}, \quad (12)$$

где  $n_o$  – количество ниток грузовых поездов, содержащих остановки, обусловленные стыковками расписаний по диспетчерским участкам или по стыкам железных дорог, шт.;  $N$  – количество пар поездов в графике движения.

С целью учета изменения графиков исполненного движения выражения (9) и (10) могут быть пересмотрены для учета среднего межпоездного интервала и межпакетного интервала соответственно. Указанное обстоятельство обусловлено тем, что в ГДП может иметь место небольшое количество пакетов (например, один). В этих условиях введение среднего межпоездного интервала позволяет помимо относительного времени следования поездов в пакетах или между пакетами учесть и условия проследования (интервал).

Удельный вес твердых ниток в графике движения  $\gamma$  определяется по формуле, о. е.:

$$\gamma = \frac{n_s}{N \cdot K_{гл}}, \quad (13)$$

где  $n_s$  – количество энергосберегающих ниток графика, шт.

Рассмотрим, как изменяется коэффициент вариации и среднее квадратичное значение для межпоездных интервалов ГДП, имеющего размеры движения 50 пар грузовых поездов в сутки на двухпутном участке. Примем диапазон изменения межпоездного интервала в пакете от 10 до 20 мин с шагом 1 мин, а диапазон изменения интервала между пакетами от 30 до 50 с шагом 10 мин. Изменение интервалов следования в общем виде приводит к изменению коэффициента вариации (рисунок 1), определяемого по выражению:

$$CV_\tau = \frac{\sigma_\tau}{\tau_{ср}}. \quad (14)$$

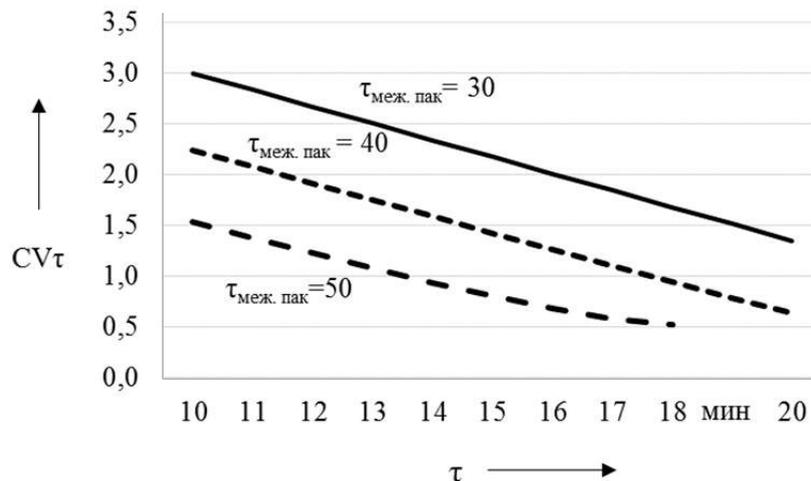


Рисунок 1 – Зависимость коэффициента вариации от изменения межпоездных интервалов ГДП

Результаты имитационного моделирования для двухпутного участка постоянного тока показывают, что с увеличением относительного времени следования в пакетах поездов происходит увеличение расхода электроэнергии на тягу за счет изменения технических потерь. В технические потери здесь входят потери в тяговой сети и потери в преобразовательных агрегатах. На рисунке 3 представлены графики изменения расхода электроэнергии на участке с I-м типом профиля пути системы тягового электроснабжения постоянного тока при изменении относительного времени следования поездов в пакете. Увеличение интервала в пакете,

приводящее к разреженности ГДП, обуславливает сокращение диапазона изменения значений при изменении параметров графика в рассматриваемом диапазоне.

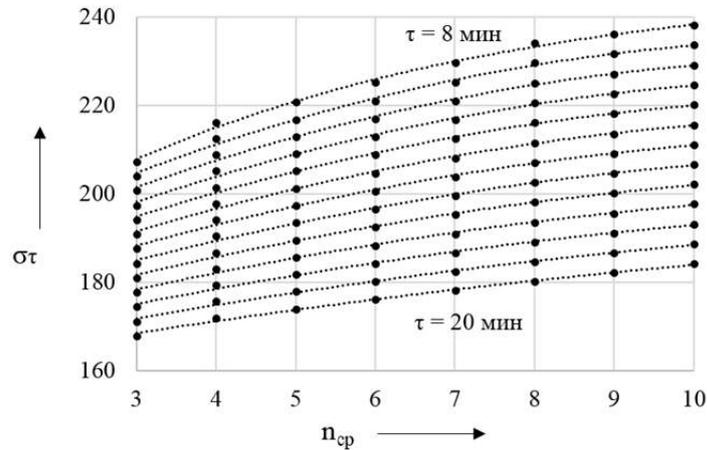


Рисунок 2 – Изменение  $\sigma$  межпоездных интервалов от количества поездов в пакете

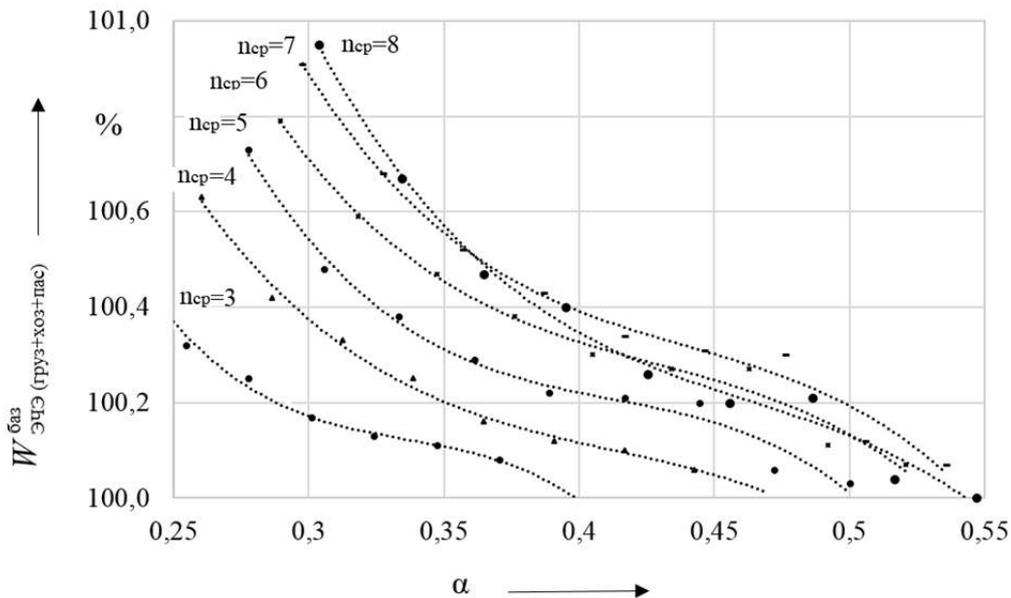


Рисунок 3 – Изменение расхода электроэнергии на участке с I-м типом профиля по поездам в пакете

Рассмотрение изменения функции расхода электроэнергии показывает, что при увеличении  $n_{ср}$  вариация функции объема электроэнергии растет в диапазоне возможных изменений  $\alpha$ :

$$\forall_{\alpha} W(\alpha, n_{ср n}) > \forall_{\alpha} W(\alpha, n_{ср n-1}) > \forall_{\alpha} W(\alpha, n_{ср n-2}) > \dots > \forall_{\alpha} W(\alpha, n_{ср 1}) \quad (15)$$

при  $n_{ср 1} < n_{ср 2} < n_{ср 3} < \dots < n_{ср n}$ ,

где  $W(\alpha, n_{ср})$  – зависимость расхода электроэнергии от относительного значения времени следования поездов в пакетах  $\alpha$  и среднего количества поездов в пакете  $n_{ср}$ , шт.

С увеличением относительного значения времени между пакетами при увеличении количества поездов в пакете (рисунок 4) наблюдается большее изменение расхода электроэнергии:

$$\forall \alpha_{\text{меж.пак}} W(\alpha_{\text{меж.пак}}, n_{\text{ср}1}) < \forall \alpha_{\text{меж.пак}} W(\alpha_{\text{меж.пак}}, n_{\text{ср}2}) < \forall \alpha_{\text{меж.пак}} W(\alpha_{\text{меж.пак}}, n_{\text{ср}3}) < \dots < \forall \alpha_{\text{меж.пак}} W(\alpha_{\text{меж.пак}}, n_{\text{ср}n}), \quad (16)$$

при  $n_1 < n_2 < n_3 < \dots < n_{\text{ср}n}$ .

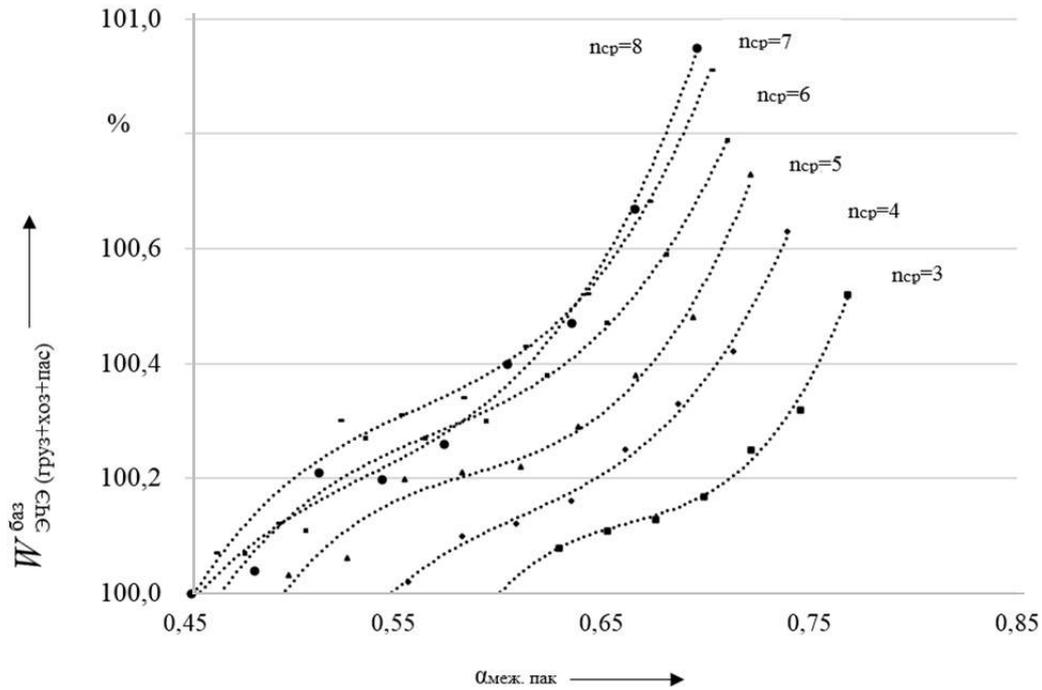


Рисунок 4 – Зависимость расхода электроэнергии от интервала между пакетами поездов

Рассмотрим изменение коэффициента вариации для расхода электроэнергии для двухпутного участка I-го типа профиля пути постоянного тока при изменении интервала следования в пакетах (рисунок 5). При увеличении среднего межпоездного интервала в пакете происходит снижение коэффициента вариации расхода электроэнергии на тягу.

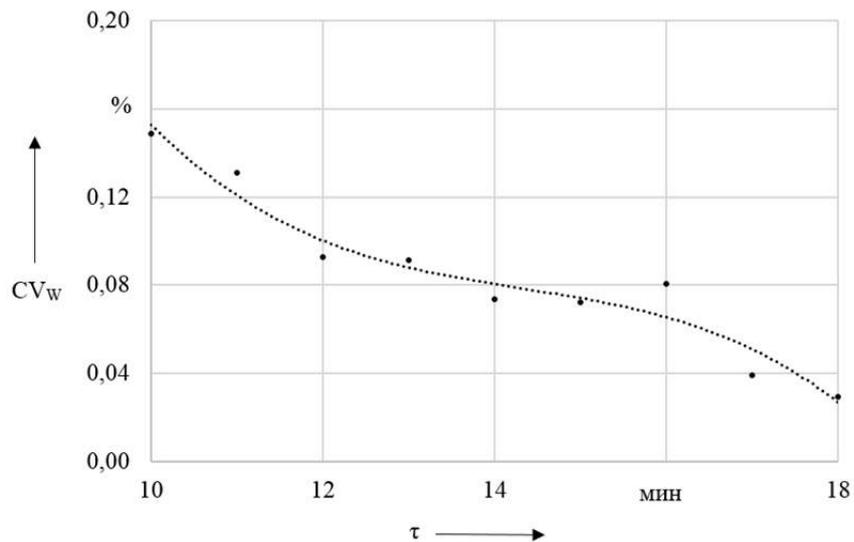


Рисунок 5 – График зависимости изменения коэффициента вариации расхода электроэнергии от межпоездного интервала

Аналогичное влияние на объем электроэнергии на тягу оказывает изменение остановок грузовых поездов и введение в ГДП твердых ниток в грузовом движении. В первом случае с увеличением остановок наблюдается увеличение электропотребления, во втором – сокращение.

Полученные зависимости позволяют оценить расход электроэнергии на тягу с учетом небаланса на участке железной дороги, приняв за основу отчетные данные о расходе, определяемом по выражениям (3) или (6). Принимая за базовое значение объем электроэнергии на тягу, определяемый по отчетным данным холдинга «РЖД», на основе выявленных зависимостей изменения параметров расписания движения поездов можно выполнить оценку изменения расхода электроэнергии при изменении ГДП.

Таким образом, по результатам рассмотрения полученных зависимостей изменения объема электроэнергии от параметров графика движения поездов для участков постоянного тока с I-м типом профиля пути можно сделать следующие выводы:

статистические показатели для характеристики межпоездного интервала суточного графика движения поездов имеют ряд недостатков при оценке влияния расписания графика движения на объем электроэнергии, в связи с этим могут применяться только для характеристики движения в пакетах или вне их;

предложенные параметры графика движения поездов позволяют оценить влияние расписания движения на объем электропотребления на тягу и могут использоваться для оценки его изменения на основе эксплуатационной отчетности по различным видам движения;

полученные зависимости изменения объема электроэнергии на тягу позволяют выполнить оценку и определить диапазоны изменения параметров графика, в которых вариация объема минимальна;

в рассмотренных диапазонах изменения параметров графика движения поездов объем электроэнергии для участков постоянного тока с I-м типом профиля изменяется в пределах 1 % при постоянстве прочих факторов;

полученные зависимости позволяют создать основу для построения аналитических выражений, описывающих влияние параметров графика движения поездов на объем электроэнергии на тягу, и могут быть использованы для дополнения перечня нормообразующих факторов.

## *Список литературы*

1. Энергетическая стратегия холдинга «РЖД» до 2020 года и на перспективу до 2030 года: Распоряжение ОАО «РЖД» от 14.12.2016 № 2537р [Текст] / ОАО «РЖД». М., 2016.
2. Никифоров, М. М. Нормативно-правовое обеспечение деятельности по энергосбережению в холдинге «Российские железные дороги» и механизмы ее реализации [Текст] / М. М. Никифоров, В. Л. Незевак // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2015. – № 4 (24). – С. 68 – 75.
3. Методика анализа и прогнозирования расхода ТЭР на тягу поездов [Текст] / ОАО «РЖД». – М., 2014.
4. Полигонные технологии движения поездов по графикам на основе автоматизированной системы «Эльбрус» [Текст] / Л. А. Мугинштейн, С. А. Виноградов и др. // Железнодорожный транспорт. – 2015. – № 3. – С. 13 – 19.
5. Гателюк, О. В. Оптимизация графика движения поездов по критерию расхода электрической энергии на тягу на участках железных дорог в условиях применения рекуперативного торможения [Текст] / О. В. Гателюк, В. Л. Незевак, А. П. Шатохин // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2015. – № 1 (21). – С. 59 – 69.
6. Митрофанов, А. Н. Прогнозирование показателей энергообеспеченности перевозочного процесса на базе многофакторных моделей [Текст] / А. Н. Митрофанов, Г. М. Третьяков, С. В. Копейкин // Электротехника. – 2017. – № 3. – С. 12 – 17.

7. Черемисин, В. Т. Пути повышения энергоэффективности на малом кольце московской железной дороги с использованием инверторов [Текст] / В. Т. Черемисин, А. С. Вильгельм, В. Л. Незевак // Транспорт Урала / Уральский гос. ун-т путей сообщения. – Екатеринбург. – 2014. – № 3 (42). – С. 90 – 94.

8. Вильгельм, А. С. Совершенствование способа определения энергетических показателей движения поезда и системы тягового электроснабжения [Текст] / А. С. Вильгельм, В. Л. Незевак // Вестник ЮУрГУ. Сер. Энергетика / Южно-Уральский гос. ун-т. – Челябинск, 2016. – Т. 16. – № 3. – С. 32 – 40.

9. Istomin S. Analyse des Betriebs der Lokomotive 2ES10 auf der Gleichstromstrecke der Swerdlowsker Eisenbahn/ S. Istomin, V. Nesewak // Elektrische Bahnen. – München: Oldenbourg Industrieverlag GmbH, 2015. – № 4. – P. 186 – 189.

## References

1. *Energeticheskaiia strategiia kholdinga «RZhD» do 2020 goda i na perspektivu do 2030 goda: Rasporiazhenie OAO «RZhD» ot 14.12.2016 № 2537 r* (Energy strategy of the holding "RZD" until 2020 and for the future until 2030: Order of JSC Russian Railways of December 14, 2016 No. 2537r.). Moscow, 2016.

2. Nezevak V. L., Nikiforov M. M. Normative and legal support of energy saving activities in the holding «Russian Railways» and mechanisms for its implementation [Normativno-pravovoe obespechenie deiatel'nosti po energosbere-zheniiu v kholdinge «Rossiiskie zheleznye dorogi» i mekhanizmy ee realizatsii]. *Izvestiia Transsiba – The journal of Transsib Railway Studies*, 2015, no. 4 (24), pp. 68 – 75.

3. *Metodika analiza i prognozirovaniia raskhoda TER na tiagu poezdov* (Methodology for the analysis and forecasting of fuel consumption for rail traction). Moscow: OAO «RZhD», 2014.

4. Muginshtein L. A., S. A. Vinogradov, Kiriakin V. Iu. Polygon technology of train traffic on graphs based on the automated system «Elbrus» [Poligonnyie tekhnologii dvizheniia poezdov po grafikam na osnove avtomatizirovannoi sistemy «El'brus»]. *Zheleznodorozhnyi transport – Rail transport*, 2015, no. 3, pp. 13 – 19.

5. Gateliuk O. V., Nezevak V. L., Shatokhin A. P. Optimization of train traffic schedule by the criterion of electric power consumption for traction on sections of railways under the conditions of applying regenerative braking [Optimizatsiia grafika dvizheniia poezdov po kriteriiu raskhoda elektricheskoi energii na tiagu na uchastkakh zheleznykh dorog v usloviiakh primeneniia rekuperativnogo tormozheniia] *Izvestiia Transsiba – The journal of Transsib Railway Studies*, 2015, no. 1 (21), pp. 59 – 69.

6. Mitrofanov A. N., Tret'iakov G. M., Kopeikin S. V. Prediction of energy supply indicators of the transportation process on the basis of multifactor models [Prognozirovanie pokazatelei energoobespechennosti perevozochного protsessа na baze mnogofaktornykh modelei]. *Elektrotekhnika – Electrical Engineering*, 2017, no. 3, pp. 12 – 17.

7. Cheremisin V. T., Vil'gel'm A. S., Nezevak V. L. Ways to improve energy efficiency on a small ring of the Moscow railway using inverters [Puti povysheniia energoeffektivnosti na malom koltse moskovskoi zheleznoi dorogi s ispol'zovaniem invertorov]. *Transport Urala – Transport of the Urals*, 2014, no. 3 (42), pp. 90 – 94.

8. Vil'gel'm A. S., Nezevak V. L. Perfection of the method for determining the energy indicators of train traffic and traction power supply system [Sovershenstvovanie sposoba opredeleniia energeticheskikh pokazatelei dvizheniia poezda i sistemy tiagovogo elektrosnabzheniia]. *Vestnik Iu-UrGU. Serii «Energetika» – Vestnik ISU. Series «Energy»*, 2016, T. 16, no. 3, pp. 32 – 40.

9. Istomin S. Analyse des Betriebs der Lokomotive 2ES10 auf der Gleichstromstrecke der Swerdlowsker Eisenbahn/ S. Istomin, V. Nesewak // Elektrische Bahnen. – München: Oldenbourg Industrieverlag GmbH, 2015. № 4. – P. 186 – 189.

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

### Незевак Владислав Леонидович

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046, Российская Федерация.

Старший научный сотрудник научно-исследовательской части, кандидат технических наук, доцент кафедры «Электроснабжение железнодорожного транспорта», ОмГУПС.

Тел.: +7 (3812) 44-39-23.

E-mail: NezevakWL@mail.ru

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Незевак, В. Л. Основные зависимости изменения объема электроэнергии от параметров графика движения поездов на участках постоянного тока с I-м типом профиля [Текст] / В. Л. Незевак // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2017. – № 2 (30). – С. 87 – 99.

## INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

### Nezevak Vladislav Leonidovich

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx av., Omsk, 644046, Russia.

Senior researcher of Scientific-research part, Ph. D. in engineering, associate professor of the department «Electrical supply of railway transport», OSTU.

Phone: +7 (3812) 44-39-23.

E-mail: [NezevakWL@mail.ru](mailto:NezevakWL@mail.ru)

## BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Nezevak V. L. Main dependences of flow change electricity from the traffic traffic schedule on dc current sites for sections with I type of profile. Journal of Transsib Railway Studies, 2017, vol. 30, no. 2, pp. 87 – 99. (In Russian).

УДК 621.396.62, 621.396.67

**В. С. Марюхненко, Е. С. Гармышева**

Иркутский государственный университет путей сообщения (ИрГУПС), г. Иркутск, Российская Федерация

## АНАЛИЗ ПРИМЕНЕНИЯ ФАЗИРОВАННЫХ АНТЕННЫХ РЕШЕТОК ДЛЯ ПРИЕМА СИГНАЛОВ СПУТНИКОВОЙ РАДИОНАВИГАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ В КОМПЛЕКСЕ ЛОКОМОТИВНЫХ УСТРОЙСТВ БЕЗОПАСНОСТИ

**Аннотация.** Выполнены анализ структуры комплекса локомотивных устройств безопасности (КЛУБа) и сравнение технических характеристик и особенностей конструкции наземных стационарных и транспортных антенн приемной аппаратуры глобальной спутниковой радионавигационной системы (СРНС). На основе анализа важности применения в структуре КЛУБа приемной аппаратуры СРНС и особенностей ее функционирования показано, что уменьшение ошибок позиционирования локомотивов, связанное с необходимостью повышения отношения «сигнал/шум» на входе приемника, может быть достигнуто применением активных фазированных антенных решеток (АФАР), которые способны формировать узконаправленные диаграммы направленности с коммутацией направлений их максимумов в соответствии с координатами навигационных спутников рабочего созвездия. Рассмотрены особенности формирования узконаправленных диаграмм направленности и возможности управления ими в линейной и плоской равномерных АФАР. Показано, что применение АФАР в наземной аппаратуре пользователя сопряжено с необходимостью: а) изменения подхода к конструированию ее для конкретных областей применения – в конструкции должна быть предусмотрена плоская поверхность необходимого размера; б) модернизации алгоритма приема и обработки сигналов СРНС, который должен учитывать конечное время переключения диаграмм направленности, угол маски, количество и координатное распределение навигационных спутников в рабочем созвездии.

**Ключевые слова:** спутниковая радионавигационная система, антенна, диаграмма направленности, активная фазированная антенная решетка.

## ANALYSIS OF THE RECEPTION OF SIGNALS OF THE SATELLITE RADIONAVIGATION SYSTEM BY PHASED ANTENNA GRIDS IN A COMPLEX OF SAFETY DEVICES FOR LOCOMOTIVE

**Abstract.** *The structure of a complex of locomotive safety devices (CLSD) is analyzed. A comparison of technical characteristics and design features of ground stationary and transport antennas of the receiving equipment of the global satellite radio navigation system (SRNS) is made. On this basis, the importance of using SRNS in the CLSD structure is shown. It has also been shown that the decrease in locomotive positioning errors associated with the need to increase the signal-to-noise ratio at the input of the receiver can be achieved by the use of active phased array antennas (APARs). APAR are able to form narrowly directional patterns with the commutation of their maximum directions in accordance with the coordinates of the constellation's navigation satellites. Features of the formation of narrowly directional patterns and the possibility of controlling them in a linear and flat uniform APAR are considered. It is shown that the use of APAR in the ground-based equipment of the user is associated with the need: a) changing the approach to designing it for specific applications, - a flat surface of the required size should be provided in the design; b) the modernization of the algorithm for receiving and processing SRNS signals, which must take into account the finite switching time of the radiation patterns, the angle of the mask, the number and coordinate distribution of the navigation satellites in the working constellation.*

**Keywords:** *satellite radio navigational system, the active phased array antenna, the directional pattern.*

С развитием интенсивности перевозок ужесточаются требования к их безопасности, которые влекут за собой и ужесточение требования к физической, структурной и информационной надежности функционирования комплексов локомотивных систем автоматического управления [1]. В свете этих требований созданы и постоянно совершенствуются на физическом, технологическом и алгоритмическом уровнях комплексные локомотивные устройства безопасности (КЛУБы) [2]. Структурно КЛУБ представляет модули, состоящие из функционально взаимосвязанных подсистем: управления, диагностики, регистрации, сигнализации, обеспечения безопасности движения. В структуру системы обеспечения безопасности движения включена наземная приемная аппаратура (НПА) спутниковой радионавигационной системы (СРНС), это обусловлено необходимостью высокой точности позиционирования поезда (локомотива) на станциях и на перегонах.

Решение посредством СРНС задач навигации [3], которые во многом определяют безопасность транспортных средств, осуществляется путем обработки радиосигналов от навигационных спутников (НС), принимаемых НПА пользователя [4]. Передача сигналов навигационных спутников и их прием НПА пользователя производятся посредством передающих и приемных антенн. Передающая антенна устанавливается на борту НС. Она преобразует колебания электрического тока, формируемые бортовым радиопередатчиком навигационных сигналов, в электромагнитные волны. Приемная антенна решает обратную задачу – задачу преобразования электромагнитных колебаний в колебания электрического тока или напряжения, регистрируемые в электрических цепях как радионавигационные сигналы. Важнейшим параметром, которым характеризуется антенна, является коэффициент направленного действия<sup>1</sup> [5, 6].

Вследствие ограниченной мощности (порядка  $18 \div 27$  дБ/Вт) радиопередатчиков, устанавливаемых на навигационных спутниках СРНС, больших расстояний (сотни километров) от НС до наземной аппаратуры пользователей, а также необходимости облучать электромагнитными колебаниями значительную площадь (порядка  $2 \cdot 10^6$  м<sup>2</sup>) на поверхности Земли

<sup>1</sup> В электродинамике [6] доказывается теорема обратимости, на основании которой электродинамические параметры конкретной антенны, передающей (излучающей) радиосигналы на длине волны  $\lambda$ , сохраняются, если переключить антенну на прием радиосигналов той же длины волны.

мощность сигнала НС в точке расположения НПА пользователя незначительна и составляет  $-150 \div -165$  дБ/Вт [4]. Одновременно с сигналом НС приемник НПА пользователя принимает множество шумов и помех различного происхождения.

При условии, что мощность  $P_i$  передатчика  $i$ -го НС равномерно распределяется по поверхности Земли в телесном угле  $\Theta < 4\pi$ , а также, если ограничиться только внутренними шумами приемника НПА пользователя, отношение мощности сигнала к мощности шумов на его входе

$$\gamma_{\text{вх } i} = \frac{P_i G_{\text{LEU}}}{\Theta D_i^2 T_R \Pi_{\text{LEU}}}, \quad (1)$$

где  $G_{\text{LEU}}$  – коэффициент направленного действия приемной антенны НПА пользователя;  $D_i$  – расстояние между  $i$ -м НС и антенной НПА пользователя;  $\Pi_{\text{НПА}}$  – эффективная полоса приемника НПА пользователя;  $T_R$  – температура нагрева эквивалентного резистора, согласованного с сопротивлением излучения антенны, создающего на входе приемника НПА пользователя шумы, равные по мощности его внутренним шумам.

Как следует из формулы (1), отношение «сигнал/шум» на входе приемника НПА теоретически можно увеличить в  $G_{\text{LEU}}$  раз. Следовательно, для улучшения качества обработки навигационных сигналов и повышения точности навигационных измерений необходимо увеличивать коэффициент направленного действия антенны в направлении НПА – НС. Так как для функционирования НПА пользователя необходим прием навигационных сигналов от  $r > 4$  НС, то следует создавать  $r$  суженных диаграмм направленности, направленных на свой НС каждая (рисунок 1). Существуют естественные ограничения на создание линейной, или апертурной, антенны с  $r$  узкими, да еще и сканирующими положение НС диаграммами направленности [7].

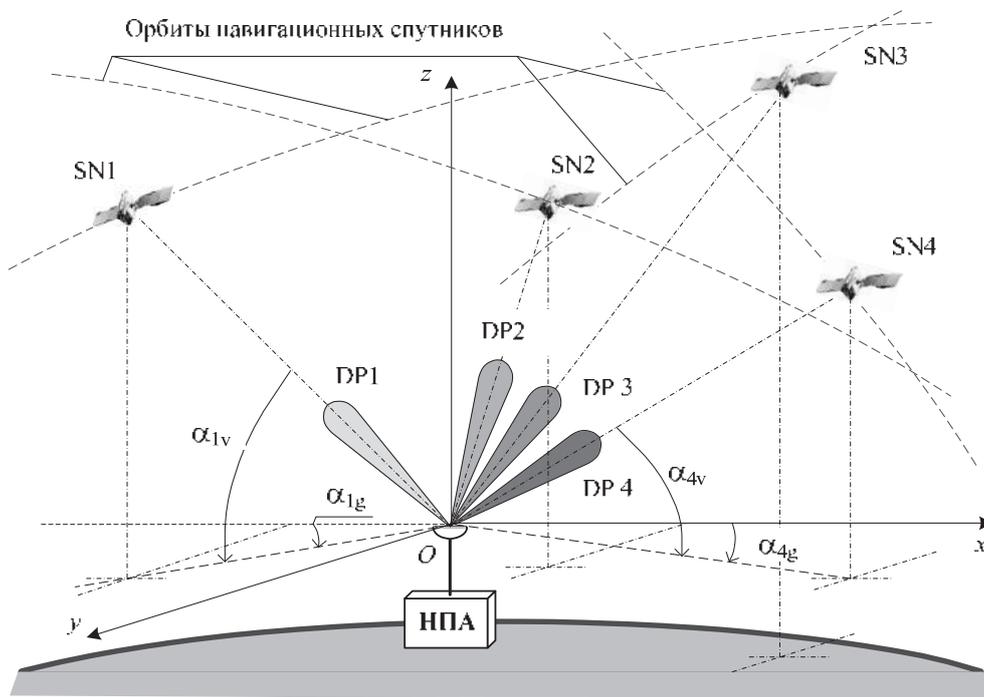


Рисунок 1 – Наземная приемная аппаратура пользователя с «веером» диаграмм направленности с явно выраженными направленными свойствами: SN – навигационный спутник; DP – диаграмма направленности;  $Oxyz$  – прямоугольная система координат, связанная с положением наземного приемника;  $Oxy$  – горизонтальная плоскость, касательная к поверхности Земли в точке  $O$ ;  $Ox$ ,  $Oz$  – координатные оси, направленные соответственно вдоль касательной к Земле на восток и вдоль местной вертикали;  $Oy$  – координатная ось, перпендикулярная плоскости  $Oxz$  и составляющая с осями  $Ox$  и  $Oz$  правую тройку

Поэтому выход следует искать в применении активных фазированных антенных решеток, которые способны создавать относительно узкие диаграммы направленности с практически мгновенным сканированием [8 – 10].

**Цель статьи:** исследование необходимости, возможности и особенностей применения антенных фазированных решеток в приемной наземной аппаратуре пользователя глобальной спутниковой навигационной системы.

## 1. Особенности антенн наземной аппаратуры пользователей СРНС.

Анализ существующих конструкций, схем и алгоритмов работы наземной аппаратуры пользователей СРНС изначально затруднен тем, что их описание преимущественно носит рекламный характер. Наиболее доступны для анализа источники по аппаратуре GPS<sup>2</sup>. Это объясняется тем, что GPS имеет удовлетворительные и доступные широкому кругу профессиональных и индивидуальных потребителей точностные характеристики измерений координат при приемлемых стоимостных, массогабаритных и энергетических показателях наземной аппаратуры пользователей [4].

Конструктивно наземная аппаратура пользователей GPS представляет собой, как правило, прямоугольный корпус с панелью управления и индикации, микросхемнопроцессорную плату приема и обработки сигналов и встроенную антенну или вывод для подключения внешней антенны. Антенны приемников наземной аппаратуры пользователей подразделяются на внешние и встроенные, а те и другие – на пассивные и активные [2].

Пассивная антенна выполняет роль преобразователя электромагнитных колебаний (ЭМК) в колебания электрического тока, предварительной широкополосной частотной фильтрации и должна быть согласована с первым каскадом обработки принимаемого сигнала. Активная антенна конструктивно содержит встроенный предварительный широкополосный маломощный усилитель на несущей частоте [5, 8 – 10].

Внешние антенны монтируются на выносе, соединяются с наземной аппаратурой пользователя при помощи кабеля с характеристическим сопротивлением  $\rho = 50$  Ом и применяются на крупных подвижных объектах, в подземных паркингах, на нижних этажах зданий и на многих других стационарных объектах транспорта и инфраструктуры, эксплуатация которых нуждается в навигационной информации.

Внутренние антенны используются в малогабаритной наземной приемной аппаратуре СРНС преимущественно легкового автотранспорта, беспилотных летательных аппаратов, индивидуального пользования, ими комплектуют также сотовые телефоны [9].

Из анализа доступных источников следуют особенности антенн наземной аппаратуры пользователей СРНС – общие, не зависящие от типа и фирмы-производителя (таблица 1), и особенные, которые заметно различаются между собой (таблица 2) [8, 9].

Таблица 1 – Общие параметры антенн существующей наземной аппаратуры пользователей GPS

Полоса частот $P_{07}$ , МГц	Волновое сопротивление $\rho$ , Ом	Коэффициент шума $N_{ш}$ , дБ	Диапазон температур, °С	Поляризация принимаемых ЭМК
$1574 \pm 10$	50	1,5	$(-40) \div (+85)$	Правая, круговая

Следует отметить самую общую особенность сведений об антеннах наземной аппаратуры пользователей СРНС всех типов и производителей – это отсутствие данных об их направленных свойствах или хотя бы о коэффициенте направленного действия (КНД). Причиной этого являются следующие особенные требования к приему сигналов навигационных спутников СРНС и возможностям синтеза узконаправленных антенн.

<sup>2</sup> GPS (Global system of positioning) – глобальная спутниковая радионавигационная система (США).

1) Наземный приемник через одну и ту же антенну должен принимать сигналы от рабочего созвездия НС в количестве от четырех и более. Спутники имеют различные координаты и одновременно «захватить» их можно только широкой диаграммой направленности.

2) Антенны с узким лепестком диаграммы направленности должны иметь линейные размеры  $L \gg \lambda_{\text{СРНС}}$ , где  $L$  – линейные размеры антенны,  $\lambda_{\text{СРНС}} \approx 20$  см – средняя длина волны принимаемых сигналов, что явно противоречит требованиям миниатюризации и широкой доступности услуг спутниковой навигации.

3) Важность направленных свойств антенны настолько высока для улучшения всех показателей качества приема сигналов НС и применение в наземной аппаратуре пользователей СРНС в каком-либо виде направленных антенн – такое важное техническое преимущество, что производитель обязательно упомянул бы об этом в рекламных целях.

На этом основании можно сделать вывод о том, что антенны, применяемые в настоящее время в наземной аппаратуре пользователей СРНС всех производителей, – это всенаправленные антенны.

Таблица 2 – Электрические характеристики и габариты антенн наземной аппаратуры пользователей

Тип антенны	Полоса частот, МГц	Коэф. шума, дБ	Коэффициент усиления, дБ	Габариты антенны, мм	Область применения
Внешняя спиральная ГЛОНАСС/GPS-антенна	1575,42 ± 10	2,5	26	165 × 78,74	Морская и речная система навигации
Встраиваемая патч-антенна, узкополосная СВЧ-антенна	1575,42 ± 10	1,5	28	16 × 16 × 5,8	Мобильные устройства
Внешняя спиральная для установки на корпус или монтажа GPS L1, GPSGL-TMG-26N	1590 ± 30	< 2,5 при +25°C	26,5 ± 3 (GPS), 24,5 ± 3 (ГЛОНАСС)	126 × 81	Системы синхронизации времени
Внешняя спиральная антенна GPSGL-TMG-SPI-40NCB	1590 ± 30	< 2,5 при +25°C	26,5 ± 3 (GPS), 24,5 ± 3 (ГЛОНАСС)	184 × 81	Системы синхронизации времени (базовые станции)
Бортовые Риск-антенны серии 12100	1575,42 ± 10 (GPS L1)	2,5	26 (46)	68,6 × 19	Морские бортовые навиг. системы
Многополосные антенны 3947D	1575,42	1,5	28	132,1 × 58,9 × 8,5	Мобильные устройства, для высокоточных измерений
Встроенные GPS-антенны	1575,42 ± 10	1,5	0,5	16 × 16 × 5,8	Мобильные устройства
Внешняя активная антенна Lairas P1 устройств GPS для наземного транспорта	1575,42±3	2,0	4,0	49,3 × 49,3 × 17	Для мониторинга транспорта
Внешняя активная антенна профессионального уровня TW3400/TW3402 для приема сигналов GPS L1, ГЛОНАСС L1 и SBAS (WAAS, EGNOS и MSAS)	От 1574 до 1606	≤ 1		66,5 × 21	Для внешнего использования
Встраиваемые антенны серии WS3950/60		0,8		28 × 28 × 9	Стационарные устройства
Антенна серии WS3910		0,8	28 ÷ 28,5	45 × 51 × 12	Для внешнего использования

## 2. Диаграмма направленности плоской фазированной антенной решетки.

Предлагаемая активная фазированная антенная решетка для наземной аппаратуры пользователей СРНС представляет собой  $N$  относительно простых, с широкой диаграммой направленности (ДН) идентичных антенн (излучателей<sup>3</sup>) диапазона СВЧ, расположенных на корпусе наземной аппаратуры пользователей с определенной регулярностью, подключенных к приемнику навигационных сигналов (ПРН СС) через фидер с управляемыми фазовращателями и векторным сумматором (рисунок 2) [8 – 10].

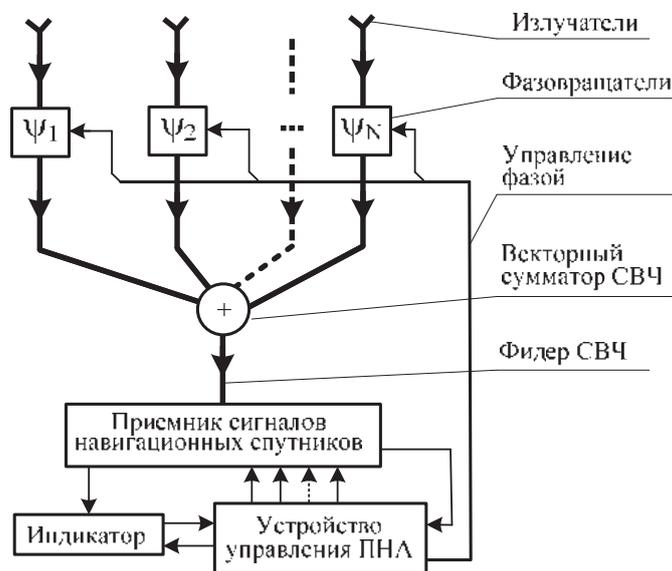


Рисунок 2 – Основные элементы фазированной антенной решетки

В качестве излучателей в наземной аппаратуре пользователей целесообразно использовать микрополосковые слабонаправленные антенны, которые органично вписываются в конструкцию аппаратуры с микросхемной схемотехникой.

### 2.1. Линейная фазированная антенная решетка.

Простой способ расположения излучателей АФАР – образование на прямоугольном корпусе наземной аппаратуры пользователей плоской решетки из  $n$  рядов по  $m$  излучателей в каждом ряду (рисунок 3), так что

$$N = m \cdot n, \quad (2)$$

где  $m$  и  $n$  – целые положительные числа.

Каждый  $j$ -й,  $j = 1, 2, \dots, n$ , ряд образует линейную антенную решетку (АР), состоящую из  $m$  излучателей с шагом  $d_x$ . Пусть некоторая  $j$ -я линейная антенная решетка (рисунок 4) образована рядом из нечетного количества  $m = 2k+1$ ,  $k = 1, 2, 3, \dots$ , излучателей, совпадающего с осью  $Ox$ , и запитана гармоническими токами с равномерным амплитудным и синфазным распределением:

$$i_{jq}(t) = I_{0jq} \sin(\omega t + \phi_{0jq}), \quad j = 1, 2, \dots, n, \quad (3)$$

где  $I_{0jq} = I_0 = \text{const}$  и  $\phi_{0jq} = \phi_0 = \text{const}$  – соответственно их амплитуда и начальная фаза;  $q = 1, 2, \dots, m$  – номер излучателя в ряду;  $\omega = 2\pi f = 2\pi c/\lambda$  – циклическая частота гармонического тока, питающего каждый  $q$ -й излучатель;  $\lambda$  – длина волны электромагнитных колебаний, соответствующая частоте  $f$ ;  $c = 3 \cdot 10^8$  м/с.

<sup>3</sup> Антенна наземной аппаратуры пользователей работает только на прием сигналов навигационных спутников, но, где это удобно, при анализе фазированной антенной решетки (ФАР) используется такая же терминология, как и при работе антенны, работающей на передачу (см. сноску 1).

Так как излучатели рассматриваемого  $j$ -го,  $j = 1, 2, \dots, n$ , ряда запитаны токами с заданными фазами (3), то образовавшаяся линейная антенная решетка является фазированной.

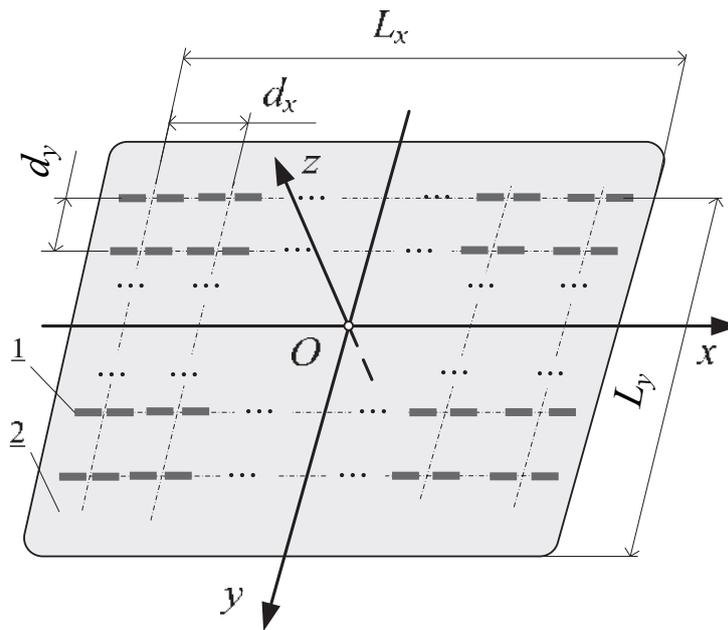


Рисунок 3 – Прямоугольная антенная решетка из микрополосковых вибраторов (1) на диэлектрической подложке (2)

Каждый излучатель рассматриваемой линейной ФАР является источником сферических волн электромагнитного излучения. Складываясь, они создают при фазовом распределении (3) линейный, параллельный оси  $Ox$  фазовый фронт (см. 5 на рисунке 4). Результат интерференции сферических волн определяет «в бесконечности» по оси  $Oz$  направленные свойства АР [5, 6]. Сечение амплитудной ДН линейной фазированной антенной решеткой плоскостью  $zOx$  – это функция угла  $\Theta$ , отсчитываемого от оси  $Oz$ . Оно (сечение) описывается выражением:

$$G_{APx}(\Theta) = G_{1x}(\Theta)F_x(\Theta, m, d_x, \lambda), \quad (4)$$

где  $G_{1x}(\Theta)$  и  $F_x(\Theta, m, d_x, \lambda)$  – сечение той же плоскостью нормированной амплитудной ДН одиночного излучателя, помещенного в точку  $O$  (см. рисунок 4);  $F_x(\Theta, m, d_x, \lambda)$  – множитель линейной антенной решетки:

$$F_x(\Theta, m, d_x, \lambda) = \frac{|\sin\{\pi m d_x (\sin \Theta) / \lambda\}|}{m \cdot |\sin\{\pi d_x (\sin \Theta) / \lambda\}|}. \quad (5)$$

Если все излучатели изотропны, т. е.  $G_{1x}(\Theta) \equiv 1$ , то выражение (5) по сути есть описание диаграммы направленности рассматриваемой ФАР.

Выражение (5) проиллюстрировано графиками на рисунке 5. Из них следует, что для фиксированного количества излучателей форма ДН решетки зависит от отношения  $\nu = (d_x/\lambda)$  – шага к длине волны излучаемых (принимаемых) ЭМК и от количества излучателей  $m$ . При  $\nu > 1$  диаграмма направленности имеет многолепестковый характер с несколькими равноамплитудными максимумами, из которых центральный (главный) лепесток имеет (по уровню 0,5) ширину  $2\Theta_{0,5}(\nu)$  (рисунок 5, а). Между равноамплитудными максимумами находятся боковые лепестки. При  $\nu < 1$  диаграмма направленности имеет один основной лепесток, дополненный боковыми лепестками.

С увеличением количества излучателей  $m$  основной лепесток диаграммы направленности линейной АР сужается – уменьшается его ширина  $2\Theta_{0,5}(m)$  по уровню 0,5, а также увеличивается количество боковых лепестков и снижается их уровень (рисунок 5, б).

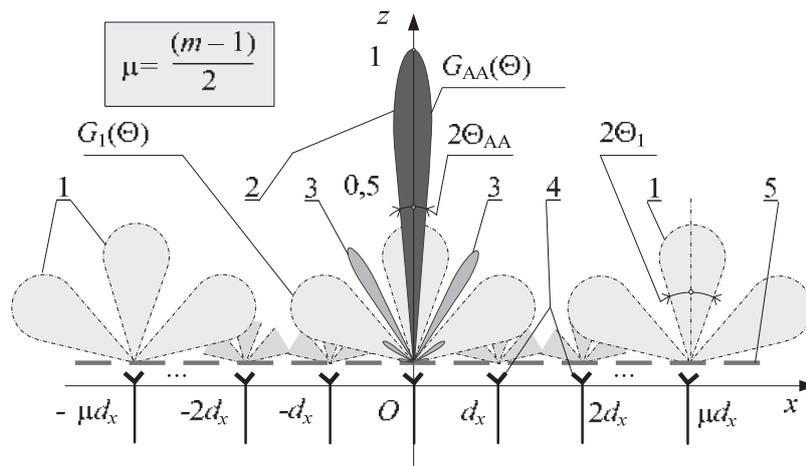


Рисунок 4 – Образование фазового фронта и диаграммы направленности линейной антенной решетки  $G_{AA}(\Theta)$ : 1 – диаграмма направленности  $G_1(\Theta)$  каждого из  $m$  излучателей; 2 и 3 – соответственно основной и боковые лепестки ДН излучателей; 4 – излучатели; 5 – линия фазового фронта линейной ФАР;  $Ox$  и  $Oz$  – ортогональные координатные оси;  $2\Theta_{0,5}^{AA}$  и  $2\Theta_{0,5}^1$  – ширина основного лепестка ДН на уровне половинной мощности соответственно антенной решетки и одиночного излучателя

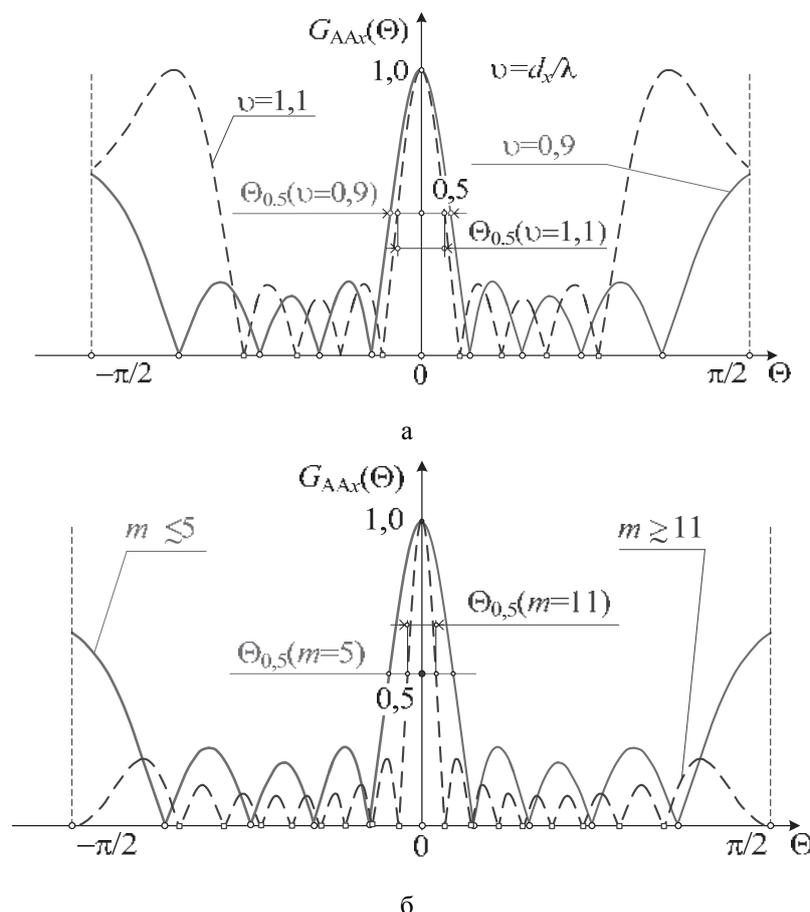


Рисунок 5 – Зависимость диаграммы направленности линейной системы из  $m = 5$  излучателей от отношения  $d_x/\lambda$  – шага АР к длине волны ЭМК (а), и от количества излучателей  $m$  при отношении  $d_x/\lambda = 0,9$  (б)

В общем случае уравнение линии фазового фронта системы излучателей (см. обозначение 5 на рисунке 4) может отличаться от линейного, но если фазовое распределение токов  $i_{jq}(t)$  излучателей (см. формулу (3)) с равномерным амплитудным распределением такое, что фазы соседних излучателей отличаются на величину  $\alpha_x = \text{const}$  (рисунок 6):

$$\Phi_{j(q-1)} - \Phi_{jq} = \alpha_x, \quad q = 1, 2, \dots, m, \quad (6)$$

где  $\Phi_{jq} = (\omega t + \phi_{jq})$  и  $\phi_{jm} = (m - 1)\alpha_x$ ,

то линия фазового фронта поворачивается на угол  $\psi_x$  (рисунок 7):

$$\psi_x(\alpha_x, \lambda, d_x) = \arccos[\alpha_x \cdot \lambda / (2\pi d_x)] = \arccos[\alpha_x \cdot c / (\omega d_x)]. \quad (7)$$

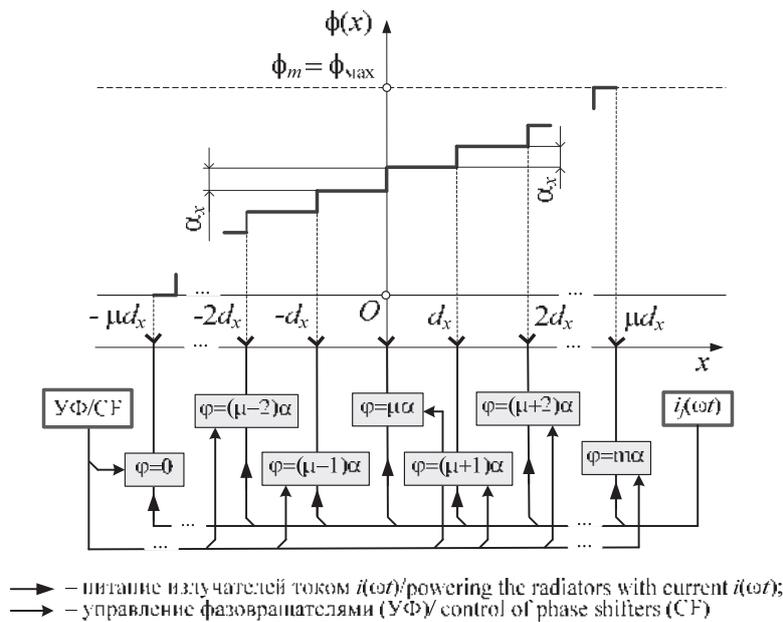


Рисунок 6 – Формирование линейного закона фазового распределения токов вдоль линейки антенной решетки

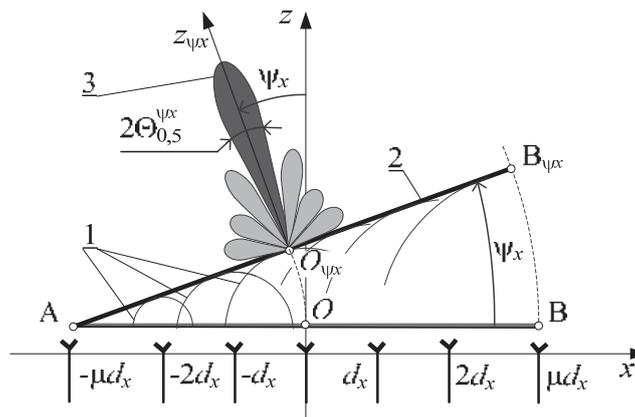


Рисунок 7 – Формирование линейного фазового фронта системы излучателей 2 из сферических фазовых фронтов излучателей 1, запитанных в соответствии с распределением (6). Диаграмма направленности линейной антенной решетки 3, повернутая на угол  $\psi$

Из формулы (7) следует, что управлять положением фазового фронта 2, т. е. и направлением основного лепестка ДН линейной антенной решетки, можно изменениями:

- а) шага  $d_x$  антенной решетки;

- б) частоты  $\omega$  принимаемых электромагнитных колебаний;
- в) фазы  $\alpha_x$  токов, питающих излучатели.

Не все указанные способы реализуемы для приемников наземной аппаратуры пользователей. Шаг антенной решетки – это ее конструктивная данность, и выбор его величины доступен только на этапе проектирования антенны. Центральная частота принимаемых ЭМК, как и необходимая полоса пропускания антенны, определяется техническими параметрами СРНС.

Относительно незначительные ограничения существуют лишь на управление фазовым распределением излучателей.

При фазировании излучателей согласно закону (6) фазовый фронт (см. рисунок 6) остается линейным, но наклоненным к оси  $Ox$  под углом  $\psi_x$  (см. рисунок 7). Так что угловой коэффициент линии АВ

$$k_x = \text{tg}[\psi_x(\alpha_x, \lambda, d_x)]. \quad (8)$$

При любом способе управления линия фазового фронта поворачивается на угол  $\psi_x$  вокруг центра – точки А (см. рисунок 7). Точка В описывает окружность радиусом

$$L_x = m d_x, \quad (9)$$

и переходит в точку  $B_{\psi_x}$ , а фазовый центр, лежащий на середине отрезка АВ (точка  $O$ ), таким же образом переходит в точку  $O_{\psi_x}$ .

Ширина диаграммы направленности  $2\Theta_{0,5}^{\psi_x}$  зависит от угла  $\psi_x$  (рисунок 8). Наиболее узкая ДН формируется при  $\psi_x = 0$  [4, с. 401]:

$$2\Theta_{0,5}^{(0)x} \approx (0,888 \cdot \lambda) / L_x, \quad (10)$$

а при  $\psi_x = \pm\pi/2$  она расширяется до

$$2\Theta_{0,5}^{(\pi/2)x} \approx 2\sqrt{(0,888 \cdot \lambda) / L_x}. \quad (11)$$

Формулы (7) – (11) показывают, что применение линейной фазированной антенной решетки с управлением фазой излучателей согласно условию (6) позволяет выбирать и ширину основного лепестка ДН в плоскости  $xOz$ , и его ориентацию в этой плоскости в пределах  $\pm\pi/2$  относительно оси  $Oz$ .

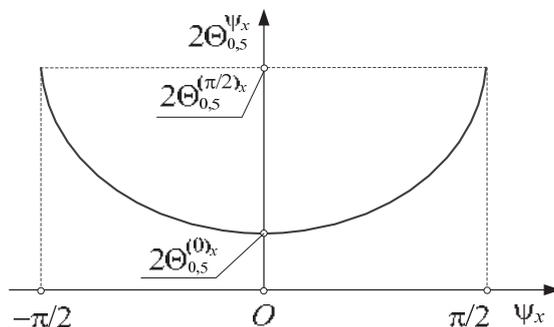


Рисунок 8 – Примерная зависимость ширины диаграммы направленности линейной ФАР от угла наклона  $\psi_x$  фазового фронта к оси  $Ox$

## 2.2. Плоская фазированная антенная решетка.

Согласно рассмотренным в подразд. 2.1 закономерностям каждый  $j$ -й,  $j=1,2,\dots, n$ , ряд излучателей представляет собой линейную (одномерную) ФАР. Каждая  $j$ -я ФАР создает

свою диаграмму направленности с фазовым центром на середине длины отрезка  $L_y$  (см. формулы (4), (5), (9) – (11)). При идентичности излучателей и известном законе фазирования питающих их токов (см. формулы (3) и (6)) все  $n$  сформированных этими ФАР сечения каждой из диаграмм направленности одинаковы, но сдвинуты относительно друг друга по координате  $Oy$  на шаг  $d_y$  (рисунки 4, 9). Таким образом, создается ряд эквивалентных антенн, каждая из которых имеет узкую ДН  $G_{APx}(\Theta_x)$  относительно оси  $Ox$  (4) и близкую к изотропной ДН  $G_{1y}(\Theta_y)$  относительно оси  $Oy$ . Этот ряд антенн образует *вторичную* линейную с почти равномерным распределением ФАР (см. рисунок 7), к которой применимы рассуждения, приведенные в подразд. 2.1.

Сечение амплитудной ДН *вторичной* фазированной антенной решетки плоскостью  $zOy$ , – это функция угла  $\Theta_y$ , отсчитываемого от оси  $Oz$ . Оно (сечение) описывается выражением

$$G_{APy}(\Theta_y) = G_{1y}(\Theta_y) \cdot F_y(\Theta_y, n, d_y, \lambda), \quad (12)$$

где  $G_{1y}(\Theta)$  и  $F_y(\Theta, n, d_y, \lambda)$  – соответственно сечение той же плоскостью нормированной амплитудной ДН одиночного излучателя, помещенного в точку  $O$  (см. рисунок 4) и множитель линейной антенной решетки<sup>4</sup>:

$$F_y(\Theta, n, d_y, \lambda) = \frac{|\sin\{\pi n d_y (\sin \Theta) / \lambda\}|}{n \cdot |\sin\{\pi d_y (\sin \Theta) / \lambda\}|}. \quad (13)$$

Если все излучатели изотропны, т. е.  $G_{1y}(\Theta) \equiv 1$ , то выражение (13), по сути, есть описание диаграммы направленности *вторичной* ФАР.

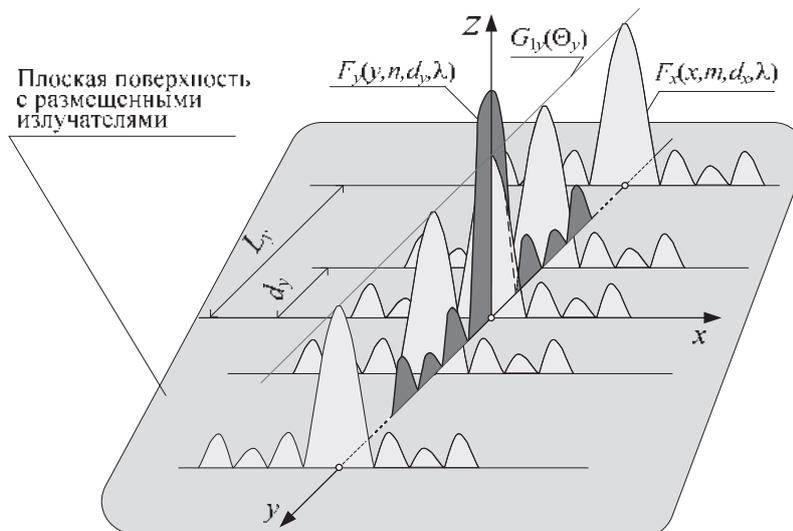


Рисунок 9 – Образование *вторичной* фазированной антенной решетки, излучатели которой расположены вдоль оси  $Oy$ , а диаграмма направленности описывается формулой (12)

Направление максимума ДН *вторичной* ФАР аналогично формулам (6) и (7) определяется углом

$$\psi_y(\alpha_y, \lambda, d_y) = \arccos[\alpha_y \cdot \lambda / (2\pi d_y)] = \arccos[\alpha_y \cdot c / (\omega d_y)], \quad (14)$$

<sup>4</sup> Главный максимум функции (13) так же, как и функции (5), нормирован к 1. Однако на рисунке 9 для наглядности основной максимум ДН выделен и приподнят над максимумами множителей первичных ФАР.

где

$$\Phi_{(q-1)} - \Phi_q = \alpha_y, \quad q = 1, 2, \dots, n, \quad \Phi_q = (\omega t + \phi_q) \text{ и } \phi_n = (n - 1)\alpha_y. \quad (15)$$

Следовательно, управление скачком фазы  $\alpha_y$  согласно выражению (15) приводит к изменению направления оси ДН вторичной ФАР в плоскости  $yOz$ .

При любом способе управления аналогично показанному на рисунке 7 линия фазового фронта поворачивается в плоскости  $yOz$  на угол  $\psi_y$ , точка В описывает дугу радиусом

$$L_y = md_y, \quad (16)$$

а также описывает дугу и фазовый центр (точка  $O$ ).

Минимальная и максимальная ширина диаграммы направленности:

$$2\Theta_{0,5y}^{(0)} \approx (0,888 \cdot \lambda) / L_y, \quad \psi_y=0; \quad (17)$$

$$2\Theta_{0,5y}^{(\pi/2)} \approx 2\sqrt{(0,888 \cdot \lambda) / L_y}, \quad \psi_y=\pm\pi/2. \quad (18)$$

Формулы (14), (17), (18) показывают, что применение линейной фазированной антенной решетки с управлением фазой излучателей согласно (15) позволяет выбирать и ширину основного лепестка ДН в плоскости  $xOz$ , и его ориентацию в этой плоскости в пределах  $\pm\pi/2$  относительно оси  $Oz$ .

Таким образом, плоская ФАР позволяет управлять диаграммой направленности системы излучателей в двух ортогональных плоскостях.

На основании изложенного можно сделать выводы.

Для применения фазированной антенной решетки наземной аппаратуры пользователей спутниковой радионавигационной системы с управляемой диаграммой направленности необходимо, чтобы конструкция приемника имела по крайней мере одну плоскую поверхность для размещения элементарных излучателей с хотя бы одним габаритным размером  $(L_x \vee L_y) > \lambda$ .

Переключения диаграмм направленности не должны вносить динамических ошибок определения координат наземным приемником СРНС. С этой целью следует использовать электронные фазовращатели и быстродействующие переключатели на  $p-i-n$ -диодах [7 – 9].

Алгоритм управления диаграммой направленности ФАР должен быть итерационным и предусматривать следующее:

- а) формирование слабо направленной ДН для предварительной оценки наличия навигационных спутников с углом наклона от вертикали  $\gamma < \gamma_{\max}$ , где  $\gamma_{\max}$  – угол маски;
- б) программу расчета собственных координат наземной аппаратуры пользователей;
- в) программу расчета грубой оценки небесных координат обнаруженного созвездия НС относительно положения наземной аппаратуры пользователей;
- г) распределение обнаруженных НС по приоритетному обслуживанию;
- д) поочередное, в соответствии с установленным приоритетом, формирование относительно узких диаграмм направленности с направлением на выбранные навигационные спутники;
- е) коррекцию приоритетов обнаруженных спутников;
- ж) повторение вычислений согласно п. д);
- з) возврат к п. а) и повторение вычислений согласно п. б) – ж).

Очевидно, что рассмотренные условия формирования узкой управляемой ДН путем применения активной ФАР возможно для стационарных наземных либо для бортовых приемников СРНС, конструкция которых допускает расположение прямоугольной несущей плоскости излучателей размером примерно  $(0,25 \text{ м} \times 0,25 \text{ м})$ . Мобильные переносные конструкции для этой цели непригодны.

## Список литературы

1. Марюхненко, В. С. Показатели надежности информационных управляющих систем с аппаратными и информационными отказами как комплексные функции времени [Текст] / В. С. Марюхненко // Вестник СГАУ / Самарский гос. аэрокосмический ун-т. – Самара. – 2009. – № 1 (16). – С. 10 – 17.
2. Марюхненко, В. С. Информационное обеспечение типового комплекса управления локомотивом серии ЭП1П [Текст] / В. С. Марюхненко, Е. И. Антипин // Информационные системы контроля и управления в промышленности и на транспорте: Сб. науч. тр. Под ред. Ю. Ф. Мухопад / Иркутский гос. ун-т путей сообщения. – Иркутск. – 2013. – Вып. 23. – С. 100 – 106.
3. Информационное обеспечение подвижных транспортных средств на основе интегрированных навигационных систем: Монография [Текст] / В. С. Марюхненко, Ю. Ф. Мухопад и др. – Новосибирск: Наука, 2014. – 256 с.
4. Перов, А. И. ГЛОНАСС. Принципы построения и функционирования [Текст] / А. И. Перов, В. Н. Харисов. – М.: Радиотехника, 2010. – 800 с.
5. Корбанский, И. Н. Антенны [Текст] / И. Н. Корбанский. – М.: Энергия, 1973. – 336 с.
6. Марюхненко В. С. Радиоприемные устройства [Текст] / В. С. Марюхненко / Иркутский военный авиационный инженерный ин-т. – Иркутск, 2001. – 531 с.
7. Электродинамика и распространение радиоволн: Учебное пособие [Текст] / Д. Ю. Муромцев, Ю. Т. Зырянов и др. / Тамбовский гос. техн. ун-т. – Тамбов, 2012. – 200 с. [Электронный ресурс]. URL: <http://window.edu.ru/resource/211/80211/files/belousov.pdf>
8. Парнес М. Д. Высокотехнологичные антенные решетки СВЧ на основе многослойных плат для радаров и систем связи [Текст] / М. Д. Парнес: Дис... доктора техн. наук. – Санкт-Петербург, 2011. – 161 с.
9. Павлов, С. Антенные фазированные решетки. Обзор компонентной базы для реализации приемопередающих модулей [Текст] / С. Павлов, А. Филиппов // Компоненты и технологии. – 2014. – № 7. – С. 57 – 62. [Электронный ресурс]. URL: <http://dic.academic.ru/dic.nsf/ruwiki/613946>
10. ГОСТ 23066-78. Устройства управления лучом фазированных антенных решеток. Термины и определения [Текст]. – М.: Изд-во стандартов, 2013. – 113 с.

## References

1. Maryukhnenko V. S. Indicators of reliability of information control systems with hardware and information failures as complex functions of time [Pokazateli nadezhnosti informatsionnykh upravlyayushchikh sistem s ap-paratnymi i informatsionnymi otkazami kak kompleksnyye funktsii vremeni]. *Vestnik SGAU – Bulletin of the Siberian State University of Architecture and Civil Engineering*, 2009, no. 1 (16), pp.10 – 17.
2. Maryukhnenko V. S., Antipin Ye. I. Information support of a typical locomotive management complex of the EP1P series [Informatsionnoye obespecheniye tipovogo kompleksa upravleniya lokomotivom serii EP1P]. *Informatsionnyye sistemy kontrolya i upravleniya v promyshlennosti i na transporte – Information systems for control and management in industry and transport*, 2013, no. 23, pp.100 – 106.
3. Maryukhnenko V. S., Mukhopad Y. F., Dem'yanov V. V., Mironov B. M. *Informatsionnoye obespecheniye podvizhnykh transportnykh sredstv na osnove integrirovannykh navigatsionnykh sistem: monografiya* (Information support of mobile vehicles on the basis of integrated navigation systems: monograph). Novosibirsk: Nauka, 2014, 256 p.

4. Perov A. I., Kharisov V. N. *GLONASS. Printsipy postroyeniya i funktsio-nirovaniya* (GLONASS. Principles of construction and functioning). Moscow: Radiotekhnika, 2010, 800 p.
5. Korbanskiy I. N. *Antenny* (Antennas). Moscow: Energiya, 1973, 336 p.
6. Maryukhnenko V. S. *Radiopriyemnyye ustroystva* (Radio receivers). Irkutsk: IVAIL, 2001, 531 p.
7. Muromtsev D. Y., Zyryanov Y. T., Fedyunin P. A. *Elektrodinamika i rasprostraneniye radiovoln* (Electrodynamics and propagation of radio waves). Tambov: TGTU, 2012, 200 p.
8. Parnes M. D. *Vysokotekhnologichnyye antennoye reshetki SVCH na osnove mnogosloynnykh plat dlya radarov i sistem svyazi* (Parnes MD High-tech antenna array of microwave on the basis of multilayered boards for radars and communication systems). Doctor's thesis, Sankt-Peterburg, 2011, 161 p.
9. Pavlov S., Filippo A. Antenna phased arrays. Overview of the component base for the implementation of transceiver modules [Antennoye fazirovannyye reshetki. Obzor komponentnoy bazy dlya realizatsii priyemoperedayushchikh moduley]. *Komponenty i tekhnologii – Components and technology*, 2014, no. 7, pp. 57 – 62.
10. *Ustroystva upravleniya luchom fazirovannykh antennoykh reshetok. Terminy i opredeleniya, GOST 23066-78* (Beam control devices for phased antenna arrays. Terms and Definitions, GOST 23066-78.). Moscow. Standartvy, 2013, 113 p.

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

### Марюхненко Виктор Сергеевич,

Иркутский государственный университет путей сообщения (ИрГУПС).

ул. Чернышевского, д.15, г. Иркутск, 664074, Российская Федерация.

Доктор технических наук, профессор кафедры «Автоматика, телемеханика и связь», ИрГУПС.

Тел.: +7 (3952) 63-83-99, доб. 419.

E-mail: viktor.maryukhnenko@yandex.ru

### Гармышева Евгения Святославовна

Иркутский государственный университет путей сообщения (ИрГУПС).

ул. Чернышевского, д.15, г. Иркутск, 664074, Российская Федерация.

Аспирант кафедры «Автоматика, телемеханика и связь», ИрГУПС.

Тел.: +7 (3952) 63-83-99 доб. 449.

E-mail: garmysheva\_ea@irgups.ru

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Марюхненко, В. С. Анализ применения фазированных антенных решеток для приема сигналов спутниковой радионавигационной системы в комплексе локомотивных устройств безопасности [Текст] / В. С. Марюхненко, Е. С. Гармышева // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2017. – № 2 (30). – С. 99 – 112.

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

### Viktor Sergeevich Maryukhnenko

Irkutsk State Transport University (ISTU). Chernyshevsky st., 15, Irkutsk, 664074, Russian Federation.

Doctor of technical sciences, professor of the department «Automation, telemechanics and communication», ISTU.

Phone: 8 (3952) 63-83-99 ext. 419.

E-mail: viktor.maryukhnenko@yandex.ru

### Garmysheva Eugenia Svyatoslavovna

Irkutsk State Transport University (ISTU). Chernyshevsky st., 15, Irkutsk, 664074, Russian Federation.

Postgraduate student of the department «Automation, telemechanics and communication», ISTU.

Phone: 8 (3952) 63-83-99 ext. 449.

E-mail: garmysheva\_ea@irgups.ru

## BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Maryukhnenko V. S., Garmysheva E. S. Analysis of the reception of signals of the satellite radionavigation system by phased antenna grids in a complex of safety devices for locomotive. *Journal of Transsib Railway Studies*, 2017, vol. 30, no. 2, pp. 99 – 112. (In Russian).

**В. В. Петров**

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС), г. Омск, Российская Федерация

**ОЦЕНКА ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТИ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ  
ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ  
ФАЗОВЫХ СООТНОШЕНИЙ В ТЯГОВЫХ СЕТЯХ  
ПЕРЕМЕННОГО ТОКА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА**

***Аннотация.** В работе выполнены моделирование и анализ помехоустойчивости предложенного способа измерения фазовых сдвигов между гармоническими составляющими тока и напряжения в тяговых сетях электроснабжения железнодорожного транспорта и дана оценка предельно допустимого уровня помех, при котором гарантируется работоспособность цифровых устройств, используемых для исследования сдвигов фаз в указанных условиях. Результаты моделирования показали, что функция плотности вероятности на выходе нелинейного преобразователя «фазовый сдвиг – код» остается унимодальной при любом соотношении диапазона преобразователя и среднего квадратичного отклонения фазы входного сигнала. Реализация исследуемого способа на основе микропроцессорного цифрового устройства гарантирует устойчивость и точность результатов измерения сдвига фаз в тяговых сетях электроснабжения железнодорожного транспорта при наличии высокого уровня электромагнитных помех, нелинейного резко переменного характера тяговой нагрузки, искрения токоприемников электропоездов в контактной сети и использовании систем рекуперации на основе импульсных преобразователей.*

***Ключевые слова:** измерение, фаза, электроснабжение, нелинейность, стохастическое моделирование, помехоустойчивость, вероятность.*

**Vladimir V. Petrov**

Omsk State Transport University (OSTU), Omsk, the Russian Federation

**EVALUATION OF NOISE IMMUNITY MEASUREMENT DEVICES  
IN THE STUDY OF PHASE CORRELATIONS IN TRACTION NETWORKS  
AC RAILWAY TRANSPORT**

***Abstract.** In work done modeling and analysis of noise immunity of the proposed measurement method of phase shifts between harmonic components of voltage and current in traction power supply rail transport networks and estimation of maximum permissible noise level, where workability digital devices used to study phase shifts in these conditions. The simulation results have shown that the probability density function on the output of the nonlinear converter «phase shift – code» remains a unimode at any ratio range converter and standard deviation of the phase of the input signal. Implementation of researched ways of microprocessor-based digital device guarantees the stability and accuracy of measurement results in traction phase shifting networks of power supply of railway transport in the presence of high levels of industrial noise, nonlinear fast variable nature of the traction load, sparking the pantographs for electric locomotives in contact network and use recovery systems based on pulse converters.*

***Keywords:** measurement, phase, power supply, nonlinearity, stochastic simulation, noise immunity, probability.*

Важную роль в практических исследованиях электродинамики тяговых сетей железнодорожного транспорта играют помехоустойчивые способы фазовых измерений, возможные варианты реализации которых и методы повышения их точности описаны в статье [1]. Предложенный микропроцессорный цифровой фазометр сохраняет работоспособность и установленную точность определения сдвигов фаз различных гармонических составляющих на тяговых подстанциях переменного тока в условиях несинусоидальности и несимметрии питающих напряжений, использования систем рекуперации на основе импульсных преобразователей, нелинейного резко переменного характера тяговой нагрузки, искрения токоприемников электропоездов в контактной сети.

Принцип работы описанного микропроцессорного цифрового фазометра основан на нахождении  $\text{mod} P_x(\varphi)$  – моды плотности вероятности мгновенных сдвигов фаз при условии нормального закона распределения значений разностей фаз, измеряемых за период входных сигналов. Предложенный способ измерения фазы учитывает нелинейный периодический характер преобразования «фазовый сдвиг – код» (ФСК) в цифровом фазометре с ограниченным диапазоном измерения  $\pm 180^\circ$ , фактически реализующий алгоритм сложения по модулю  $2\pi$  [2]. Теоретически описанный способ [1] позволяет получить довольно высокую точность измерения сдвигов фаз, но остается неизвестным уровень предельных значений помех, при которых он теряет работоспособность, т. е. не может гарантировать заявленную точность.

Для оценки предельных значений допустимого уровня помех, при котором сохраняется работоспособность описанного способа измерения сдвига фаз, необходимо оценить влияние нелинейности статической характеристики цифрового фазометра на параметры  $P_x(\varphi)$  – функции плотности вероятности сдвига фаз на входе преобразователя «фазовый сдвиг – код» (ПФСК) и, в частности, на значение ее моды. Для этого необходимо ответить на вопрос, остается ли функция плотности вероятности нормального закона распределения (Гаусса) унимодальной после нелинейного преобразования типа «центрально-симметричная косозубая пила (ЦСКП)». Общий вид такого нелинейного функционального преобразования представлен на рисунке 1.

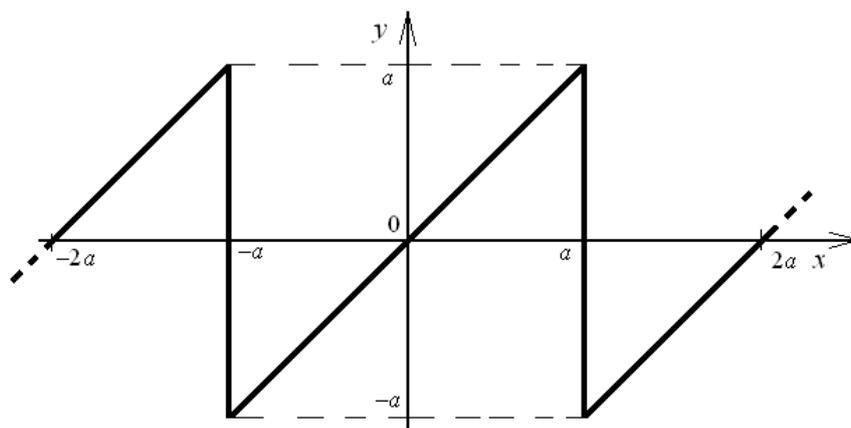


Рисунок 1 – Функция нелинейного преобразования ФСК в цифровом фазометре типа «центрально-симметричная косозубая пила»

Изображенная на рисунке 1 нелинейность может быть описана системой неравенств

$$y = \begin{cases} x + 2na & \text{при } -(2n+1)a < x \leq -(2n-1)a; \\ \dots & \\ x + 4a & \text{при } -5a < x \leq -3a, (n = -2); \\ x + 2a & \text{при } -3a < x \leq -a, (n = -1); \\ x & \text{при } -a < x < a, (n = 0); \\ x - 2a & \text{при } a \leq x < 3a, (n = 1); \\ x - 4a & \text{при } 3a \leq x < 5a, (n = 2); \\ \dots & \\ x - 2na & \text{при } (2n-1)a \leq x < (2n+1)a, \end{cases} \quad (1)$$

где  $n = \text{int}(x/a)$ ,  $\text{int}$  – целая часть после операции деления,  $\pm a$  – параметр, определяющий область линейного диапазона работы ПФСК, который обычно составляет  $\pm 180^\circ$  и не должен быть равным нулю. Тогда в общем виде нелинейное преобразование (1) для моделирования алгоритма работы цифрового фазометра может быть описано выражением:

$$y = x - 2an. \quad (2)$$

Рассмотрим случай, когда функция плотности вероятности флюктуации фазы на входе ПФСК (с линейным диапазоном  $\pm a$ ) соответствует нормальной форме представления с нулевым математическим ожиданием

$$P_x(\varphi) = \frac{1}{\sigma_x \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{\varphi_a^2}{2\sigma_x^2}}. \quad (3)$$

Тогда нелинейное преобразование (2) на выходе ПФСК приводит к наложению «хвостов» нормального закона распределения  $P_x(\varphi)$  на центральную часть функции плотности вероятности в пределах  $\varphi_a = \pm a$ . Частный случай результата искажения этой функции нелинейностью типа ЦСКП при флюктуации фазы входного сигнала в пределах  $\pm 2a$  представлен на рисунке 2 для среднего квадратичного отклонения (СКО<sub>x</sub>) фазы этого сигнала  $\sigma_x = |a|$ .

На рисунке 2 приняты следующие обозначения:  $P_x(\varphi)$  – функция плотности вероятности на входе ПФСК;  $P_x(0)$  – максимальное значение плотности вероятности на входе фазоизмерительного устройства;  $P_y(\varphi)$  – функция плотности вероятности на выходе ПФСК;  $P_y(0)$  – максимальное значение плотности вероятности на выходе ПФСК;  $P_y(a) = P_y(-a)$  – минимальные значения плотности вероятности на выходе ПФСК;  $\Delta P_y(\varphi)$  – разность, которая необходима для идентификации моды фазы сигнала на выходе ПФСК;  $-2P_x(2a) \approx P_y(0) - P_x(0)$  – разность между максимальными значениями вероятности;  $2P_x(3a) \approx P_y(a) - 2P_x(a)$  – остаточное значение плотности вероятности при больших флюктуациях фазы сигнала.

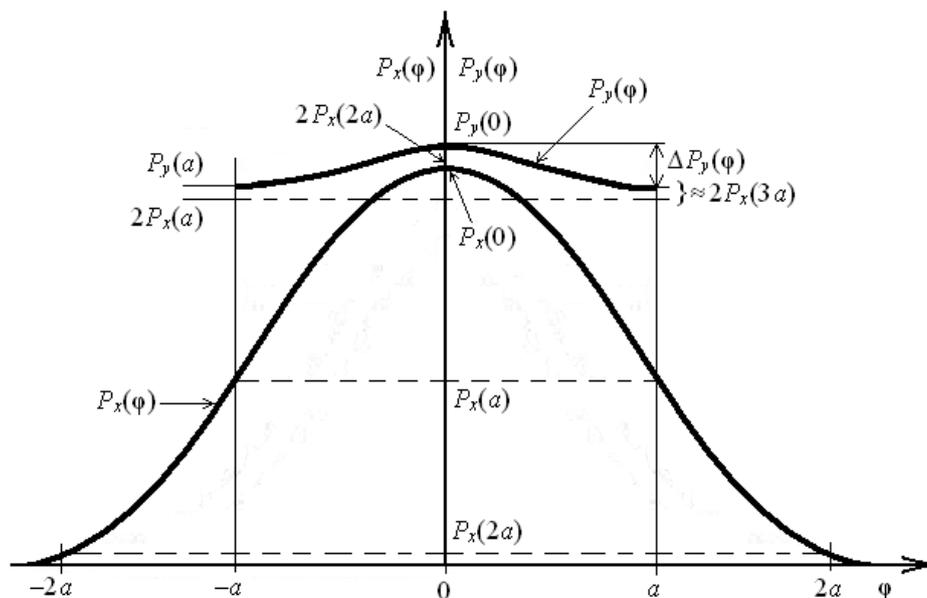


Рисунок 2 – Влияние нелинейности типа ЦСКП на функцию плотности вероятности  $P_x(\varphi_a)$  фазы входного сигнала, распределенного по нормальному закону

Для ответа на поставленный вопрос необходимо определить диапазон допустимых значений среднего квадратичного отклонения  $\sigma_x \neq 0$  относительно параметра  $a \neq 0$ , при которых искаженная ПФСК функция плотности вероятности  $P_y(\varphi)$  останется унимодальной, а описанные в статье [1] способ и реализующее его устройство измерения сдвига фаз будут сохранять работоспособность. Для этого введем параметр

$$w = \pm a / \sigma_x, \quad (4)$$

определяющий относительное значение линейной части диапазона измерения цифрового фазометра, приведенное к СКО<sub>x</sub> фазы входного сигнала  $\sigma_x$ , и найдем плотность вероятности в

центре распределения  $P_y(0)$  и в крайних точках распределения  $P_y(\pm a)$  (см. рисунок 2) после нелинейного преобразования (2):

$$P_y(0) = P_x(0) + 2 \sum_{n=1}^{\infty} P_x(2na); \quad (5)$$

$$P_y(\pm a) = 2 \sum_{n=1}^{\infty} P_x((2n-1)a). \quad (6)$$

Найдем разность между центральным  $P_y(0)$  (максимальным) значением (5) и крайним  $P_y(a)$  значением (6) плотности вероятности и сравним ее с нулем:

$$\Delta P_y(\phi) \Big|_{\phi=na} = P_x(0) + 2 \sum_{n=1}^{\infty} P_x(2na) - 2 \sum_{n=1}^{\infty} P_x((2n-1)a) > 0. \quad (7)$$

Если неравенство (7) будет выполняться при любых значениях  $\sigma_x$  относительно параметра  $a$  (диапазона ПФСК), то функция  $P_y(\phi)$  в пределах  $\pm a$  останется унимодальной. Так как функция  $P_x(\phi)$  монотонно убывающая, то естественно предположить, что в интервалах от 0 до  $\pm a$  значение суммы экспонент в точках  $\phi_a = \pm a$  не может быть больше их начальных значений, т. е. в точке  $\phi_a = 0$ . Поэтому достаточно сравнить между собой только эти крайние точки функции  $P_y(\phi)$ . Кроме того, здесь и далее будем рассматривать только положительные значения параметров  $a$  и  $w$ , так как функция  $P_y(\phi)$  в данном случае четная ( $P_y(a) = P_y(-a)$  при математическом ожидании, равном нулю, а параметр  $\sigma_x \neq 0$  и всегда положительный).

Для проверки справедливости неравенства (7) объединим все его члены под знаком суммы в пределах  $-\infty < n < +\infty$  при значениях аргумента  $\phi_a = nw$  с учетом четности функции  $P_x(\phi)$  и нечетности функциональных преобразований (2) и (4):

$$\Delta P_y(\phi) \Big|_{\phi=nw} = \sum_{n=-\infty}^{\infty} (-1)^n P(nw) > 0. \quad (8)$$

Подставим выражение (3) в (8)

$$\Delta P_y(\phi) \Big|_{\phi=nw} = \frac{1}{\sigma_x \sqrt{2\pi}} \sum_{n=-\infty}^{\infty} (-1)^n e^{-\frac{n^2 w^2}{2}} > 0 \quad (9)$$

и выделим только сумму членов бесконечного ряда, которая действительно влияет на знак левой части неравенства (9), а коэффициент пропорциональности ( $\frac{1}{\sigma_x \sqrt{2\pi}} \neq 0$ ) не имеет в

данном случае принципиального значения, так как с нулем сравнивается разность величин плотности вероятности, а не их абсолютные значения:

$$\Delta P_y(n, w) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} (-1)^n e^{-\frac{n^2 w^2}{2}} > 0. \quad (10)$$

Для упрощения выражения (10) произведем замену переменной

$$q = e^{-\frac{w^2}{2}} \quad (11)$$

и в результате получим сумму членов бесконечного знакопеременного степенного ряда, знак которой необходимо определить:

$$\Delta P_y(q) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} (-1)^n q^{n^2} > 0. \quad (12)$$

Отметим, что полученное выражение (12) является частным случаем хорошо известной в математике тэта-функции Якоби четвертого типа  $\Theta_4(v|q)$  [3]. Она состоит из бесконечного степенного ряда с аргументом  $v$  и сходится только при значениях параметра  $0 < q < 1$ :

$$\Theta_4(v|q) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} (-1)^n q^{n^2} (e^{i\pi v})^{2n}. \quad (13)$$

Если подставить значение аргумента  $v = 0$ , то тэта-функция  $\Theta_4(0|q)$  полностью совпадает с выражением (12), описывающим разность плотности вероятности  $\Delta P_y(q)$  между центральным и крайним значениями гистограммы на выходе ПФСК с нелинейностью типа ЦСКП. В частном случае тэта-функцию при фиксированном значении  $q$  обозначают просто как  $\Theta_4$ . Основные свойства тэта-функции  $\Theta_4(v|q)$  представлены в источниках [4, 5] и подробно описаны в [6]:

- 1) все значения функции  $\Theta_4$  находятся в положительной полуплоскости, что подтверждает справедливость неравенств (12) и (7);
- 2) функция  $\Theta_4$  быстро сходится при  $0 < q < 1$ , поэтому для численного моделирования  $P_y(\varphi)$  вполне достаточно небольшого числа членов степенного ряда  $n$ ;
- 3) для  $n = \infty$  функция  $\Theta_4$  монотонно убывает при возрастании величины  $q$  от минимальных значений  $q > 0$  до максимальных  $q < 1$ ;
- 4) так как  $\Theta_4$  приближается к нулю в области значений  $q \rightarrow 1$  при  $n \rightarrow \infty$ , то в реальных условиях (например, для четного  $n = 4$ ) уравнение вида  $\Theta_4(0|q) = 0$  не имеет вещественных корней (отсутствует решение в действительной области);
- 5) при нечетном числе  $n$  уравнение  $\Theta_4(0|q) = 0$  имеет один вещественный корень, но график  $\Theta_4$  пересекает ось абсцисс только при величине  $q \rightarrow 1$ , что также свидетельствует об отсутствии конкретного решения в диапазоне  $0 < q < 1$  (при  $n \rightarrow \infty$ ), для которого нарушалось бы выполнение условия неравенств (12) или (7).

На основании перечисленных свойств тэта-функции  $\Theta_4(0|q)$  в указанных условиях можно сделать вывод о том, что неравенства (12) и (7) справедливы при любом значении параметра  $q$  в пределах  $0 < q < 1$ . Это означает, что после нелинейного преобразования (2) функция плотности вероятности на выходе ПФСК фазометра  $P_y(\varphi)$  остается унимодальной во всем указанном диапазоне значений параметра  $q$ . Таким образом, при нормальном законе распределения фазы входного сигнала исследуемый способ измерения сдвига фаз [1] теоретически сохраняет работоспособность при любых значениях  $0 < w < \infty$  (т. е. при любом соотношении параметров  $\sigma_x \neq 0$  и  $a \neq 0$ ), что и требовалось доказать для ответа на поставленный вопрос.

Если найти конкретное значение  $q$ , соответствующее минимальному значению функции  $\Delta P_y(q)$ , и подставить в выражение (11)

$$e^{-\frac{w^2}{2}} = q \quad \text{при } 0 < q < 1, \quad (14)$$

то можно будет вычислить и соответствующее предельное относительное значение СКО<sub>x</sub>

$$w = \sqrt{-2 \ln q} = \frac{a}{\sigma_x} \quad \text{при } a \neq 0, \sigma_x \neq 0 \text{ и } 0 < q < 1. \quad (15)$$

Но так как  $\Delta P_y(q) > 0$  в указанном диапазоне изменения значений  $q$  (14), то полученный в выражении (15) результат означает, что описываемый способ измерения сдвига фаз остается работоспособным при любых значениях  $w$ , т. е. этот параметр может находиться в пределах от  $w_{(q=0)} = \infty$  до  $w_{(q=1)} = 0$ . Учитывая параметр (4), что  $\sigma_x = a/w$ , максимальное значение

СКО<sub>x</sub> (допустимый диапазон флюктуаций) фазы входного сигнала теоретически может в бесконечное число раз превышать линейную часть диапазона ПФСК.

Так как при  $q \rightarrow 1$  значения функции  $P_y(\varphi)$  в центре  $P_y(0)$  и крайних точках  $P_y(w)$  становятся почти равными, то функция распределения плотности вероятности  $P_y(\varphi)$  на выходе ПФСК приближается к равномерному закону распределения, что существенно затрудняет нахождение истинного значения моды функции плотности вероятности фазы сигнала. Графики зависимости значений функций  $\Theta_4$  и ее модифицированного вида от  $q$ , определяющие свойства цифрового фазоизмерительного устройства, представлены на рисунке 3.

Для реализации рассматриваемого способа [1] необходим алгоритм нахождения максимального значения функции плотности вероятности (моды) после преобразования ФСК, который в простейшем случае может быть основан на сравнении разности  $\Delta P_y(\varphi)$  с определенным порогом дискретизации гистограммы  $P_y$  по уровню. Если значение функции  $P_y(0)$  превышает значение  $P_y(w)$  на величину заранее заданного порога  $h$ , то можно считать, что мода флюктуации фазы сигнала идентифицирована.

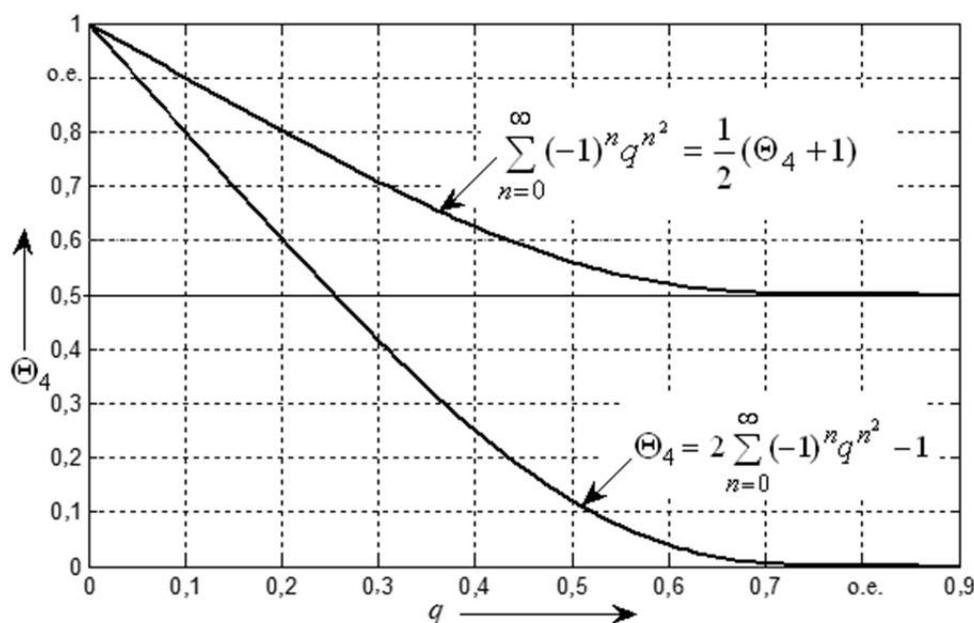


Рисунок 3 – Области допустимых значений функций  $\Theta_4$  и ее модифицированного вида при моделировании ПФСК с учетом нелинейности типа ЦСКП

При практической реализации алгоритма идентификации моды функции  $P_y$  порог  $h$  будем задавать аддитивным способом – путем уменьшения величины постоянного члена ряда (12), у которого  $n = 0$ . Влияние порога наглядно можно представить в графическом виде путем смещения всей функции  $\Theta_4$  на величину порога  $h$  в область отрицательных значений, что приводит к появлению вещественных корней в уравнении  $\Theta_4(0 | q) = h$  при любом приемлемом значении  $n \neq \infty$ .

Для сравнения с порогом  $h$  выделим нулевой член ряда (12)  $q^0 = 1$  (при  $n = 0$ ) и преобразуем его к более удобному виду с учетом симметричности остальных членов ряда при положительных и отрицательных значениях  $n$ :

$$\Delta P_y(q) = q^0 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n q^{n^2} > h. \quad (16)$$

Нахождение значений  $q$  и функционально связанных с ним значений  $w$  (3), (4) требует решения алгебраического уравнения бесконечно высокого порядка при  $0 < h < 1$ :

$$\sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n q^{n^2} + 0,5(1-h) = 0. \quad (17)$$

Нахождение бесконечного числа корней уравнения (17) аналитическим способом представляет неразрешимую задачу, поэтому для практических целей можно воспользоваться пакетом MatLab, который позволяет найти решение уравнения численным методом с достаточной для дальнейшего исследования точностью.

На первом этапе моделирования следует определить максимальную степень уравнения  $n$  (17), обеспечивающую приемлемую точность модели. Для этого решим уравнение (17) с одним и тем же значением порога  $h = 0,1$  при различных показателях степени уравнения  $n$ . При увеличении  $n$  погрешность между соседними приближенными решениями модели становится меньше требуемой (шесть десятичных знаков после запятой), что и позволит нам обоснованно выбрать необходимое число членов степенного ряда в левой части уравнения (17) для дальнейшего анализа. Результаты таких вычислений представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Оценка ошибки вычисления вещественных корней уравнения (17) численным методом при значении порога  $h = 0,1$

$n$	Вид алгебраического уравнения (17)	Вещественные корни уравнения	Ошибка
1	$-q + 0,5(1-h) = 0$	$q_1 = 0,45$ $q_2$ – отсутствует	$\Delta_1 q_1 = 0,070754$
2	$q^4 - q + 0,5(1-h) = 0$	$q_1 = 0,527322, q_2 = 0,722519$	$\Delta_2 q_1 = 0,006568$
3	$-q^9 + q^4 - q + 0,5(1-h) = 0$	$q_1 = 0,520694, q_2$ – отсутствует	$\Delta_3 q_1 = 0,000060$
4	$q^{16} - q^9 + q^4 - q + 0,5(1-h) = 0$	$q_1 = 0,520754, q_2 = 0,896915$	$\Delta_4 q_1 = 0$
5	$-q^{25} + q^{16} - q^9 + q^4 - q + 0,5(1-h) = 0$	$q_1 = 0,520754, q_2$ – отсутствует	$\Delta_5 q_1 = 0$
6	$q^{36} - q^{25} + q^{16} - q^9 + q^4 - q + 0,5(1-h) = 0$	$q_1 = 0,520754, q_2 = 0,948046$	$\Delta_6 q_1 = 0$

Ошибка в таблице 1 найдена по формуле  $\Delta_n q_1 = q_{1(n=6)} - q_{1(n < 6)}$ , а ошибку первого корня ( $\Delta_6 q_1$ ) при  $n = 6$  принимаем равной нулю (основываясь на свойствах функции  $\Theta_4$ ). Данные в таблице 1 подтверждают быструю сходимость ряда в левой части уравнения (17), поэтому для практических целей может быть достаточно решения уравнения четвертой степени [7], т. е. при  $n = 2$  в уравнении (17), но для последующего анализа представляет интерес использовать более точный вариант ( $n = 4$ , т. е. уравнение шестнадцатой степени).

Уравнение (17) имеет один или два вещественных корня (в зависимости от нечетности или четности числа  $n$ ), которые разделяют все значения функции  $\Delta P_y(q)$  на три области, изображенных на рисунке 4.

От значений корней  $q_1$  и  $q_2$  зависит величина  $w$  (т. е. соотношение параметров  $\sigma_x$  и  $a$ ), определяющая работоспособную область исследуемого способа измерения фазы сигнала. Причем второй вещественный корень не играет существенной роли для данной задачи, так как его значение зависит от точности модели, т. е. от числа членов  $n$  в уравнении (17), и в пределе  $q_2 \rightarrow 1$  (при  $n \rightarrow \infty$ ).

Область «А» соответствует значениям функции  $\Delta P_y(q) > h$ , в которой гарантируются реализация алгоритма идентификации моды  $P_y(\varphi)$  и работоспособность исследуемого способа измерения сдвига фаз.

Область «В» соответствует значениям функции  $\Delta P_y(q) < h$ , т. е. предложенный алгоритм идентификации моды не гарантирует нахождения максимума  $P_y(\varphi)$ , а исследуемый способ измерения фазы и реализованные на его основе устройства теряют работоспособность в таких условиях.

Область «С» соответствует значениям  $\Delta P_y(q) > h$  при четных значениях  $n$  (в очень узком диапазоне значений параметра  $q$ , и только теоретически определяет работоспособность описанного способа), при нечетных значениях  $n$  в области «С»  $\Delta P_y(q) < h$  и алгоритм идентификации теряет работоспособность. Следовательно, в области «С» алгоритм идентификации

моды может вести себя неоднозначно и зависит от установленных параметров модели. Таким образом, для анализа практической пользы применения областей «В» и «С» в предлагаемой стохастической модели ПФСК необходимо проводить дополнительные исследования, оценивающие влияние параметра  $n$  и бесконечно малых значений «хвостов» функции  $P_x(\varphi)$  в этих областях на результат измерения сдвигов фаз в условиях высокого уровня помех.

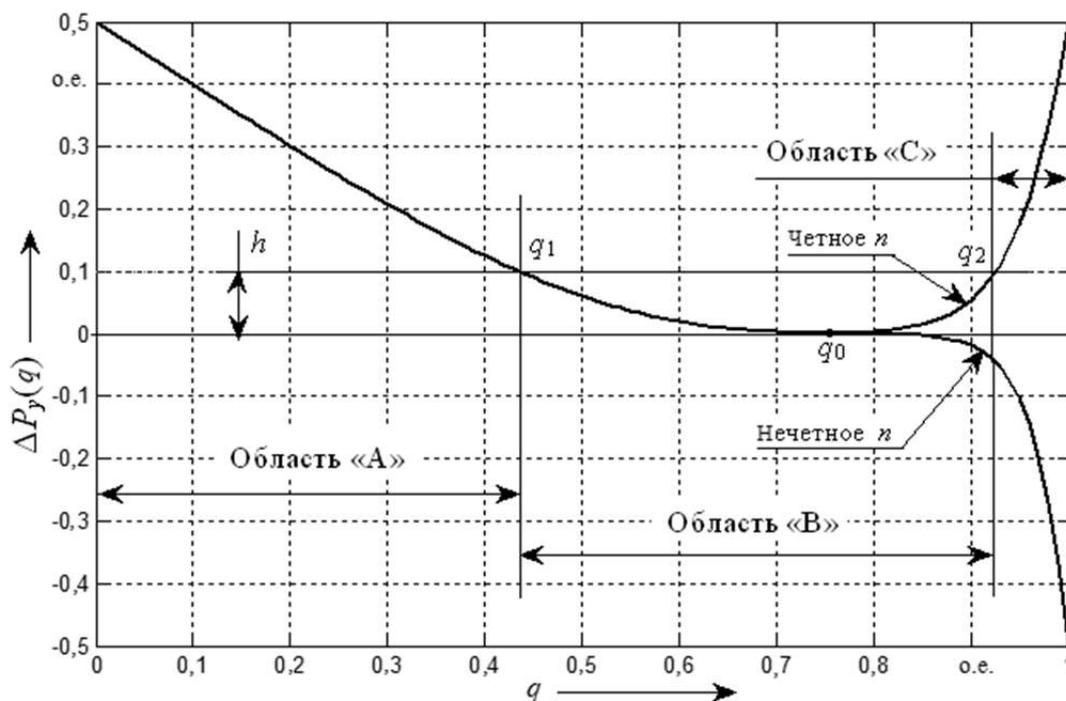


Рисунок 4 – Порог  $h$  в алгоритме идентификации моды, определяющий размеры областей «А», «В» и «С» функции  $\Delta P_y(q)$  при четных и нечетных значениях  $n$

Таким образом, для дальнейшего анализа будем принимать во внимание только один вещественный корень  $q_1$  в уравнении (17), определяющий критическое значение, больше которого не гарантируется однозначное определение моды функции  $P_y(\varphi)$  с заданным порогом идентификации  $h$ .

На втором этапе моделирования, учитывая данные таблицы 1, найдем допустимые значения параметров  $w$  и  $\sigma_x$  (15) при заданном диапазоне преобразования ФСК  $a = \pi$  и различных значениях порога  $h$ , установленного в алгоритме идентификации моды. Результаты вычислений вещественных корней уравнения шестнадцатой степени

$$q^{16} - q^9 + q^4 - q + 0,5(1 - h) = 0 \quad (18)$$

и соответствующих параметров  $w$  и  $\sigma_x$  при различных значениях порога  $h$  представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Зависимость параметров  $w$  и  $\sigma_x$  от различных значений порога  $h$  в алгоритме идентификации значения моды функции  $P_y(\varphi)$  при  $a = \pi$

Значение порога $h$	Вещественные корни уравнения (18) $q^{16} - q^9 + q^4 - q + 0,5(1 - h) = 0$	Значение параметра $w = \sqrt{-2 \cdot \ln q_1}$	Максимальное значение $\sigma_x = a/w$
0,1 (10%)	$q_1 = 0,520754, q_2 = 0,896914$	1,1423	$0,8754\pi$ ( $\approx 157^\circ$ )
0,2 (20%)	$q_1 = 0,435367, q_2 = 0,925609$	1,2896	$0,7754\pi$ ( $\approx 139^\circ$ )
0,3 (30%)	$q_1 = 0,368269, q_2 = 0,943265$	1,4135	$0,7075\pi$ ( $\approx 127^\circ$ )
0,4 (40%)	$q_1 = 0,309103, q_2 = 0,956215$	1,5324	$0,6526\pi$ ( $\approx 117^\circ$ )
0,5 (50%)	$q_1 = 0,254169, q_2 = 0,966514$	1,6551	$0,6042\pi$ ( $\approx 109^\circ$ )
0,6 (60%)	$q_1 = 0,201653, q_2 = 0,975099$	1,7895	$0,5588\pi$ ( $\approx 101^\circ$ )

Данные таблицы 2 подтверждают работоспособность исследуемого способа измерения фазы входного сигнала с параметром порога идентификации моды  $h = 0,2$  (20 %) при  $a = \pi$ ,  $w = 1,2896$  и  $\sigma_x = 0,7754\pi$ , что соответствует максимально допустимому среднему квадратичному отклонению флюктуации фазы на входе фазоизмерительного устройства в  $139^\circ$ .

Для моделирования помехоустойчивости ПФСК нелинейность типа ЦСКП можно представить в MatLab с помощью функционала  $y = \text{atan}(\tan(x))$ , но эта модель использует уникальный тип данных «бесконечность», а модель, описываемая выражением (2), может быть реализована практически на любом языке программирования. Фрагмент *m*-файла с комментариями одной из возможных реализаций этой модели:

```

b=2; s=0.7;           %коэффициент перекрытия диапазона реального ПФСК и СКОx.
a=pi; d=b*a;         %диапазон ПФСК и диапазон сигнала x на входе ПФСК.
x= -d : pi/360 : d;   %значения входного сигнала на входе ПФСК.
n=double(int32(x/(2*a))); %число разрывов нелинейной функции реального ПФСК.
m=(d/(s*sqrt(2*pi))); %масштаб функции плотности вероятности P(x).
p=m*exp(-(x/a).^2)/(2*s^2); %P(x) флюктуации фазы на входе ПФСК.
y=x-2*a*n;           %модель нелинейной характеристики реального ПФСК.
plot(x,0,x,x,'k--',x,y,x,p) %вывод графиков функций.
axis([-d d -d d])    %максимальные значения по осям графика.
    
```

Результат выполнения этого фрагмента программы представлен на рисунке 5.

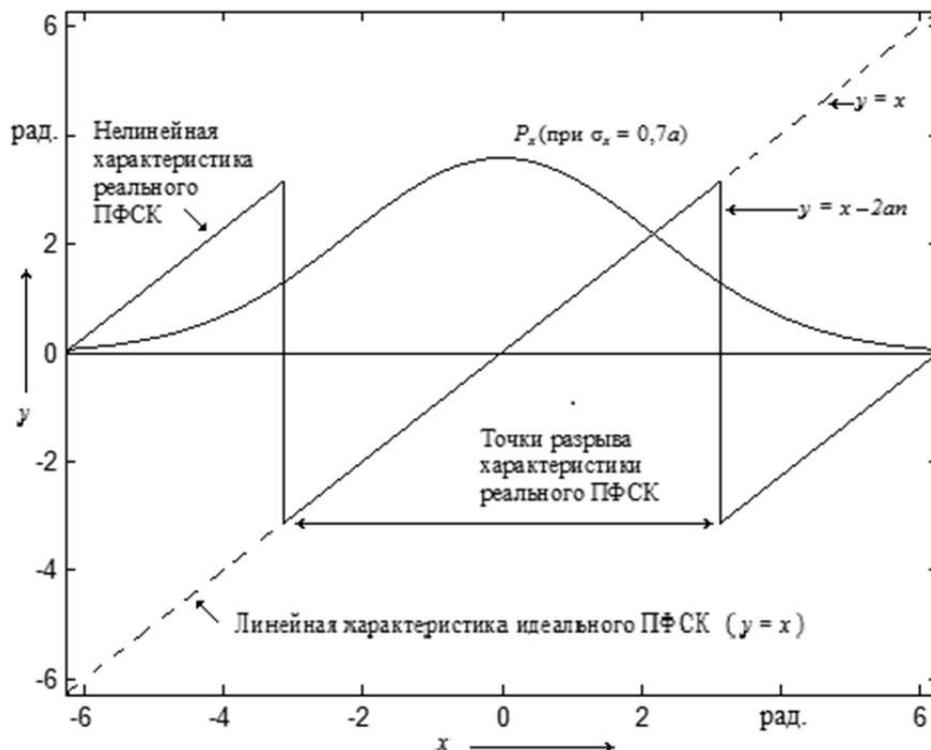


Рисунок 5 – Нелинейная характеристика реального ПФСК, имеющего две точки разрыва, при  $a = \pm\pi$  и функция плотности вероятности  $P_x$  на входе ПФСК при  $\sigma_x = 0,7\pi$

Вариант результата моделирования алгоритма идентификации моды на выходе реального ПФСК с учетом его нелинейной характеристики и наложения «хвостов» функции плотности вероятности  $P_x$  при  $\text{СКО}_x = 0,7\pi$  в диапазоне  $\pm\pi$  представлен на рисунке 6.

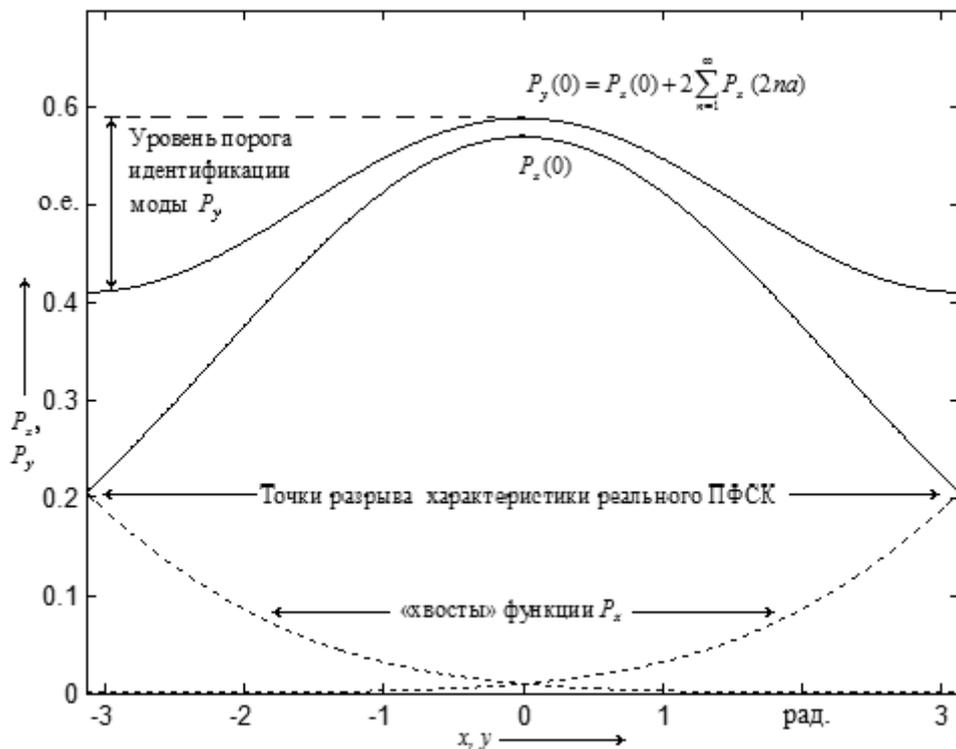


Рисунок 6 – Функция плотности вероятности  $P_y$  на выходе реального ПФСК при  $a = \pm\pi$  и  $\sigma_x = 0,7\pi$

Предложенная в данной работе математическая модель для оценки возможности идентификации моды на выходе фазоизмерительного устройства (7) позволяет найти и оценить значение максимально допустимого диапазона флюктуации фазы сигнала на входе ПФСК с учетом заданного порога  $h$  в алгоритме идентификации моды функции плотности вероятности  $P_y(\varphi)$  на выходе ПФСК.

Результаты моделирования показали, что функция плотности вероятности  $P_y(\varphi)$  на выходе нелинейного преобразователя «фазовый сдвиг – код» (2) остается унимодальной при любом соотношении параметров  $a$  и  $\sigma_x$ , а реализация исследуемого способа на основе микропроцессорного цифрового фазоизмерительного устройства гарантирует устойчивость и точность результатов измерения сдвига фаз в тяговых сетях электроснабжения железнодорожного транспорта при наличии высокого уровня электромагнитных помех.

### Список литературы

1. Петров, В. В. Измерение сдвигов фаз в тяговых сетях переменного тока железнодорожного транспорта [Текст] / В. В. Петров, А. Т. Когут, А. А. Лаврухин // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2013. – № 4 (16). – С. 69 – 77.
2. Тихонов, В. И. Нелинейные преобразования случайных процессов [Текст] / В. И. Тихонов. – М.: Радио и связь, 1986. – 296 с.
3. Янке, Е. Специальные функции [Текст] / Е. Янке, Ф. Эмде, Ф. Леш. – М.: Наука, 1977. – 344 с.
4. Прудников, А. П. Интегралы и ряды [Текст] / А. П. Прудников, Ю. А. Брычков, О. И. Маричев. – М.: Наука, 1981. – 797 с.

5. Корн, Г. Справочник по математике для научных работников и инженеров. [Текст] / Г. Корн, Т. Корн – М.: Наука, 1973. – 831 с.
6. Киселев, О. М. Зоопарк чудовищ или знакомство со специальными функциями [Текст] / О. М. Киселев / Башкирский гос. ун-т. – Уфа, 2012. – 101 с.
7. Петров, В. В. Применение помехоустойчивого способа измерения сдвига фаз в тяговых сетях электроснабжения железнодорожного транспорта [Текст] / В. В. Петров, А. Т. Когут, А. А. Лаврухин // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2014. – № 4 (20). – С. 105 – 111.

## References

1. Petrov V. V., Kogut A. T., Lavrukhin A. A. Measurement of phase shifts in traction networks AC railway trans-goad transport [Izmerenie sdvigov faz v tiagovykh setiakh peremennogo toka zhelezno-dorozhnoogo transporta]. *Izvestiia Transsiba – The journal of Transsib Railway Studies*, 2013, no. 4 (16), pp. 69 – 77.
2. Tikhonov V. I. *Nelinejnye preobrazovaniia sluchajnykh processov* [Nonlinear transformations of stochastic processes]. Moscow: Radio i sviaz', 1986, 296 p.
3. Janke E., Emdé F., Lesch F. *Specialnye funkicii* [Special functions]. Moscow: Nauka, 1977, 344 p.
4. Prudnikov A. P., Brychkov Iu. A., Marichev O. I. *Integraly i riady* [Integrals and series]. Moscow: Nauka, 1981, 797 p.
5. Korn G., Korn T. *Spravochnik po matematike dlia nauchnykh rabotnikov i inzhenerov* [Mathematical Handbook for Scientists and Engineers]. Moscow: Nauka, 1973, 831 p.
6. Kiselev O. M. *Zoopark chudovicsh ili znakomstvo so specialnymi funkciami* [Zoo of monsters or familiarity with special functions]. Ufa: BashGU, 2012, 101 p.
7. Petrov V. V., Kogut A. T., Lavrukhin A. A. Application of noise measurement method of phase shift in traction power supply rail transport networks [Primenenie pomekhoustoichivogo sposoba izmerenia sdviga faz v tiagovykh setiakh elektrosnabzhenia zhelezno-dorozhnoogo transporta]. *Izvestiia Transsiba – The journal of Transsib Railway Studies*, 2014, no. 4 (20), pp. 105 – 111.

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

### Петров Владимир Владимирович

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046, Российская Федерация.

Кандидат технических наук, старший научный сотрудник, доцент кафедры «Автоматика и системы управления», ОмГУПС.

Тел.: +7 (3812) 31-05-89.

E-mail: PetrovVV@omgups.ru

## INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

### Petrov Vladimir Vladimirovich

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx st., Omsk, 644046, the Russian Federation.

Candidate of Technical Sciences, Chief scientific worker, Associate Professor of the department «Automation and control systems», OSTU.

Phone: +7 (3812) 31-05-89.

E-mail: PetrovVV@omgups.ru

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Петров, В. В. Оценка помехоустойчивости измерительных устройств при исследовании фазовых соотношений в тяговых сетях переменного тока железнодорожного транспорта [Текст] / В. В. Петров // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2017. – № 2 (30). – С. 113 – 123.

## BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Petrov V. V. Evaluation of noise immunity measurement devices in the study of phase correlations in traction networks AC railway transport. *Journal of Transsib Railway Studies*, 2017, vol. 30, no. 2, pp. 113 – 123. (In Russian).

Л. С. Петрова, В. А. Горош, Н. В. Заложный

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС), г. Омск, Российская Федерация

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ НАГРЕВА ТЕЛ  
ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ КОНЦЕНТРИРОВАННЫХ ПОТОКОВ ЭНЕРГИИ  
НА ОСНОВЕ НЕЛИНЕЙНОГО ГИПЕРБОЛИЧЕСКОГО  
УРАВНЕНИЯ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ**

***Аннотация.** Статья посвящена численным методам решения нелинейных задач теплопроводности с учетом релаксации теплового потока. Разработана математическая модель на основе нелинейного уравнения теплопроводности гиперболического типа для расчета температурного поля в бесконечно протяженной (неограниченной) пластине. Представлена реализация метода сеток с использованием трехслойной неявной разностной схемы при решении нелинейной задачи гиперболической теплопроводности для случая, когда поглощение энергии излучения моделируется объемным источником тепла. Получено численное решение нелинейной задачи теплопроводности в неограниченной пластине с учетом релаксации теплового потока на основе методики конечных разностей с использованием метода прогонки и итерационного уточнения коэффициентов. Описан алгоритм расчета с графическим представлением результатов расчета температурного поля в неограниченной пластине при воздействии концентрированных потоков энергии. Представлено сравнение результатов расчетов температурных полей при математическом моделировании на основе нелинейного гиперболического уравнения теплопроводности и соответствующей линейной модели с использованием среднеинтегральных значений теплофизических и оптических характеристик. Полученные существенные отличия между температурными полями, соответствующими нелинейной и линейной задачам, обосновывают необходимость учета температурной зависимости теплофизических характеристик и поглощательной способности при исследовании высокоинтенсивных процессов нагрева тел. Разработанная нелинейная математическая модель нагрева тел с учетом конечной скорости распространения тепла, а также температурной зависимости свойств материала может быть использована при выборе режимов обработки тел высокоинтенсивными потоками энергии.*

***Ключевые слова:** математическая модель, температурное поле, численные методы, нелинейное уравнение теплопроводности гиперболического типа, неявная разностная схема, метод прогонки.*

Liliya S. Petrova, Victor A. Gorosh, Nikita V. Zalozhnyy

Omsk State Transport University (OSTU), Omsk, the Russian Federation

**MATHEMATICAL MODELING OF HEATING PROCESSES OF BODIES UNDER  
INFLUENCE OF CONCENTRATED ENERGY FLOWS BASED ON NONLINEAR  
HYPERBOLIC HEAT CONDUCTIVITY EQUATION**

***Abstract.** The article is devoted to numerical methods for solving nonlinear heat conduction problems with considering for the relaxation of heat flow. A mathematical model is developed on the basis of a non-linear heat equation of the hyperbolic type for calculating the temperature field in an infinitely extended (unlimited) plate. The implementation of the grid method using a three-layer implicit difference scheme for solving the nonlinear hyperbolic heat conduction problem is presented for the case when the absorption of radiation energy is modeled by a volumetric heat source. A numerical solution of the nonlinear heat conduction problem in an unbounded plate is obtained taking into account the relaxation of the heat flow on the basis of the finite difference technique using the sweep method and iterative refinement of the coefficients. A calculation algorithm with a graphical representation of the results of calculating the temperature field in an unbounded plate under the influence of concentrated energy flows is described. A comparison of the results of calculations of temperature fields in mathematical modeling on the basis of the nonlinear hyperbolic heat equation and the corresponding linear model using the mean integral values of thermophysical and optical characteristics is presented. The significant differences obtained between the temperature fields corresponding to the nonlinear and linear problems justify the need to take into account the temperature dependence of the thermophysical characteristics and the absorptivity in the study of high-intensity processes of heating the bodies. The developed nonlinear mathematical model of body heating with allowance for the finite speed of heat distribution and the temperature dependence of the material properties, can be used to select the modes for processing mode bodies with high-intensity energy flows.*

*Keywords: mathematical model, temperature field, numerical methods, nonlinear heat equation of hyperbolic type, implicit difference scheme, sweep method.*

В условиях современного производства при интенсификации тепловых воздействий для поверхностного упрочнения элементов конструкций, создания технологических процессов с использованием методов обработки различных материалов концентрированными потоками энергии с получением более высоких физико-механических свойств широко используется лазерная и плазменная обработка различных материалов. В частности, методы поверхностного термоупрочнения с использованием концентрированных пучков энергии (лазерных, плазменных, электронных) применяются в рамках совершенствования технологии ремонта подвижного состава железных дорог. Например, технологии плазменной поверхностной заделки гребней колесных пар локомотивов.

Исследованию высокоинтенсивных процессов нагрева тел (плазменной, лазерной обработке материалов, высокоинтенсивному нагреву контактных соединений в электрических установках и др.) посвящены работы В. Б. Веселовского, Ю. А. Малой, К. И. Гнедаш [1], В. С. Майорова [9], Б. А. Кравченко, С. В. Каюкова, А. А. Гусева [5], А. М. Лыкова [10] и других ученых.

Применение методов интенсивного нагрева приводит к необходимости учитывать конечную скорость распространения тепла и температурную зависимость теплофизических характеристик при расчете температурных полей, полученных на основе соответствующих моделей с использованием гиперболического уравнения теплопроводности с зависящими от температуры коэффициентами [1]. В этом случае нелинейное уравнение теплопроводности в силу температурной зависимости коэффициентов является квазилинейным уравнением [13].

Рассматривая методы решения краевых задач гиперболической теплопроводности, необходимо отметить, что в большинстве исследований (Ю. И. Широков, А. И. Губин, Ю. А. Малая, О. А. Синкевич, В. Б. Веселовский, А. Э. Кузнецова, В. А. Кудинов и др.) используются точные и приближенные аналитические методы. В представленных работах реализуются метод разделения переменных, операционный метод, сочетание метода пространственно-временных квадрантов и операционного метода. При этом использование численных методов решения задач теплопроводности с учетом релаксации теплового потока в рассматриваемых нами исследованиях (А. Н. Корчагина, Л. А. Мержиевский, Н. И. Никитенко, В. Ф. Очков, А. П. Солодов и др.) ограничено применительно к линейным краевым задачам [11].

Среди работ, посвященных численным методам решения краевых задач для нелинейного уравнения теплопроводности параболического типа, необходимо выделить исследования, основанные на использовании явной и неявной разностных схем. В работе А. В. Геренштейна и М. З. Харисламова [2] исключается зависимость коэффициентов уравнения от температуры посредством введения новой искомой функции (первообразной теплопроводности), но недостатком предложенной явной разностной схемы является ее условная устойчивость.

При использовании неявной разностной схемы с нелинейностью на нижнем слое (явно-неявная схема) исследователями применяется метод «замороженных коэффициентов» [14] и учитывается условие, ограничивающее шаг по времени.

В работах, направленных на получение численного решения нелинейного уравнения теплопроводности [3, 4, 6, 7] для реализации разностной схемы с нелинейностью на верхнем слое (чисто неявной схемы), используется итерационное уточнение коэффициентов. В исследовании Р. В. Гришаева, Ф. Х. Мирзаде, М. Д. Хоменко [3] приведена методика численного решения одномерного уравнения теплопроводности в сферических координатах для случая аксиально-симметричного распределения температуры. В работе Г. В. Кузнецова и Т. А. Нагорновой [6] решается задача тепломассопереноса в двухслойной бесконечной пластине на основе системы уравнений теплопроводности параболического типа. Исследование

Н. Г. Карлыханова, А. В. Ураковой [4] посвящено численному решению уравнения теплопроводности для двумерного осесимметричного случая на квадратной адаптивной сетке. Исследований по тематике применения численных методов решения нелинейных задач теплопроводности с учетом релаксации теплового потока нами не обнаружено.

Решая задачу о нагреве тела при обработке концентрированными потоками энергии, рассмотрим случай обработки металла лазерным излучением, когда поглощение энергии излучения моделируется объемным источником тепла (учитывается сравнимость по порядку величины глубины проникновения теплоты с толщиной слоя, в котором поглощается энергия излучения). Плотность потока энергии излучения задается как функция времени

$q_0(\tau) = q_{\max} \sin \frac{\pi\tau}{\tau_d}$ , где  $q_{\max}$  – максимальное значение плотности теплового потока,

$q_{\max} = 10^{13}$  Вт/м<sup>2</sup>,  $\tau_d$  – длительность импульса,  $\tau_d = 2$  нс. Время релаксации теплового потока  $\tau_r = 0,5$  нс. Из предположения, что диаметр области нагрева намного больше глубины проникновения тепла, обрабатываемое тело можно считать неограниченной пластиной. Толщина образца  $L = 1$  мкм. Температура в начальный момент времени является постоянной и равной 300 К, а скорость изменения температуры в начальный момент времени принимается равной нулю. На границах заданы граничные условия второго рода. Расчет температурного поля проводился для образца, теплофизические и оптические характеристики которого задавались следующим образом:

$$\lambda(T) = 196,4 - 0,135 \cdot T + 4,63 \cdot 10^{-5} \cdot T^2 + 3,26 \cdot 10^{-10} \cdot T^3, \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}; \quad (1)$$

$$c(T) = 130 + 1,36 \cdot 10^{-2} \cdot T + 4,04 \cdot 10^{-6} \cdot T^2, \text{ Дж/(кг} \cdot \text{К)}; \quad (2)$$

$$\rho(T) = 1,93 \cdot 10^4 - 3,3 \cdot 10^{-2} \cdot T, \text{ кг/м}^3; \quad (3)$$

$$A(T) = 2,4 \cdot 10^{-2} + 1,03 \cdot 10^{-4} \cdot T; \alpha = 10^7 \text{ 1/м}. \quad (4)$$

Для случая, когда поглощение энергии излучения моделируется объемным источником тепла, математическая модель процесса теплопроводности при воздействии концентрированных потоков энергии на тело с учетом температурной зависимости теплофизических и оптических характеристик включает в себя нелинейное неоднородное дифференциальное уравнение [8, с. 107]:

$$\begin{aligned} \tau_r \frac{\partial}{\partial \tau} \left( c(T) \rho(T) \frac{\partial T(x, \tau)}{\partial \tau} \right) + c(T) \rho(T) \frac{\partial T(x, \tau)}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda(T) \frac{\partial T(x, \tau)}{\partial x} \right) + \\ + A(T) q_0(\tau) \alpha e^{-\alpha x} + \tau_r \alpha e^{-\alpha x} \frac{\partial (A(T) q_0(\tau))}{\partial \tau}; \end{aligned} \quad (5)$$

начальные условия:

$$T(x, 0) = T_0, \quad x \in [0, L]; \quad (6)$$

$$\left. \frac{\partial T(x, \tau)}{\partial \tau} \right|_{\tau=0} = 0, \quad x \in [0, L]; \quad (7)$$

граничные условия:

$$\left. \frac{\partial T(x, \tau)}{\partial x} \right|_{x=0} = 0, \quad \tau \in [0, \tau_m]; \quad (8)$$

$$\left. \frac{\partial T(x, \tau)}{\partial x} \right|_{x=L} = 0, \quad \tau \in [0, \tau_m], \quad (9)$$

где  $T(x, \tau)$  – температура тела в точке  $x$  в момент времени  $\tau$ ;  $\lambda(T)$  – коэффициент теплопроводности;  $c(T)$  – теплоемкость;  $\rho(T)$  – плотность вещества;  $\tau_r$  – время релаксации теплового потока;  $A(T)$  – поглощательная способность материала;  $\alpha$  – коэффициент поглощения;  $q_0(t)$  – плотность потока энергии излучения.

Для решения нелинейной задачи (5) – (9) применяем метод сеток с использованием конечно-разностных аппроксимаций (метод конечных разностей). Вводим прямоугольную пространственно-временную сетку  $G_{x\tau} = \{x_i = ih, i = \overline{1, N}; \tau_j = jk, j = \overline{0, M}\}$ . Рассматривая трехслойную неявную разностную схему, подставляем формулы соответствующих разностных аналогов частных производных по времени и пространству [12, с. 455] в гиперболическое уравнение теплопроводности. В этом случае получаем разностное уравнение вида:

$$\begin{aligned} \gamma_i^{j+1} \frac{T_i^{j+1} - T_i^j}{k} + \frac{\tau_r}{k} \left( \frac{\gamma_i^{j+1} + \gamma_i^j}{2} \cdot \frac{T_i^{j+1} - T_i^j}{k} - \frac{\gamma_i^{j-1} + \gamma_i^j}{2} \cdot \frac{T_i^j - T_i^{j-1}}{k} \right) = \\ = \frac{1}{h} \left( \frac{\lambda_i^{j+1} + \lambda_{i+1}^{j+1}}{2} \cdot \frac{T_{i+1}^{j+1} - T_i^{j+1}}{h} - \frac{\lambda_{i-1}^{j+1} + \lambda_i^{j+1}}{2} \cdot \frac{T_i^{j+1} - T_{i-1}^{j+1}}{h} \right) + f_i^{j+1}, \end{aligned} \quad (10)$$

где  $\gamma_i^{j+1} = c(T_i^{j+1})\rho(T_i^{j+1}) \cdot 10^{-9}$ ,  $\lambda_i^{j+1} = \lambda(T_i^{j+1}) \cdot 10^{-6}$ ,  $c(T_i^{j+1})$ ,  $\rho(T_i^{j+1})$ ,  $\lambda(T_i^{j+1})$  вычисляются по формулам (1) – (3),  $i = \overline{2, N-1}$ ,  $j = \overline{0, M-1}$ . Формула для определения  $f_i^{j+1}$  имеет вид:

$$\begin{aligned} f_i^{j+1} = As_i^{j+1} q_{\max} \sin \frac{\pi jk}{2} \mu e^{-\mu h(i-1)} + \\ + \tau_r \mu e^{-\mu h(i-1)} \left( 1,3 \cdot 10^{-4} \frac{T_i^{j+1} - T_i^j}{k} q_{\max} \sin \frac{\pi jk}{2} + As_i^{j+1} \frac{\pi q_{\max}}{2} \cos \frac{\pi jk}{2} \right), \end{aligned} \quad (11)$$

где  $As_i^{j+1} = A(T_i^{j+1})$  и вычисляется по формуле (4),  $\mu = \alpha = 10$  1/мкм.

При реализации метода простой итерации для решения полученной нелинейной системы уравнений на каждом шаге по времени расчет температурного поля происходит до тех пор, пока оно не перестает отличаться от предыдущего приближения. В этом случае система уравнений является линейной относительно  $T_i^{s+1}$  и принимает вид:

$$\begin{aligned} 2kh^2 \gamma_i^s (T_i^{s+1} - T_i^j) + \tau_r h^2 \left[ (\gamma_i^s + \gamma_i^j) \cdot (T_i^{s+1} - T_i^j) - (\gamma_i^{j-1} + \gamma_i^j) \cdot (T_i^j - T_i^{j-1}) \right] = \\ = k^2 \left[ (\lambda_i^s + \lambda_{i+1}^s) \cdot (T_{i+1}^{s+1} - T_i^{s+1}) - (\lambda_{i-1}^s + \lambda_i^s) \cdot (T_i^{s+1} - T_{i-1}^{s+1}) \right] + 2f_i^s k^2 h^2, \end{aligned} \quad (12)$$

где  $s$  – номер итерации. Для определения нового приближения с применением метода прогонки, систему (12) приводят к виду:

$$A_i \cdot T_{i+1}^{s+1} - B_i \cdot T_i^{s+1} + C_i \cdot T_{i-1}^{s+1} = F_i, \quad (13)$$

где  $A_i = k^2 (\lambda_i^s + \lambda_{i+1}^s)$ ,  $C_i = k^2 (\lambda_{i-1}^s + \lambda_i^s)$ ,  $B_i = k^2 (\lambda_{i-1}^s + 2\lambda_i^s + \lambda_{i+1}^s) + 2kh^2 \gamma_i^s + \tau_r h^2 (\gamma_i^s + \gamma_i^j)$ ,  $F_i = -2f_i^s k^2 h^2 + \tau_r h^2 T_i^{j-1} (\gamma_i^j + \gamma_i^{j-1}) - T_i^j \left[ 2kh^2 \gamma_i^s + \tau_r h^2 (\gamma_i^s + 2\gamma_i^j + \gamma_i^{j-1}) \right]$ .

Формулы для расчета прогоночных коэффициентов получаем, подставляя в уравнение (13) соотношение прогонки  $T_{i-1}^{s+1} = \alpha_{i-1} \cdot T_i^{s+1} + \beta_{i-1}$ :

$$\alpha_i = \frac{A_i}{B_i - C_i \cdot \alpha_{i-1}}; \quad (14)$$

$$\beta_i = \frac{C_i \cdot \beta_{i-1} - F_i}{B_i - C_i \cdot \alpha_{i-1}}. \quad (15)$$

Используя соотношение  $T_i^{-1} = T_i^0$ , полученное из аппроксимации начального условия (7), определяем коэффициенты  $F_i$  на первом временном слое:

$$F_i^1 = -2f_i^s k^2 h^2 - T_i^0 \left[ 2kh^2 \gamma_i^s + \tau_r h^2 (\gamma_i^s + \gamma_i^0) \right]. \quad (16)$$

Из уравнения (12), записанного для  $i=1$ , подставляя вместо значения сеточной функции в фиктивном узле  $T_0^{s+1}$  соотношение  $T_0^{s+1} = T_2^{s+1}$ , полученное из аппроксимации левого граничного условия с погрешностью  $O(h^2)$ , выводим формулы для определения начальных прогоночных коэффициентов  $\alpha_1, \beta_1$ :

$$\alpha_1^{s+1} = \frac{2k^2 (\lambda_1^s + \lambda_2^s)}{2kh^2 \gamma_1^s + \tau_r h^2 (\gamma_1^s + \gamma_1^j) + 2k^2 (\lambda_1^s + \lambda_2^s)}; \quad (17)$$

$$\beta_1^{s+1} = \frac{2f_1^s k^2 h^2 - \tau_r h^2 T_1^{j-1} (\gamma_1^j + \gamma_1^{j-1}) + T_1^j \left[ 2kh^2 \gamma_1^s + \tau_r h^2 (\gamma_1^s + 2\gamma_1^j + \gamma_1^{j-1}) \right]}{2kh^2 \gamma_1^s + \tau_r h^2 (\gamma_1^s + \gamma_1^j) + 2k^2 (\lambda_1^s + \lambda_2^s)}. \quad (18)$$

Для определения коэффициента  $\beta_1$  на первом временном слое соотношение (18) записываем для  $j=0$  и подставляем значение сеточной функции для фиктивного узла  $T_1^{-1} = T_1^0$ :

$$\beta_1^1 = \frac{2f_1^s k^2 h^2 + T_1^0 \left[ 2kh^2 \gamma_1^s + \tau_r h^2 (\gamma_1^s + \gamma_1^0) \right]}{2kh^2 \gamma_1^s + \tau_r h^2 (\gamma_1^s + \gamma_1^0) + 2k^2 (\lambda_1^s + \lambda_2^s)}. \quad (19)$$

Используя уравнение (12), записанное для  $i=N$  с подстановкой соотношения  $T_{N+1}^{s+1} = T_{N-1}^{s+1}$ , полученного из аппроксимации правого граничного условия с погрешностью  $O(h^2)$ , выводим формулу для определения значений температуры на правой границе:

$$T_N^{s+1} = \frac{2k^2 \left[ \beta_{N-1} (\lambda_N^s + \lambda_{N-1}^s) + f_N^s h^2 \right] + T_N^j h^2 \left[ \gamma_N^s (2k + \tau_r) + \tau_r (\gamma_N^j + \gamma_N^{j-1}) \right] - \tau_r h^2 T_N^{j-1} (\gamma_N^j + \gamma_N^{j-1})}{2kh^2 \gamma_N^s + \tau_r h^2 (\gamma_N^s + \gamma_N^j) + 2k^2 (\lambda_N^s + \lambda_{N-1}^s) (1 - \alpha_{N-1})}. \quad (20)$$

Определяя значение сеточной функции в узле на правой границе первого временного слоя  $T_N^1$ , используем формулу (20) при условии  $j=0$  и соотношение для фиктивного узла  $T_N^{-1} = T_N^0$ :

$$T_N^1 = \frac{2k^2 \left[ \beta_{N-1} (\lambda_N^s + \lambda_{N-1}^s) + f_N^s h^2 \right] + T_N^0 h^2 \left[ \gamma_N^s (2k + \tau_r) + \tau_r \gamma_N^0 \right]}{2kh^2 \gamma_N^s + \tau_r h^2 (\gamma_N^s + \gamma_N^0) + 2k^2 (\lambda_N^s + \lambda_{N-1}^s) (1 - \alpha_{N-1})}. \quad (21)$$

В алгоритме расчета предусматривается описание процедуры расчета значений функции на верхнем (промежуточном и первом) временном слое. При этом сначала определяются прогоночные коэффициенты с использованием соотношений (14) – (19). Вычисление значе-

ний температуры на правой границе происходит по формулам (20) или (21) в зависимости от временного слоя (промежуточного или первого). Непосредственно расчет температурного поля осуществляется с использованием основного соотношения прогонки. Температурное поле на каждом временном слое определяется до тех пор, пока максимальная разность между значениями температуры на текущей и предыдущей итерации не станет минимальной, т. е. не перестанет отличаться от предыдущего приближения. В случае выполнения условия остановки счета ( $\max_i |T_i^{s+1} - T_i^s| \leq \varepsilon$ , где  $\varepsilon$  – точность вычислений) полученные на данной итерации значения сеточной функции определяют значения функции на верхнем временном слое. В качестве начального приближения можно рассматривать значения функции на предыдущем временном слое.

Успешное применение метода прогонки обеспечивается выполнением следующих условий: исключение быстрого роста погрешности округления ( $|\alpha_i| < 1, i = \overline{1, N-1}$ ) и отличие знаменателей прогоночных коэффициентов от нуля. При использовании данного метода для решения поставленной задачи учитывается безусловная устойчивость предложенной неявной разностной схемы с погрешностью аппроксимации  $O(\tau + h^2)$ .

Программа для численного расчета температурного поля в условиях задачи (5) – (9) реализовывалась в системе MathCAD и в среде программирования Dev-C++. Результаты расчета, соответствующие решениям нелинейных (TNL) и линейных (TL) задач, приведены на рисунках 1, 2. График функции изменения температуры во времени при  $x = 0$  мкм и при  $x = 0,15$  мкм представлен на рисунке 1. На рисунке 2 приведены графики распределения температуры по толщине пластины при  $\tau = 1$  нс и при  $\tau = 2$  нс. Численные решения линейных задач получены на основе методики конечных разностей с использованием метода прогонки при среднеинтегральных значениях теплофизических и оптических характеристик в диапазоне температур от 300 до 3659 К:  $\bar{\lambda} = 160,9$  Вт/(м·К);  $\bar{\gamma} = 3,4 \cdot 10^6$  Дж/(м<sup>3</sup>·К);  $\bar{A} = 0,23$ .

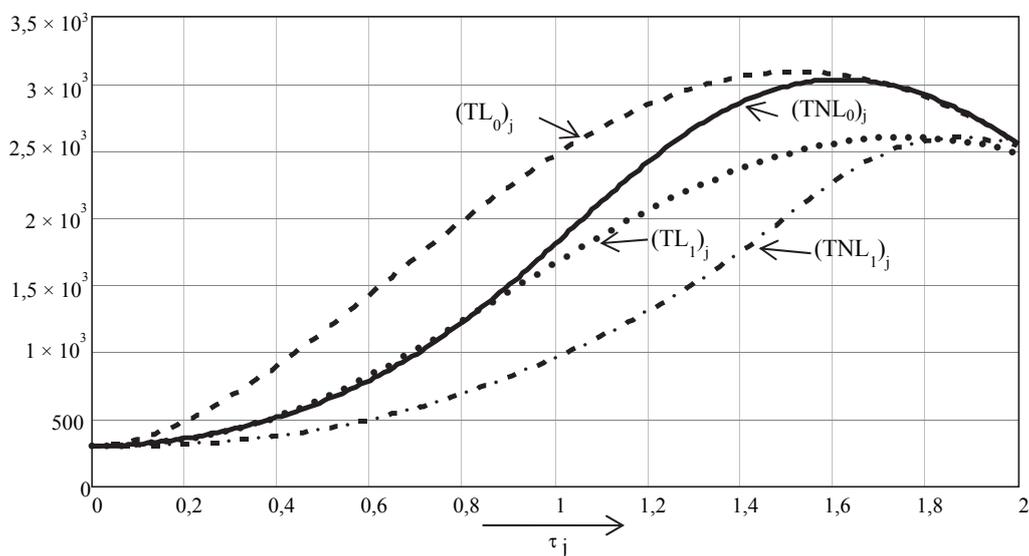


Рисунок 1 – Изменение температуры во времени: при  $x = 0$  мкм ( $TNL_0, TL_0$ ) и при  $x = 0,15$  мкм ( $TNL_1, TL_1$ )

Сравнимость результатов проведенного расчета значений температур с их значениями, полученными в работе [8, с. 115 – 118] на основе сочетания метода пространственно-временных квадрантов и операционного метода, обосновывает достоверность полученных результатов. Существенные различия в графиках распределения температуры, соответствующих нелинейным и линейным задачам (см. рисунки 1, 2) указывают на необходимость уче-

та температурной зависимости поглощательной способности, теплофизических и оптических характеристик при моделировании тепловых процессов в материалах, обрабатываемых концентрированными потоками энергии (в частности, при обработке металлов лазерным излучением).

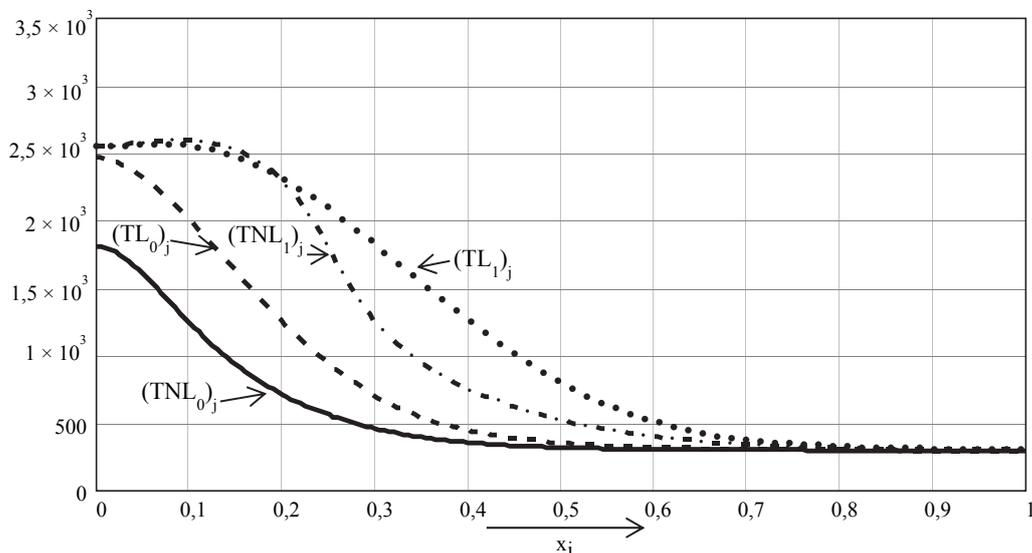


Рисунок 2 – Распределение температуры по толщине пластины:  
при  $\tau = 1$  нс ( $TNL_0$ ,  $TL_0$ ) и при  $\tau = 2$  нс ( $TNL_1$ ,  $TL_1$ )

Разработанная нелинейная математическая модель нагрева тел с учетом конечной скорости распространения тепла позволяет повысить точность расчета температурных полей при обработке тел концентрированными потоками энергии и может быть использована при исследовании высокоинтенсивных процессов нагрева тел (например, при разработке технологии лазерного упрочнения гребней бандажей колесных пар тягового подвижного состава).

### Список литературы

1. Веселовский, В. Б. Математическое моделирование импульсных теплотехнологических процессов [Текст] / В. Б. Веселовский, Ю. А. Малая, К. И. Гнедаш // *Металлургическая теплотехника: Сб. науч. тр. Национальной металлургической академии Украины / Национальная металлургическая академия Украины. – Днепропетровск, 2007. – С. 53 – 61.*
2. Геренштейн, А. В. Явная разностная схема решения одномерного квазилинейного уравнения теплопроводности [Текст] / А. В. Геренштейн, М. З. Харисламов // *Вестник ЮУрГУ. Сер. Математика. Механика. Физика / Южно-Уральский гос. ун-т. – Челябинск. – 2013. – Т. 5 (№ 1). – С. 12 – 16.*
3. Гришаев, Р. В. Численное моделирование кинетики плавления микрочастиц при селективном лазерном спекании [Текст] / Р. В. Гришаев, Ф. Х. Мирзаде, М. Д. Хоменко // *Перспективные материалы / Ин-т металлургии и материаловедения им. А. А. Байкова РАН. – Москва. – 2011. – № 10. – С. 135 – 142.*
4. Карлыханов, Н. Г. Неявная схема решения нелинейного уравнения теплопроводности на квадратной адаптивной сетке [Текст] / Н. Г. Карлыханов, А. В. Уракова // *VII Забабахинские научные чтения (Снежинск, 8 – 12 сентября 2003 г.) / Российский федеральный ядерный центр, Всероссийский НИИ технической физики им. акад. Е. И. Забабахина. – Снежинск, 2003. – С. 5 – 15.*
5. Кравченко, Б. А. Термопластическое упрочнение жаропрочных никелевых сплавов с использованием лазерного нагрева [Текст] / Б. А. Кравченко, С. В. Каюков, А. А. Гусев //

Физика и химия обработки материалов / Ин-т металлургии и материаловедения им. А. А. Байкова РАН. – Москва. – 1999. – № 6. – С.17 – 21.

6. Кузнецов, Г. В. Математическое моделирование процесса нагрева, плавления и диффузии легирующей компоненты в металл при лазерном термохимическом упрочнении [Текст] / Г. В. Кузнецов, Т. А. Нагорнова // Физика и химия обработки материалов / Ин-т металлургии и материаловедения им. А. А. Байкова РАН. – Москва. – 2006. – № 3. – С. 33 – 37.

7. Кузнецов, Г. В. Разностные методы решения задач теплопроводности: Учебное пособие [Текст] / Г. В. Кузнецов, М. А. Шеремет / Томский политехн. ун-т. – Томск, 2007. – 172 с.

8. Малая, Ю. А. Математическое моделирование процессов теплопроводности с учетом релаксации теплового потока [Текст] / Ю. А. Малая: Дис... канд. техн. наук. – Днепропетровск, 2015. – 183 с.

9. Лазерные технологии обработки материалов: современные проблемы фундаментальных исследований и прикладных разработок [Текст] / Под ред. В. Я. Панченко. – М.: Физматлит, 2009. – 664 с.

10. Лыков, А. М. Расчет процессов и разработка аппаратов для плазменной модификации поверхности материалов [Текст] / А. М. Лыков: Дис... доктора техн. наук. – М., 2006. – 281 с.

11. Петрова, Л. С. Математическое моделирование процессов нагрева кусочно-однородных тел с учетом релаксации теплового потока / Л. С. Петрова // Интернет-журнал «Науковедение». – 2017. – Т. 9 (№ 1). – URL: <http://naukovedenie.ru/PDF/38TVN117.pdf> (доступ свободный).

12. Самарский, А. А. Теория разностных схем: учебное пособие для вузов [Текст] / А. А. Самарский. – М.: Наука, 1977. – 656 с.

13. Lees, M. A. linear three-level difference scheme for quasilinear parabolic equations / M. A. Lees // Journal of Mathematics and Computer. – 1966. – Vol. 20. – P. 516 – 522.

14. Dendy, J. E. Alternating direction methods for nonlinear time-dependent problems / J. E. Dendy // SIAM Journal on Numerical Analysis. – 1977. – Vol. 14. – P. 313 – 326.

## References

1. Veselovsky V. B., Malaya Y. A., Gnedash K. I. Mathematical modeling of pulsed heat-and-technological processes [Matematicheskoe modelirovanie impul'snyh teplotekhnologicheskikh processov]. *Metallurgicheskaja teplotehnika. Sbornik nauchnyh trudov Nacional'noj metallurgicheskoy akademii Ukrainy* (Metallurgical heat engineering. Collection of scientific works of the National Metallurgical Academy of Ukraine). – Dnepropetrovsk, 2007, pp. 53 – 61.

2. Gerenshtein A. V., Kharislamov M. Z. Explicit difference scheme for solving a one-dimensional quasilinear equation of heat conductivity [Javnaja raznostnaja shema reshenija odnomernogo kvazilinejnogo uravnenija teploprovodnosti]. *Vestnik JuUrGU. Serija «Matematika. Mehanika. Fizika» – Bulletin of the South Ural State University, series «Mathematics. Mechanics. Physics»*, 2013, vol. 5 (no. 1), pp. 12 – 16.

3. Grishaev R. V., Mirzade F. H., Khomenko M. D. Numerical modeling of the kinetics of melting of microparticles in selective laser sintering [Chislennoe modelirovanie kinetiki plavljenija mikrochastic pri selektivnom lazernom spekanii]. *Perspektivnye materialy – Perspective materials*, 2011. no. 10, pp. 135 – 142.

4. Karlykhanov N. G., Urakov A. V. Implicit scheme for solving the nonlinear heat equation on a square adaptive grid [Nejavnaja shema reshenija nelinejnogo uravnenija teploprovodnosti na kvadratnoj adaptivnoj setke]. *Materialy konferencii «VII Zababahinskie nauchnye chtenija»* (Abstracts of the Int. conference «VII Zababakhin scientific readings»). – Snezhinsk, 2003, pp. 5 – 15.

5. Kravchenko B. A., Kayukov S. V., Gusev A. A. Thermoplastic hardening of high-temperature nickel alloys using laser heating [Termoplasticheskoe uprochnenie zharoprochnyh

nikelevykh splavov s ispol'zovaniem lazernogo nagreva]. *Fizika i himija obrabotki materialov – Physics and Chemistry of Materials Processing*, 1999, no. 6, pp.17 – 21.

6. Kuznetsov G. V., Nagornova T. A. Mathematical modeling of the process of heating, melting and diffusion of the alloying component into a metal under laser thermochemical hardening [Matematicheskoe modelirovanie processa nagreva, plavlenija i diffuzii legirujushhej komponenty v metall pri lazernom termohimicheskom uprochnenii]. *Fizika i himija obrabotki materialov – Physics and Chemistry of Materials Processing*, 2006, no. 3, pp. 33 – 37.

7. Kuznetsov G. V., Sheremet M. A. *Raznostnye metody reshenija zadach teploprovodnosti: uchebnoe posobie* (Difference methods for solving heat conduction problems: textbook). Tomsk, 2007, 172 p.

8. Malaya Y. A. *Matematicheskoe modelirovanie processov teploprovodnosti s uchetom relaksacii teplovogo potoka* (Mathematical modeling of thermal conductivity processes taking into account the relaxation of heat flow). Thesis for a degree of Candidate of Technical Sciences, Dnepropetrovsk, 2015, 183 p.

9. *Lazernye tehnologii obrabotki materialov: sovremennye problemy fundamental'nyh issledovanij i prikladnyh razrabotok* (Laser technologies of material processing: modern problems of fundamental research and applied developments) / Ed. V. Y. Panchenko. Moscow: Fizmatlit, 2009, 664 p.

10. Lykov A. M. *Raschet processov i razrabotka apparatov dlja plazmennoj modifikacii poverhnosti materialov* (Calculation of processes and development of devices for plasma modification of the surface of materials). Thesis for a degree of the Doctor of Engineering, Moscow, 2006, 281 p.

11. Petrova L. S. Mathematical modeling of the heating processes of piecewise-homogeneous bodies with allowance for the relaxation of heat flow [Matematicheskoe modelirovanie processov nagreva kusochno-odnorodnyh tel s uchetom relaksacii teplovogo potoka]. *Internet-zhurnal «Naukovedenie» – Scientific open access journal «Naukovedenie»*, 2017, vol. 9 (no. 1). – URL: <http://naukovedenie.ru/PDF/38TVN117.pdf>.

12. Samarsky A. A. *Teorija raznostnyh shem: uchebnoe posobie dlja vuzov* (The theory of difference schemes: a textbook for high schools). M.: Nauka, 1977, 656 p.

13. Lees M. A linear three-level difference scheme for quasilinear parabolic equations. *Journal of Mathematics and Computer*, 1966, vol. 20, pp. 516 – 522.

14. Dendy J. E. Alternating direction methods for nonlinear time-dependent problems. *SIAM Journal on Numerical Analysis*, 1977, vol. 14, pp. 313 – 326.

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

### Петрова Лилия Сергеевна

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

пр. Маркса, д. 35, г. Омск, 644046, Российская Федерация.

Кандидат педагогических наук, доцент кафедры «Высшая математика», ОмГУПС.

Тел.: +7 (3812) 31-18-11.

E-mail: petrov.306@mail.ru

### Горош Виктор Александрович

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

пр. Маркса, д. 35, г. Омск, 644046, Российская Федерация.

Студент ОмГУПСа.

E-mail: gorosh.viktor@mail.ru

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

### Petrova Liliya Sergeevna

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx st., Omsk, 644046, the Russian Federation.

Ph. D. in Pedagogic, associate professor of the department «Higher Mathematics», OSTU.

Phone: +7 (3812) 31-18-11.

E-mail: petrov.306@mail.ru

### Gorosh Victor Alexandrovich

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx st., Omsk, 644046, the Russian Federation.

The student OSTU.

E-mail: gorosh.viktor@mail.ru

**Заложный Никита Владимирович**

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046, Российская Федерация.

Студент ОмГУПСа.

E-mail: niczz9797@gmail.com

**Zalozhnyy Nikita Vladimirovich**

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx st., Omsk, 644046, the Russian Federation.  
The student OSTU.

E-mail: niczz9797@gmail.com

**БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ**

Петрова, Л. С. Математическое моделирование процессов нагрева тел при воздействии концентрированных потоков энергии на основе нелинейного гиперболического уравнения теплопроводности [Текст] / Л. С. Петрова, В. А. Горош, Н. В. Заложный // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2017. – № 2 (30). – С. 124 – 133.

**BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION**

Petrova L. S., Gorosh V. A., Zalozhnyy N. V. Mathematical modeling of heating processes of bodies under influence of concentrated energy flows based on nonlinear hyperbolic heat conductivity equation. Journal of Transsib Railway Studies, 2017, vol. 30, no. 2, pp. 124 – 133. (In Russian).

УДК 625.14: 625.041:625.042

**С. А. Косенко<sup>1</sup>, М. Я. Квашнин<sup>2</sup>, И. С. Бондарь<sup>2</sup>, С. С. Акимов<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Сибирский государственный университет путей сообщения (СГУПС), г. Новосибирск, Российская Федерация,

<sup>2</sup>Казахская академия транспорта и коммуникаций им. М. Тынышпаева (КазАТК), г. Алматы, Республика Казахстан

## ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЙ В РЕЛЬСЕ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ПОДВИЖНОГО СОСТАВА

**Аннотация.** Представлены результаты измерений кромочных напряжений и напряжений в шейке рельса в кривой радиусом 380 м, полученные при испытаниях по воздействию на путь тепловоза СКД6е-2108, грузовых полувагонов 12-9941 и 12-9920 на участке железнодорожной линии Алматы – Шу. Получены зависимости напряжений в кромках подошвы и в шейке рельса от скорости испытательного подвижного состава. Обоснована возможность повышения весовых норм грузовых поездов без затрат на реконструкцию путевой инфраструктуры за счет внедрения в эксплуатацию парка модернизированных грузовых вагонов с осевой нагрузкой 245 кН (25 тс).

**Ключевые слова:** железнодорожный путь, рельс, кромочные напряжения, напряжения в шейке рельса, вертикальные и боковые силы, испытательный подвижной состав, кривая малого радиуса.

**Sergey A. Kosenko<sup>1</sup>, Mikhael J. Kvashnin<sup>2</sup>, Ivan S. Bondar<sup>2</sup>, Sergey S. Akimov<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Siberian State Transport University (SSTU), Novosibirsk, the Russian Federation,

<sup>2</sup>Kazakh Academy of Transport and Communications named after M. Tynyshepaev, Almaty, the Republic of Kazakhstan

## FIELD MEASUREMENTS OF RAIL STRESSES UNDER THE INFLUENCE OF THE ROLLING STOCK

**Abstract.** The results of edge stresses and stress measurements in the neck of the rail in a curve of radius 380 m, obtained in the tests on the effects on the way the locomotive CKD6e-2108, freight gondola 12-9941 and 12-9920, on railway line Almaty – Chu. The dependences of the stresses in the edges of the soles and neck rail on the speed of the test vehicles. The possibility of a transition from stress to lateral forces.

**Keywords:** railway track, rail, edge stresses, stresses at the neck of the rail, vertical and lateral forces, test the rolling stock, a small radius curve.

В связи с постоянно растущей потребностью увеличения пропускной способности существующей сети железных дорог Республики Казахстан и Российской Федерации (особенно районов, граничащих между собой и с Китаем) актуальным является вопрос повышения безопасности эксплуатации грузовых поездов повышенной массы и длины. Введение в эксплуатацию тяжеловесных поездов – комплексная задача, связанная с применением более мощных локомотивов, повышением осевых нагрузок, реконструкцией путевой инфраструктуры и электроснабжения, совершенствованием технологии перевозочного процесса.

Кроме того, увеличение скоростей движения поездов при возрастающей грузонапряженности дорог требует повышения прочности и устойчивости пути. Техническая политика ОАО «РЖД» в России [1] и АО «НК «КТЖ» в Казахстане направлена на полный переход на бесстыковой путь на железобетонном основании.

Применение железобетонных шпал и рельсов тяжелых типов наряду с усилением прочности и надежности пути вызывает повышение модуля упругости подрельсового основания и жесткости пути по сравнению с деревянными шпалами [2].

Значительная роль в формировании жесткости пути на железобетонных шпалах принадлежит прокладкам-амортизаторам [2]. Одновременно они являются лимитирующими элементами в промежуточных рельсовых скреплениях (ПРС), от служебных свойств которых в значительной степени зависят надежность пути и затраты на его содержание и ремонт.

Не меньшее значение в формировании жесткости всего пути на железобетонных шпалах и сроках службы самого дорожного элемента – рельса – имеют упругие свойства клемм промежуточных рельсовых скреплений. Конструкции ПРС, применяемых на железных дорогах АО «НК «КТЖ» и ОАО «РЖД», приведены в учебно-методическом пособии [3]. Совершенствование конструкций ПРС с пружинными клеммами и улучшенными свойствами продолжается постоянно. Некоторые из них, в том числе для кривых участков пути, описаны в источниках [4 – 6].

Большую роль в формировании жесткости пути играют свойства и состояние подрельсового основания – шпал и балласта. Требования к ним изложены в межгосударственных стандартах стран ЕвразЭС. На базе этих требований разработаны основы и правила ведения путевого хозяйства.

Модуль упругости подрельсового основания является важнейшим в расчетах прочности пути и представляет собой погонный упругий отпор основания, отнесенный к единице прогиба.

На пути с деревянными шпалами в зависимости от рода древесины, типов и состояния шпал, материала, толщины и состояния балластного слоя, от характеристики земляного полотна и его состояния параметр  $U$  летом может быть в границах 15 – 50 МПа (обычно 25 – 27 МПа). На пути с железобетонными шпалами и резиновыми прокладками (толщиной 6 – 8 мм) при хорошо подбитых шпалах летом  $U = 100 – 150$  МПа. Зимой в районах с зимним промерзанием грунта  $U$  в 1,5 – 2 раза больше, чем летом [2].

Специальными исследованиями сотрудниками ВНИИЖТа установлено, что для пути с железобетонными шпалами оптимальное значение модуля упругости подрельсового основания в круглогодичном цикле 50 – 100 МПа. Излишняя жесткость пути увеличивает динамические взаимодействия пути и подвижного состава [2].

Точность и корректность принятых экспериментальных методов оценки силовых воздействий колес на рельсовый путь имеет первостепенное значение для анализа безопасности применения грузовых составных поездов.

Кромочные напряжения, обусловленные изгибом и кручением рельса от вертикального и горизонтального воздействия подвижного состава, являются важнейшими параметрами, определяющими прочность рельса [2]. Как известно [7], полусумма кромочных напряжений характеризует вертикальное воздействие на путь, а полуразность – горизонтальное (боковую силу). Эти параметры указывают также на характер воздействия моментов сил от приложе-

ния боковых нагрузок и смещения положения условного центра пятна контакта колеса и головки рельса [2].

В настоящей работе представлены результаты измерений кромочных напряжений и напряжений в шейке рельса в центре шпального ящика наружной рельсовой нити кривой радиусом 380 м, полученные при проведении испытаний грузовых вагонов и тепловоза на участке железнодорожной линии Алматы – Шу.

Неисправности подвижного состава – ползуны, неравномерный прокат, навар на колесах, диаметр колес, вид рессорного подвешивания, разность баз боковых рам, величина зазоров в буксовых проемах и завышение фрикционных клиньев относительно опорной поверхности надрессорной балки, а также неисправности пути: неровности в стыках и местах сварки рельсов, седловины, волнообразный износ и другие факторы значительно ухудшают взаимодействие элементов пути и подвижного состава [7]. Решение всего комплекса этой многовариантной задачи в данном исследовании не рассматривалось.

Измерения проводились в соответствии с требованиями ГОСТ Р 55050-2012 [7] при помощи тензометрического измерительно-вычислительного комплекса (рисунок 1), состоящего из сертифицированных и поверенных средств измерений ведущих мировых производителей. Комплекс позволяет производить прецизионные (высокоточные) измерения напряжений и относительных деформаций в элементах пути и пролетных строениях мостов от воздействия подвижного состава одновременно в 16 сечениях при длине измерительного тракта до 500 м.

Класс точности измерительной аппаратуры – 0,1, погрешность приведенных в данной работе результатов измерений находилась в пределах от 0,33 до 1%.



Рисунок 1 – Тензометрический измерительно-вычислительный комплекс для измерения относительных деформаций и напряжений в конструкциях: 1 – измерительные модули (16 шт.); 2 – полупромышленный ноутбук; 3 – синусный инвертор; 4 – межмодульный соединительный кабель; 5 – соединительный кабель между измерительным модулем и первичным преобразователем (тензомостом); 6 – аккумуляторная батарея

Комплекс апробирован на ряде объектов АО «НК «КТЖ» и показал хорошие результаты при оценке эффективности усиления конструкций железнодорожных мостов композитным материалом [8] и определении влияния динамического воздействия подвижного состава на железнодорожный путь и пролетные строения мостов [9 – 13]. В ближайшей перспективе

возможно использование аналогичного измерительно-вычислительного комплекса и на дорогах ОАО «РЖД».

Перед испытаниями по участку проходил путеизмерительный вагон. По результатам замеров службой, ответственной за состояние пути, выдавался акт о готовности пути к испытаниям и допустимых скоростях движения на участке.

Железнодорожная колея на этом участке содержится с допусками: по уширению – плюс 4 мм, по сужению – минус 2 мм; отступления геометрии рельсовой колеи не превышают первой степени в соответствии с ГОСТ 555050-2012 [7]. Эти параметры существенно зависят также и от качества сборки рельсошпальной решетки [14, 15], и от правильного технологического обслуживания бесстыкового пути [16], в том числе и смены рельсов [17].

Неровности на поверхности катания рельсов Т1 типа Р65 на экспериментальном участке с бесстыковой конструкцией пути не превышали допустимых значений [7].

Промежуточное рельсовое скрепление на экспериментальном участке пути КБ65 показано на рисунке 2. Несмотря на наличие двух амортизирующих прокладок у ПРС КБ65 с жесткой клеммой наибольшая жесткость пути [6].

Испытания грузовых вагонов проводились в порожнем и груженом состоянии согласно требованиям ГОСТ Р 55050-2012 [7].

Опытный поезд состоял из тепловоза СКД6е-2108 (максимальная статическая нагрузка 23 тс на ось), грузовых полувагонов 12-9941 (статическая осевая нагрузка 23,5 тс) и 19-9920 (статическая осевая нагрузка 25,0 тс), электровоза ВЛ80<sup>с</sup> (осевая нагрузка 24,0 тс).



Рисунок 2 – Экспериментальный участок

Заезды по измерительному участку пути производились «челночным» способом с управлением из кабин тепловоза и электровоза в светлое время суток. Прямым ходом принято движение состава из Шу в Алматы, обратным – из Алматы в Шу. При движении прямым ходом подвижные единицы опытного поезда располагались следующим образом: 6-осный тепловоз СКД6е-2108, порожний полувагон 12-9920, груженный полувагон 12-9920, груженный полувагон 12-9941, порожний полувагон 12-9941, 8-осный электровоз ВЛ80<sup>с</sup> (рисунок 3).

# Путь и искусственные сооружения

При движении обратным ходом подвижные единицы располагались, соответственно, наоборот, т. е. без переформирования подвижного состава.

На рисунке 3 показана схема расположения подвижных единиц опытного поезда в зависимости от направления движения при прямом и обратном ходе.

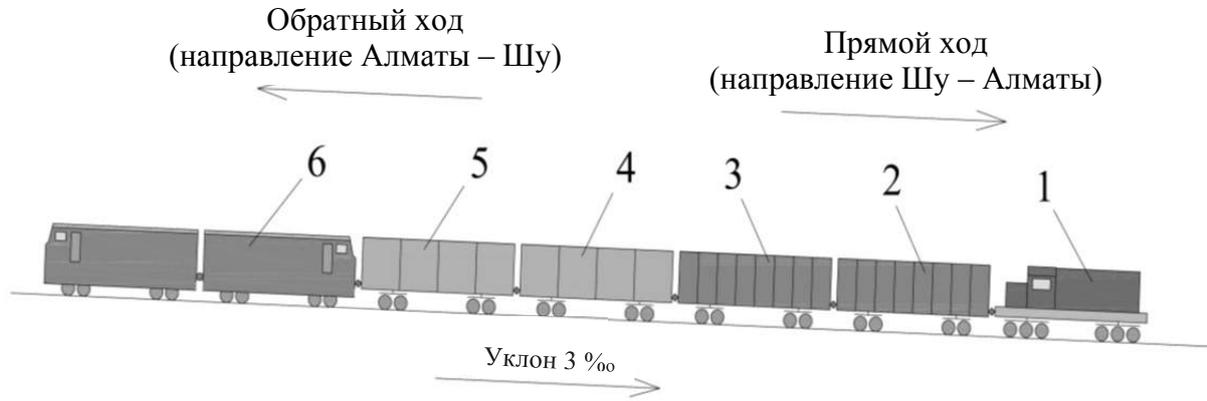


Рисунок 3 – Схема опытного поезда: 1 – тепловоз СКД6е-2108, 2 – порожний полувагон 12-9920, груженый полувагон 12-9920, 3 – груженый полувагон 12-9941, порожний полувагон 12-9941, 4 – электровоз ВЛ80<sup>с</sup>

На рисунке 4 представлены графики максимальных измеренных кромочных напряжений от воздействия груженого полувагона 12-9920 в диапазоне скоростей от 25 до 80 км/ч. На наружной кромке подошвы рельса наибольшее значение (106 МПа) зафиксировано при проходе состава со скоростью 40 км/ч из Алматы в Шу (обратный ход), наименьшее – 63 МПа при той же скорости, но состав проходил из Шу в Алматы. На внутренней кромке подошвы рельса наибольшее значение (75 МПа) наблюдалось также на скорости 40 км/ч при обратном ходе (Алматы – Шу), но наименьшее (55 МПа) зафиксировано на скорости 80 км/ч как при прямом, так и при обратном ходе.

Следует отметить, что при скорости 25 км/ч на внутренней кромке подошвы рельса количественные величины напряжений при прямом (58 МПа) и при обратном (62 МПа) проходе опытного состава хоть незначительно, но превышали зафиксированный минимум максимальных измеренных напряжений при скорости 80 км/ч.

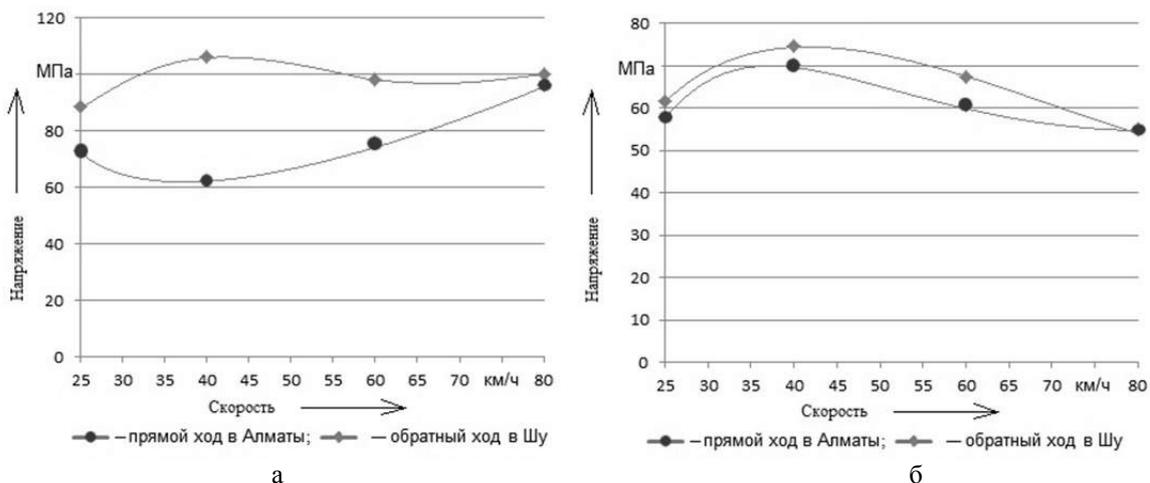


Рисунок 4 – Максимальные напряжения от воздействия груженого полувагона 12-9920: наружная (а) и внутренняя (б) кромки подошвы рельса

## Путь и искусственные сооружения

Несколько различаются как по количественным величинам напряжений, так и по характеру кривых графики, полученные при проходе груженого полувагона 12-9941 (рисунок 5). Максимальное значение напряжения в наружной кромке подошвы рельса (103 МПа) наблюдалось также при скорости экипажа 40 км/ч во время обратного прохода. Учитывая, что разница между осевыми нагрузками составляет 6 %, а разница между величинами напряжений (106 и 103 МПа) всего лишь 2,8 %, можно сделать вывод о том, что полувагон 12-9920 оказывает меньшее воздействие на путь, чем полувагон 12-9941.

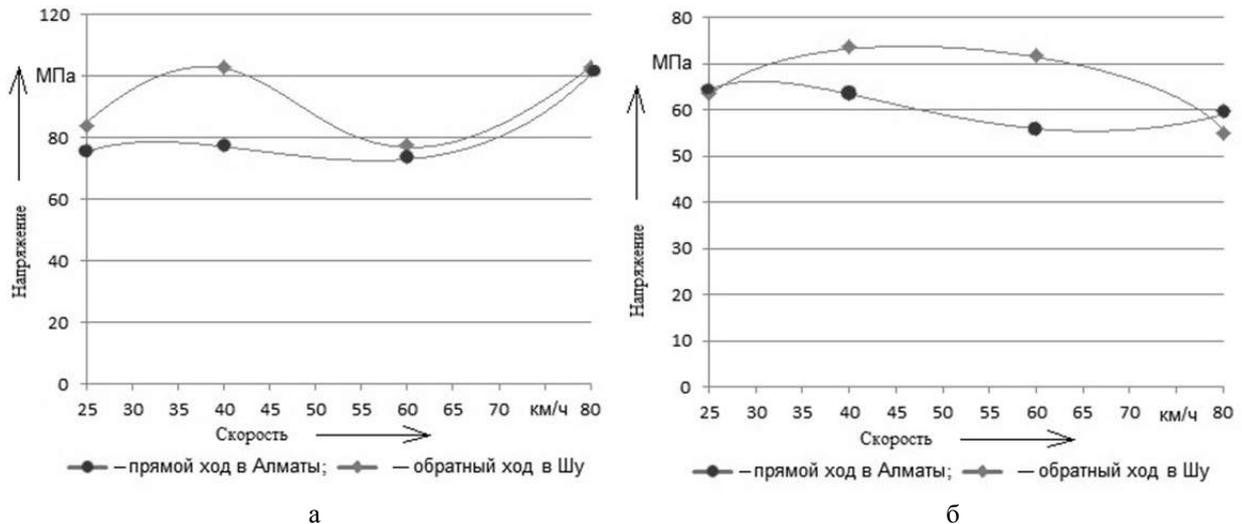


Рисунок 5 – Максимальные напряжения от воздействия груженого полувагона 12-9941: наружная (а) и внутренняя (б) кромки подошвы рельса

На рисунке 6 показаны графики максимальных измеренных кромочных напряжений при воздействии порожнего полувагона 12-9920. В данном случае наибольшие напряжения (34 МПа в наружной кромке при прямом ходе и 26 МПа во внутренней кромке при обратном ходе) зафиксированы на скорости 60 км/ч (в случае груженого полувагона – 40 км/ч). Причем увеличение скорости экипажа до 80 км/ч (независимо от направления хода) приводит к уменьшению напряжений в наружной кромке до 27, во внутренней – до 21 МПа.

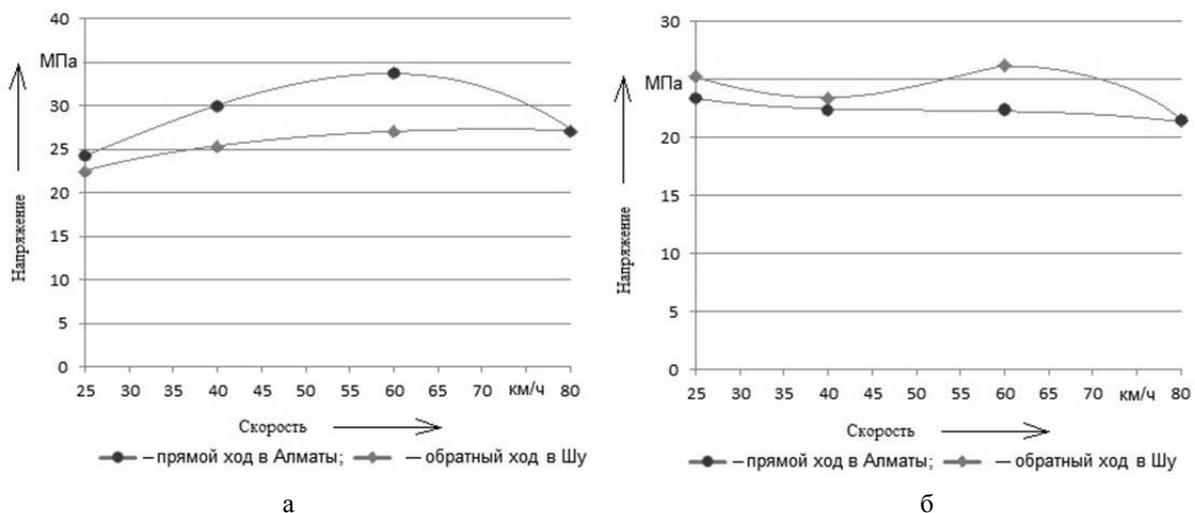


Рисунок 6 – Максимальные напряжения от воздействия порожнего полувагона 12-9920: наружная (а) и внутренняя (б) кромки подошвы рельса

## Путь и искусственные сооружения

Кривые напряжений в кромках подошвы рельсов, полученные при проходе по измерительному сечению порожнего полувагона 12-9941, приведены на рисунке 7. Наибольшие значения напряжений в наружной (40 МПа при скорости 40 км/ч) и во внутренней (32 МПа при скорости 80 км/ч) кромках подошвы рельса наблюдались при обратном ходе подвижного состава. Наименьшие значения напряжений (23 МПа в наружной кромке при прямом проходе, 24 МПа при обратном проходе во внутренней кромке) зафиксированы на скорости 25 км/ч.

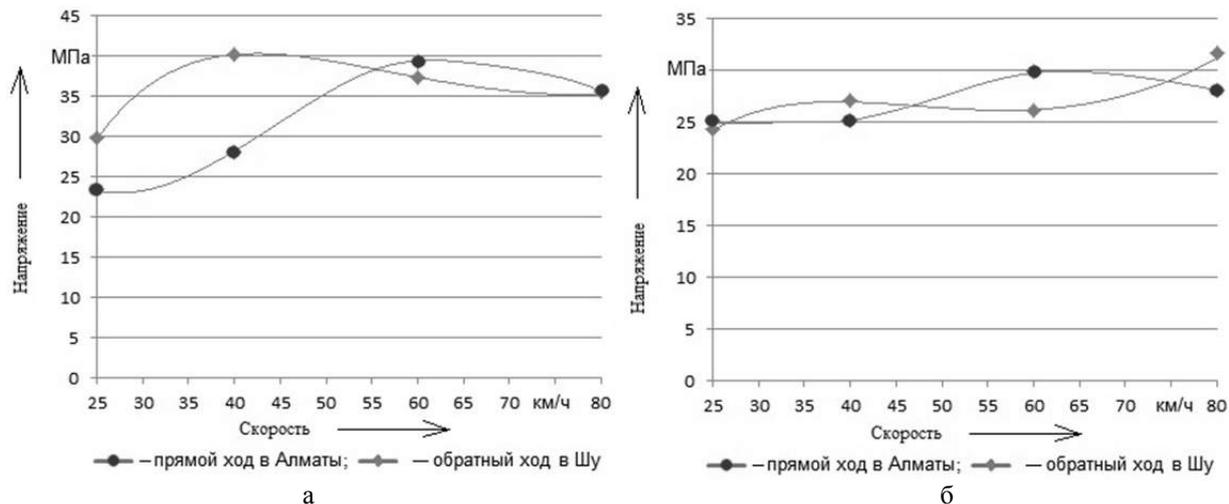


Рисунок 7 – Максимальные напряжения от воздействия порожнего полувагона 12-9941: наружная (а) и внутренняя (б) кромки подошвы рельса

Графики максимальных измеренных кромочных напряжений, возникающих при проходе по измерительному сечению маневрового тепловоза СКД-6е, представлены на рисунке 8. В наружной кромке зависимость практически линейна. Наибольшее значение в наружной кромке (107 МПа при прямом и при обратном проходе) зафиксировано на скорости 80 км/ч, наименьшее (56 МПа при обратном проходе) – на скорости 25 км/ч. Во внутренней кромке наблюдается максимум (53 МПа) на скорости 40 км/ч и минимум (44 МПа) на скорости 60 км/ч при обратном проходе. При скоростях 25 и 80 км/ч напряжения (50 МПа) равнозначны как при прямом, так и при обратном ходе экипажа. На скорости 40 км/ч напряжение при обратном ходе подвижного состава (из Алматы в Шу) соответствовало напряжениям на скоростях 25 и 80 км/ч и было равно 50 МПа.

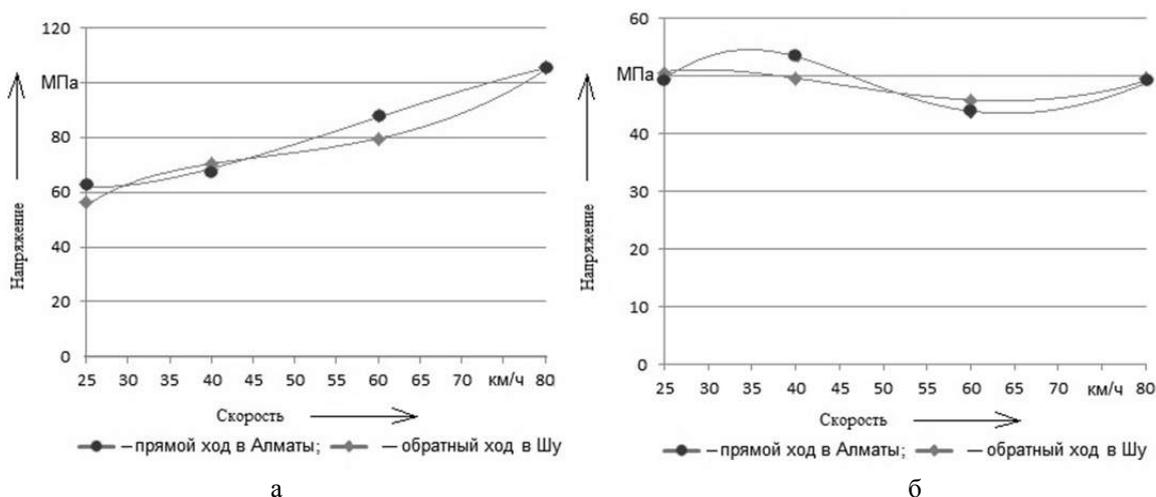


Рисунок 8 – Максимальные напряжения от воздействия тепловоза СКД-6е: наружная (а) и внутренняя (б) кромки подошвы рельса

Из анализа графиков, изображенных на рисунке 9, представляющих зависимости максимальных измеренных кромочных напряжений, возникающих при проходе по измерительному сечению электровоза ВЛ-80<sup>с</sup>, следует, что в диапазоне скоростей от 40 до 80 км/ч в наружной кромке подошвы рельса происходит резкий скачок напряжений от 100 до 192 МПа при прямом ходе. Причем на скорости 25 км/ч, напряжение (110 МПа) превышало напряжение (100 МПа), соответствующее скорости 40 км/ч. При обратном ходе напряжения увеличиваются менее резко – от 100 МПа на скорости 25 км/ч до 156 МПа на скорости 80 км/ч.

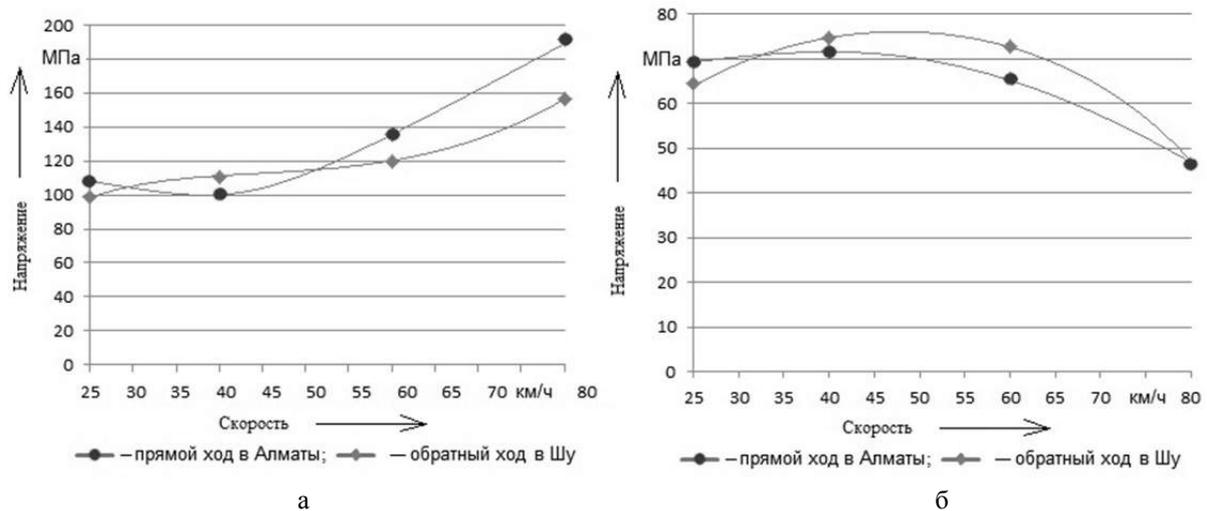


Рисунок 9 – Максимальные напряжения от воздействия электровоза ВЛ-80<sup>с</sup>: наружная (а) и внутренняя (б) кромки подошвы рельса

Во внутренней кромке подошвы рельса при прямом ходе с увеличением скорости состава от 25 до 40 км/ч наблюдается увеличение напряжений от 69 до 72 МПа, при дальнейшем увеличении скорости от 40 до 80 км/ч происходит падение напряжений до 47 МПа. Это объясняется известным эффектом обезгруживания колеса вследствие частичного отрыва от рельса при увеличении скорости движения. Особенно это характерно для порожних вагонов.

При обратном ходе с увеличением скорости состава от 25 до 40 км/ч напряжения увеличиваются от 64 до 75 МПа, на скорости 60 км/ч уменьшаются до 73 МПа, а при увеличении скорости до 80 км/ч снижаются до 47 МПа.

Причина резкого скачка напряжений от 110 до 192 МПа при прямом ходе электровоза ВЛ80<sup>с</sup> с увеличением скорости от 40 до 80 км/ч обусловлена, вероятнее всего, значительным износом данного локомотива в связи с длительным сроком эксплуатации.

Разброс между величинами напряжений в 30 % на скорости 40 км/ч при прямом и обратном ходе того же электровоза ВЛ80<sup>с</sup> можно объяснить возникновением дополнительных напряжений при движении на подъем в 3 ‰ при обратном ходе в сторону Шу.

Динамическое воздействие на рельс опытного поезда наглядно иллюстрируют представленные на рисунках 10 и 11 диаграммы напряжений в наружной и внутренней кромках подошвы рельса. Состав проходил со скоростью 60 км/ч из Алматы в Шу (обратный ход). Видно, что порожние полувагоны 12-9920 оказывают на рельс меньшее силовое воздействие, чем полувагоны 12-9941. Воздействие груженых полувагонов 12-9920 с большей осевой нагрузкой практически равнозначно воздействию груженых полувагонов 12-9941.

Данное обстоятельство (приведенные выше результаты измерений кромочных напряжений при воздействии порожних и груженых полувагонов также подтверждают это) можно объяснить улучшенными характеристиками рессорного подвешивания полувагонов 12-9920 вследствие применения тележки модели ЗК1, которая исключает следующее:

продольные забегания боковых рам относительно друг друга, в результате уменьшается интенсивность виляния тележки, улучшается плавность хода вагона;

маятниковые колебания рам относительно собственных продольных осей, в результате устанавливается равномерная передача нагрузок на элементы буксового узла, что позволяет исключить перекосы подшипников.

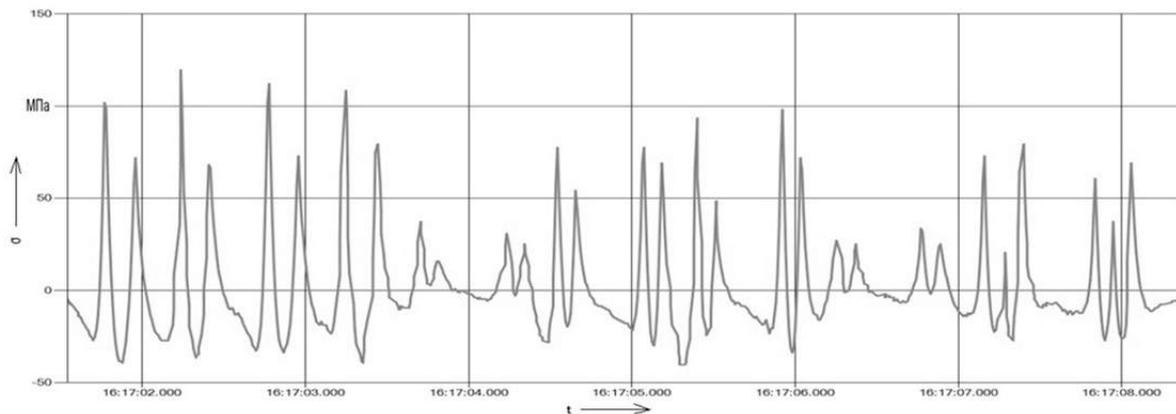


Рисунок 10 – Диаграмма напряжений в наружной кромке подошвы рельса (обратный ход)

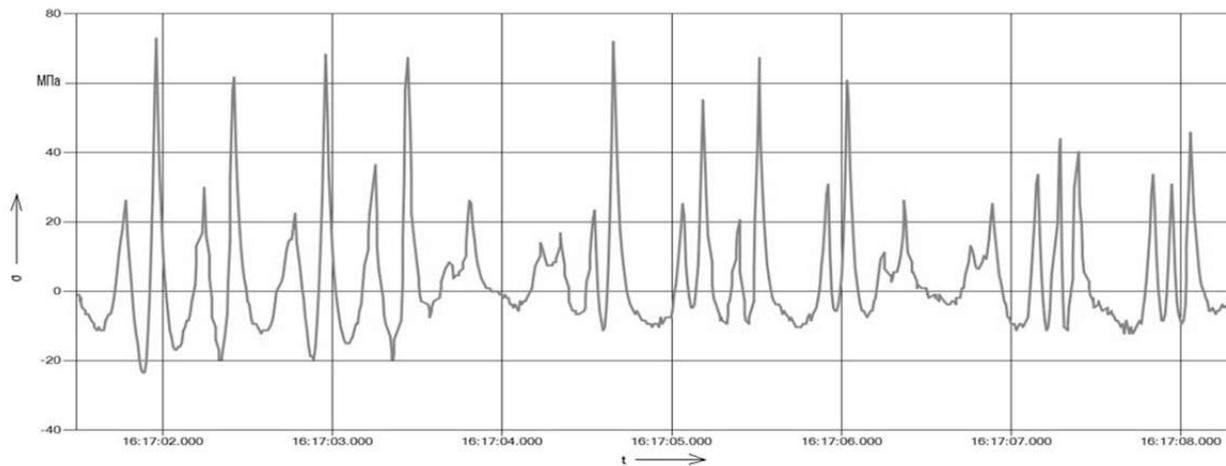


Рисунок 11 – Диаграмма напряжений во внутренней кромке подошвы рельса (обратный ход)

Тележка ZK1 состоит из литой надрессорной балки коробчатого сечения с четырьмя технологическими проемами и литых боковых рам с технологическими окнами. Для более жесткой связи между боковыми рамами, надрессорной балкой и рессорными комплектами боковые рамы диагонально соединены между собой при помощи двух перекрестно скрепленных упругих элементов (анкерных связей). Конструкция сочленения надрессорной балки с боковыми рамами обеспечивает прямоугольность очертания тележки в плане. Достигается также соосность осей колесных пар при движении тележки. Для облегчения вписывания в кривые участки пути эти тележки имеют поперечный ход колесной пары относительно боковины 11 мм. Для снижения виляния тележки в буксовых узлах применены резиновые адаптеры. Тележка модели ZK1 рассчитана на осевую нагрузку 245 кН (25 тс) и скорость движения 120 км/ч.

На рисунке 12 приведена диаграмма измеренных напряжений в шейке рельса, а на рисунке 13 – распределение расчетных нормальных вертикальных напряжений в рельсе, вычисленных с использованием метода конечных элементов (МКЭ). Очевидно, что измеренные напряжения сопоставимы с расчетными напряжениями.

На основании изложенного можно сделать выводы.

Полученные экспериментальные данные значений кромочных напряжений в подошве и напряжений в шейке рельса позволяют сделать вывод о том, что по воздействию на путь полувагоны с большей осевой нагрузкой 12-9920 (25 тс), но с улучшенным рессорным подвешиванием предпочтительнее, чем полувагоны 12-9941 (23,5 тс).

Повышение весовых норм грузовых поездов является весьма актуальным вопросом. Проведенные измерения показали, что это вполне возможно без сверхнормативного воздействия на железнодорожный путь и, соответственно, затрат на реконструкцию инфраструктуры при эксплуатации на сети дорог АО «НК «КТЖ» и ОАО «РЖД» модернизированных грузовых полувагонов с осевой нагрузкой 245 кН (25 тс).

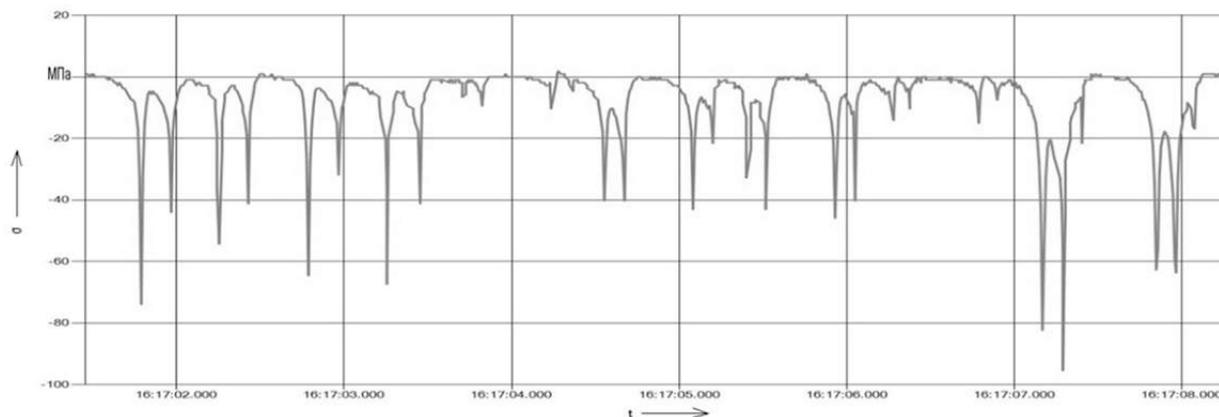


Рисунок 12 – Диаграмма напряжений в шейке рельса (обратный ход)

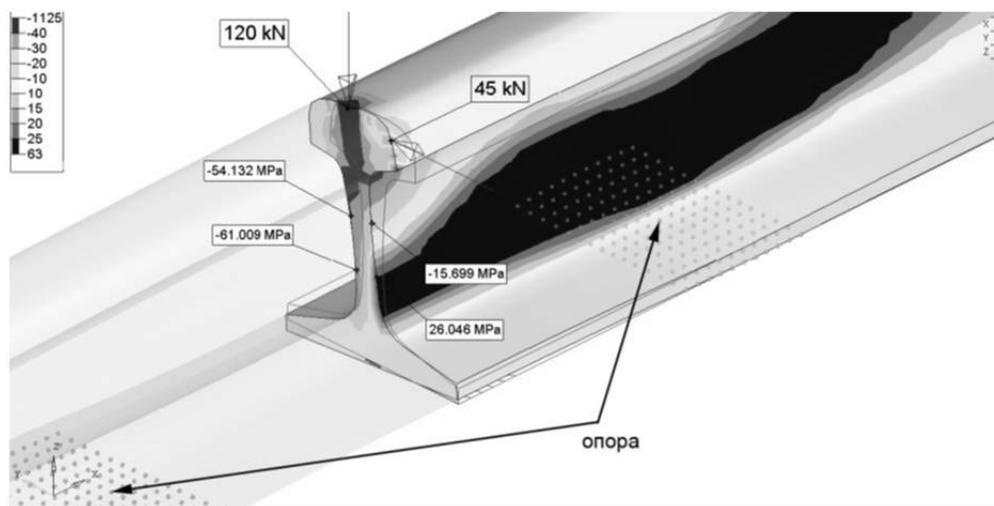


Рисунок 13 – Распределение нормальных вертикальных напряжений в рельсе, МПа. Вертикальная сила 120 кН, боковая сила 45 кН, нагрузки между опорами

## Список литературы

1. Стратегия развития холдинга «РЖД» на период до 2030 года (основные положения) [Текст] [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://doc.rzd.ru>
2. Карпущенко, Н. И. Обеспечение надежности железнодорожного пути и безопасности движения поездов: Монография [Текст] / Н. И. Карпущенко, Д. В. Величко / Сибирский гос. ун-т путей сообщения. – Новосибирск, 2008. – 320 с.
3. Косенко, С. А. Альбом чертежей верхнего строения пути: Учебно-методическое пособие [Текст] / С. А. Косенко, А. Д. Монастырский, М. М. Алимкулов / Казахская акад. транспорта и коммуникаций. – Алматы, 2015. – 318 с.
4. Пат. 449 Республика Казахстан, МПК Е 01 В 9/38. Промежуточное рельсовое скрепление (варианты) [Текст] / Исаенко Э. П., Косенко С. А., Махамбетов Н. К., Гречаниченко Д. Ю., Финк В. К.; заявл. 29.11.2008; опубл. 16.02.2009.
5. Пат. 81831 Республика Казахстан, МПК Е 01 В 9/38. Промежуточное рельсовое скрепление [Текст] / Исаенко Э. П., Косенко С. А., Махамбетов Н. К., Гречаниченко Д. Ю., Финк В. К.; опубл. 08.01.2013.

6. Исаенко, Э. П. Рельсовое скрепление для кривых радиусом менее 800 м [Текст] / Э. П. Исаенко, С. Н. Шарапов, С. А. Косенко // Путь и путевое хозяйство. – М. – 2013. – № 6. – С. 9 – 12.

7. ГОСТ Р 55050-2012. Железнодорожный подвижной состав. Нормы допустимого воздействия на путь и методы испытаний [Текст]. – М.: Стандартинформ, 2013. – 29 с.

8. Экспериментальные исследования конструкций железнодорожных мостов, усиленных композитным материалом [Текст] / М. Я. Квашнин, И. С. Бондарь и др. // Труды 16-й науч.-практ. конф. «Безопасность движения поездов» / Московский гос. ун-т путей сообщения. – М., 2015. – Т. II. – С. II-43 – II-47.

9. Экспериментальное определение динамических характеристик железнодорожного пути [Текст] / С. А. Косенко, М. Я. Квашнин и др. // Трансэкспресс Казахстан. – Алматы, 2013. – № 3(48). – С. 50 – 54.

10. Экспериментальные исследования вибродинамического воздействия подвижной нагрузки на основную площадку земляного полотна в холодных регионах [Текст] / М. Я. Квашнин, С. А. Косенко и др. // Материалы 2-го междунар. симпозиума по проблемам земляного полотна в холодных регионах / Сибирский гос. ун-т путей сообщения. – Новосибирск, 2015. – С. 147 – 157.

11. Бондарь, И. С. Диагностика и мониторинг балочных пролетных строений железнодорожных мостов [Текст] / И. С. Бондарь, М. Я. Квашнин, С. А. Косенко // Материалы IX междунар. науч.-техн. конф. «Политранспортные системы» / Сибирский гос. ун-т путей сообщения. – Новосибирск, 2016. – С. 76 – 81.

12. Влияние вибродинамического воздействия локомотивов с высокими осевыми нагрузками на железнодорожный путь и балочные железобетонные пролетные строения мостов [Текст] / М. Я. Квашнин, С. А. Буромбаев и др. // Труды XII междунар. науч.-техн. конф. «Современные проблемы проектирования, строительства и эксплуатации железнодорожного пути». Чтения, посвященные памяти профессора Г. М. Шахунянца / Московский гос. ун-т путей сообщения. – М., 2015. – С. 163 – 166.

13. Махметова, Н. М. Экспериментальный метод оценки динамического воздействия экипажа на путь [Текст] / Н. М. Махметова, М. Я. Квашнин, Н. М. Квашнин // Повышение динамических качеств подвижного состава и поезда: Межвуз. темат. сб. науч. тр. / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, – 2013. – С. 7 – 16.

14. Пат. 2334040 Российская Федерация, МПК Е 01 В 29/24, Е 01 В 9/00. Способ повышения качества рельсошпальной решетки железнодорожного пути [Текст] / Букин М. Н., Бунин А. И., Волков В. И., Григорьев А. В., Григорьев В. Л., Ежов Д. В., Зайцев Н. И., Иванов П. С., Игнатъев О. А., Ключко А. П., Ключко В. А., Коннов Ю. В., Косенко С. А., Лесун А. Ф., Мусаев С. К., Петров А. А., Родионов А. В., Русин А. Н., Сатаев К. Н., Уразбеков А. К., Филиппов А. И., Хаков М. А., Чурашов О. А., Шайдуллин Ш. Н., Шулепова Н. Г., Юзык О. В.; заявитель и патентообладатель Иванов Петр Степанович; заявл. 20.02.2004; опубл. 20.09.2008.

15. Пат. 2334039 Российская Федерация, МПК Е 01 В 29/24, Е 01 В 9/00. Способ сборки высококачественной рельсошпальной решетки железнодорожного пути [Текст] / Букин М. Н., Бунин А. И., Волков В. И., Горковенко А. А., Григорьев А. В., Григорьев В. Л., Ежов Д. В., Зайцев Н. И., Иванов П. С., Игнатъев О. А., Ключко А. П., Ключко В. А., Коннов Ю. В., Косенко С. А., Лесун А. Ф., Мусаев С. К., Петров А. А., Родионов А. В., Сатаев К. Н., Уразбеков А. К., Филиппов А. И., Хаков М. А., Чурашов О. А., Шайдуллин Ш. Н., Шулепова Н. Г., Юзык О. В.; заявитель и патентообладатель Иванов Петр Степанович; заявл. 20.02.2004; опубл. 20.09.2008.

16. Совершенствование технологического обслуживания бесстыкового пути [Текст] / С. А. Косенко, А. С. Шуругин и др. // Транспорт Урала / Уральский гос. ун-т путей сообщения. – Екатеринбург. – 2016. – № 2 (49). С. 44 – 47.

17. Метод смены температурно зажатых уравнильных рельсов бесстыкового пути [Текст] / С. А. Косенко, Р. В. Шаньгин и др. // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование / Иркутский гос. ун-т путей сообщения. – Иркутск. – 2015. – № 3 (47). – С. 187 – 190.

## References

1. *Strategiia razvitiia kholdinga «RZD» na period do 2030 goda (osnovnye polozheniia)* (Strategy for the development of the holding «RZD» for the period until 2030 (basic position).
2. Karpushchenko N.I., Velichko D.V. *Obespechenie nadezhnosti zheleznodorozhnogo puti i bezopasnosti dvizheniia poezdov* (Provision railway track reliability and safety of train traffic). Novosibirsk: SGUPS, 2008, 320 p.
3. Kosenko S.A., Monastyrskii A.D., Alimkulov M.M. *Al'bom chertezhei verkhnego stroeniia puti* (Album of drawings of the permanent way). Almaty: KazATK, 2015, 318 p.
4. Fink V.K., Isaenko E.P., Kosenko S.A. i dr. *Patent Respubliki Kazakhstan № 449*, 29.11.2008.
5. Fink V.K., Isaenko E.P., Kosenko S.A. i dr. *Patent Respubliki Kazakhstan № 81831*, 08.01.2013.
6. Isaenko E.P., Sharapov S.N., Kosenko S.A. Rail fastening for curves with a radius of less than 800 m [Rel'sovoe skreplenie dlia krivykh radiusom menee 800 m] // *Put' i putevoe khoziaistvo – Railway Track and Facilities*, 2013, no 6. pp.9 – 12.
7. *Zheleznodorozhnyi podvizhnoi sostav. Normy dopustimogo vozdeistviia na put' i metody ispytaniia, GOST R 55050-2012*. Railway rolling stock. Permissible exposure norms to the railway track and test methods. Moscow: Standartinform, 2013. 29 p.
8. Kvashnin M.J., Bondar' I.S., Rystygulov P.A., Kystaubayev S.B. Experimental investigation of the railway bridge constructions reinforced with composite material. [Eksperimental'nye issledovaniia konstruktsii zheleznodorozhnykh mostov, usilivaemykh kompozitnym materialom]. *Trudy Shestnadtsatoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Bezopasnost' dvizheniia poezdov»*. Moscow: MGUPS (MIIT), 2015. T. II, pp. II-43 – II-47.
9. Kosenko S.A., Kvashnin M.J., Ismagulova S.O., Kvashnin N.M. Experimental determination of the railway track dynamic characteristics. [Eksperimental'noe opredelenie dinamicheskikh kharakteristik zheleznodorozhnogo puti]. *Analiticheskii otraslevoi zhurnal «Trans ekspress Kazakhstan» – Analytical branch magazine "Trans Express Kazakhstan"*. Almaty, 2013. no. 3(48). pp. 50 – 54.
10. Kvashnin M.J., Kosenko S.A., Kvashnin N.I., Bondar' I.S. Experimental studies impact vibrodynamic moving load on the main platform of subgrade in cold regions. [Eksperimental'nye issledovaniia vibrodinamicheskogo vozdeistviia podvizhnoi nagruzki na osnovnuiu ploshchadku zemlianogo polotna v kholodnykh regionakh]. *Materialy vtorogo Mezhdunarodnogo simpoziuma po problemam zemlianogo polotna v kholodnykh regionakh*. Novosibirsk: SGUPS, 2015. pp. 147 – 157.
11. Bondar' I.S., Kvashnin M.J., Kosenko S.A. Diagnostics and monitoring of beam span structures of railway bridges [Diagnostika i monitoring balochnykh proletnykh stroeniia zheleznodorozhnykh mostov]. *Materialy IX Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii «Poli-transportnye sistemy»*. Novosibirsk: SSTU, 2016. pp. 76 – 81.
12. Kvashnin M.J., Burombaev S.A., Bondar' I.S., ZHANGABAYLOV A.M. Influence of vibrodynamic effects of locomotives with high axial loads on the railway track and reinforced concrete bridge span structures of bridges [Vliianie vibrodinamicheskogo vozdeistviia lokomotivov s vysokimi osevmi nagruzkami na zh.d. put' i balochnye zh.b. proletnye stroeniia mostov]. *Trudy XII Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii «Sovremennye problemy proektirovaniia, stroitel'stva i ekspluatatsii zheleznodorozhnogo puti»*. *Chteniia, posviashchennye pamiati professora G.M. Shakhuniantsa*. Moscow: MGUPS (MIIT), 2015. pp. 163 – 166.
13. Mahmetova N.M., Kvashnin M.J., Kvashnin N.M. The experimental method for estimating the dynamic impact of the crew on the track [Eksperimental'nyi metod otsenki dinamicheskogo vozdeistviia ekipazha na put']. *Povyshenie dinamicheskikh kachestv podvizhnogo sostava i poezda: mezhvuzovskii tematicheskii sbornik nauchnykh trudov*. Omsk: OmGUPS, 2013. pp. 7 – 16.

14. Shaidullin Sh.N., Ivanov P.S., Kosenko S.A. i dr. *Patent RU № 2334040 C2*, 20.09.2008.

15. Shaidullin Sh.N., Ivanov P.S., Kosenko S.A. i dr. *Patent RU № 2334039 C2*, 20.09.2008.

16. Kosenko S.A., Shurugin A.S., Udin O.G., Akimov S.S. The improvement of technology for continuous welded rail maintenance [Sovershenstvovanie tekhnologicheskogo obsluzhivaniia besstykovogo puti] // *Transport Urala – Transport of the Urals*, 2016. no. 2 (49). pp. 44 – 47.

17. Kosenko S.A., Shangin R.V., Shurugin A.S., Akimov S.S. Method of changing the temperature clamped equalizing rails on continuous welded rail [Metod smeny temperaturno zazhatykh uravnitel'nykh rel'sov besstykovogo puti] // *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie – Modern technologies. System analysis. Modeling*, 2015, no. 3 (47). pp. 187 – 190.

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

### Косенко Сергей Алексеевич

Сибирский государственный университет путей сообщения (СГУПС).

ул. Дуси Ковальчук, д. 191, г. Новосибирск, 630049, Российская Федерация.

Доктор технических наук, профессор кафедры «Путь и путевое хозяйство», СГУПС.

E-mail: kosenko.s.a@mail.ru

### Квашнин Михаил Яковлевич

Казахская академия транспорта и коммуникаций им. М. Тынышпаева (КазАТК).

ул. Шевченко, д. 97, г. Алматы, 050012, Республика Казахстан.

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Транспортное строительство», КазАТК.

E-mail: kvashnin\_mj55@mail.ru

### Бондарь Иван Сергеевич

Казахская академия транспорта и коммуникаций им. М. Тынышпаева (КазАТК).

ул. Шевченко, д. 97, г. Алматы, 050012, Республика Казахстан.

Старший преподаватель кафедры «Транспортное строительство», КазАТК.

E-mail: ivan\_sergeevich\_08@mail.ru

### Акимов Сергей Сергеевич

Сибирский государственный университет путей сообщения (СГУПС).

ул. Дуси Ковальчук, д. 191, г. Новосибирск, 630049, Российская Федерация.

Аспирант кафедры «Путь и путевое хозяйство», СГУПС.

E-mail: ak\_s\_s@mail.ru

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Эксплуатационные измерения напряжений в рельсе при воздействии подвижного состава [Текст] / С. А. Косенко, М. Я. Квашнин и др. // *Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения*. – Омск. – 2017. – № 2 (30). – С. 133 – 145.

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

### Kosenko Sergey Alekseevich

Siberian State Transport University (SSTU).

191, Dusi Kovalchuk st., Novosibirsk, 630049, the Russian Federation.

Doctor of Technical Sciences, Professor of the department «Track and Track Facilities», SSTU.

E-mail: kosenko.s.a@mail.ru

### Kvashnin Mikhael Jakovlevich

Kazakh Academy of Transport and Communications named after M.Tynyshpaev (KazATC)

97, Shevchenko st., Almaty, 050012, Republic of Kazakhstan.

Ph. D. in Engineering, Associate Professor of the department «Transport construction», KazATC

E-mail: kvashnin\_mj55@mail.ru

### Bondar Ivan Sergeevich

Kazakh Academy of Transport and Communications named after M.Tynyshpaev (KazATC).

97, Shevchenko st., Almaty, 050012, Republic of Kazakhstan.

Senior Lecturer of the department «Transport construction», KazATC.

E-mail: ivan\_sergeevich\_08@mail.ru

### Akimov Sergey Sergeevich

Siberian State Transport University (SSTU).

191, Dusi Kovalchuk st., Novosibirsk, 630049, the Russian Federation.

Postgraduate student of the department «Track and Track Facilities», SSTU.

E-mail: ak\_s\_s@mail.ru

## BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Kosenko S. A., Kvashnin M. J., Bondar I. S., Akimov S. S. Field measurements of rail stresses under the influence of the rolling stock. *Journal of Transsib Railway Studies*, 2017, vol. 30, no. 2, pp. 133 – 145 (In Russian).

**О. Д. Покровская**

Сибирский государственный университет путей сообщения (СГУПС), г. Новосибирск, Российская Федерация

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЭВОЛЮЦИИ ТРАНСПОРТНЫХ УЗЛОВ КАК ЛОГИСТИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

**Аннотация.** Предмет исследования – эволюция транспортных узлов как логистических объектов (ЛО). Цель исследования – разработке методики изучения ЛО в их развитии с учетом изменения выполняемых ими логистических функций. В работе исследованы значащие для эволюции признаки ЛО и влияющие на них факторы. Под состоянием ЛО понимается совокупность показателей, идентифицирующих его в общей иерархической системе (определяющих его тип) и характеризующих его работу в целом. Разработан функционально-логистический подход, отражающий особенности развития функционального арсенала ЛО и его роли в системе доставки грузов. Его сущность представлена также графически. Разработана авторская классификация типов ЛО с учетом их эволюции и иерархии. В основу типологии ЛО положена эволюция реализуемого ЛО логистического сервиса. Охарактеризованы этапы функционального развития ЛО. Представлены параметрическое описание ЛО и понятийный аппарат с учетом классификации и эволюции ЛО. Разработана методика исследования ЛО на основе эволюционной сети состояний. Эволюционно-функциональная теория отражена в виде «ромба эволюционно-функционального развития ЛО». Предлагаемая теоретико-графическая модель эволюционной сети состояний может быть применима: 1) при определении условий наилучшего режима функционирования ЛО для планирования объектов терминально-складской инфраструктуры; 2) при эксплуатации и развитии терминально-складской инфраструктуры; 3) как оценочный инструмент по выявлению «узких мест» и по системному совершенствованию всех аспектов работы ЛО. Результаты исследования могут применяться при проектировании, планировании развития и оценке объектов терминально-складской инфраструктуры ОАО «РЖД».

**Ключевые слова:** транспортный узел, функционально-логистический подход, эволюционная сеть состояний, логистический объект.

**Oksana D. Pokrovskaya**

Siberian State University of Railway Transport (STU), Novosibirsk, the Russian Federation

## THE STUDY OF THE EVOLUTION OF TRANSPORT HUBS AS LOGISTICS FACILITIES

**Abstract.** Subject of research – the evolution of logistics objects (LO). The purpose of the research is the development of methods to study the LO in their development, taking into account changes that they execute logistics functions. Research methodology based on set theory, graph theory, theory of transport systems, general systems theory and the author's methodology terminalistics. The authors studied the most significant for the evolution of the LO characteristics and factors influencing them. The condition of LO is a set of indicators identifying the overall hierarchical system (defining its type) and characterizes his work in general. This study describes an evolutionary-functional approach. This approach is reflecting the characteristics of the development of the functional arsenal of LO and its role in the system of delivery. Its essence is also presented graphically. The author has developed a classification of types of LO, given their evolution and hierarchy. The basis of the typology of LO is the LO evolution of the implemented logistic services. Also this study describes the stages of functional development of the LO. A parametric description of the LO and the conceptual framework taking into account the classification and evolution of the LO present in this study. The author proposes the methodology of research LO on the basis of the evolution of the network states. The evolutionary-functional theory is reflected in the form of a "rhombus evolutionary and functional development of the LO." This theoretical and graphical model evolutionary network conditions may be applicable: 1) in determining the terms of the best mode of operation LO for planning of objects of terminal and warehouse infrastructure, 2) the operation and development of terminal and warehouse infrastructure; 3) as an evaluation tool to identify bottlenecks and system improvement of all aspects of the work LO. The results of the study can be used in the design, planning, development and evaluation of objects of terminal and warehouse infrastructure of Russian Railways.

**Keywords:** transport hub, evolutionary-functional approach, evolutionary network, logistics object.

В настоящее время российский рынок страны не располагает сложившимся фконцептуальным подходом и устоявшейся единой терминологией в сфере исследования объектов тер-

минально-складской инфраструктуры. Во многом это связано с относительной «молодостью» отечественной логистики. Недостаточно разработан универсальный понятийный аппарат, отражающий свойства и логистическую роль объектов терминально-складской инфраструктуры транспорта. При этом современные транспортные узлы, участвуя в системе доставки грузов, преобразуют грузопотоки и реализуют широкий ассортимент дополнительных услуг по хранению, распределению, складской переработке и перевозке грузов на своей терминально-складской инфраструктуре. Перечисленное свидетельствует об актуальности теоретико-методологических разработок, поскольку оптимизировать работу транспортных узлов (ТУ) невозможно без достаточного теоретического исследования.

Актуальность исследования вопросов зарождения, формирования и последующей трансформации (эволюции) ТУ связана с их основополагающим значением при проектировании технической оснащённости, технологии работы, механизма организации и межэлементного взаимодействия таких сложных систем, как логистические объекты. Роль логистических объектов в системе доставки как ключевых грузоперерабатывающих элементов трудно переоценить. Именно на основе инфраструктуры ТУ как логистических объектов различного типа преобразуются и подготавливаются грузопотоки, с которыми затем работает транспорт. Очевидно, что от бесперебойной работы ТУ и слаженного взаимодействия видов транспорта в них зависит эффективность всей транспортно-логистической системы страны [1].

Транспортная сеть состоит из транспортных узлов и соединяющих их линий. Логистическую инфраструктуру узлов транспортной сети представляют собой ЛО – логистические объекты, т. е. пункты начала и окончания локальных грузопотоков или пункты взаимодействия разных видов транспорта, где грузы перегружаются с одних видов транспорта на другие. Соединяющие их транспортные звенья или направления перевозок – это различные пути сообщения, транспортные коммуникации, по которым грузопотоки продвигаются из мест зарождения к местам их окончания или распыления. В узлах транспортной сети располагаются логистические объекты, через которые грузы передаются с одних видов транспорта на другие или в производственные, торговые и другие системы. При этом ЛО обеспечивают эффективное взаимодействие разных транспортных систем, характеризующихся различными устройством, параметрами, организацией движения транспортных средств и т. д. Именно ЛО обеспечивают наименьшие простои транспортных средств двух взаимодействующих видов транспорта и позволяют максимально быстро перерабатывать грузопотоки.

Та или иная стадия функционального развития является определяющей при выборе технической оснащённости, ассортимента и целевого сегмента транспортно-логистических услуг, при совершенствовании технологии работы, механизма организации и межэлементного взаимодействия таких сложных систем, как транспортные узлы. Указанное послужило основанием для выбора темы данного исследования.

**Предметом** исследования является эволюция ТУ как логистических объектов.

**Цель исследования** заключается в разработке методики изучения ЛО в их развитии с учетом изменения выполняемых ими логистических функций. Для достижения поставленной цели решались следующие **задачи**: 1) разработать функционально-логистический подход, отражающий особенности развития функционального арсенала ЛО и его роли в системе доставки грузов; 2) предложить систему классификации ЛО; 3) сформулировать универсальные определения для каждого из трех иерархических уровней ЛО; 4) разработать методику исследования ЛО на основе эволюционной сети состояний.

**Обоснование актуальности вопроса.**

Необходимость построения стройной системы знаний о ЛО, в частности, о железнодорожных станциях и узлах, определяется объективными требованиями рынка. Так, в Стратегии развития железнодорожного транспорта РФ на период до 2030 года [1] большое внимание уделяется проблемам формирования опорной транспортной сети без разрывов и «узких мест», ликвидации диспропорций в уровне развития транспортной инфраструктуры в от-

дельных регионах страны, реализации приоритетных инфраструктурных проектов, обеспечивающих единство транспортной системы и «бесшовность» транспортно-логистических услуг. В отсутствие общепринятого, единого подхода к классификации ЛО усложняется понимание всеми участниками процесса перевозок роли таких объектов. В существующих классификациях транспортных (железнодорожных) узлов акцент сделан на проектировании, генеральном планировании, особенностях промышленности (специализации района, путях примыкания, взаимодействии с промышленным объектом...), но не на логистике. Транспортные узлы рассматриваются в большинстве классификаций как промышленные, экономические, технические, но не логистические объекты. При этом каждый выполняет различные логистические функции. Но, несмотря на то, что именно от их слаженной работы зависит эффективность грузодвижения по всей стране, транспортные узлы и станции не имеют полноценной логистической классификации, отражающей мощнейший функционально-логистический потенциал инфраструктуры ОАО «РЖД» [2 – 4].

Транспортным узлом называется грузообразующий или грузопоглощающий объект, комплекс транспортных устройств в пункте взаимодействия нескольких видов магистрального транспорта, совместно выполняющих операции по обслуживанию транзитных, местных и внутриузловых перевозок грузов и пассажиров.

Железнодорожный узел – это группа специализированных станций, расположенных в пунктах слияния трех и более железнодорожных направлений, связанных соединительными линиями и имеющих взаимную корреспонденцию вагоно- и пассажиропотоков [5].

Отечественная транспортная наука классифицирует железнодорожные узлы по характеру эксплуатационной работы, географическому расположению, численности населения, характеру производительных сил, по схеме размещения основных устройств (геометрическому очертанию) и системе управления.

Общепринятый подход к исследованию железнодорожных узлов дает одностороннее представление о железнодорожном узле. Задача выбора числа и дислокации узлов как ЛО в терминологии и с применением логистических методов не решается. Особенности логистических технологий работы ТУ при традиционном подходе к ним как к пунктам стыка нескольких видов транспорта недостаточно учитываются. Так, большое внимание уделено путевому развитию и планировочному проектированию, т. е. акцент сделан на геометрии и инфраструктуре. Нет типологии по признаку оказываемого сервиса, позиций логистики и экономики, не освещены вопросы взаимодействия участников, в том числе, смежных видов транспорта. Основным элементом любого транспортного узла, любой логистической цепи является склад. От «удачности» классификации на низшем уровне глобальной логистики транспортных узлов зависит эффективность работы всей их сети. Так, в современной научной литературе имеется немало попыток представить классификацию складов как с позиций логистики (В. В. Дыбская [10], Л. Б. Миротин, А. М. Гаджинский, Т. А. Прокофьева [7] и др.), так и с позиций технико-технологического проектирования (О. Б. Маликов [6], А. А. Смехов и др.). Акцент на это сделан в трудах специалистов транспортной отрасли (В. И. Апатцева [5], А. С. Балалаева [8], Ю. И. Ефименко [5], С. Ю. Елисеева [9] и многих других). Так, классификация Маликова О. Б. [6] напрямую связана с технической и технологической составляющими работы складов. Акцент делается на проектировании и эксплуатации складских систем. К сожалению, не указываются географические и экономические признаки. Классификации либо детализированы, либо излишне укрупнены, либо дублируют практические классификации рынка складской логистики. Однако в этих классификациях значительно шире по сравнению с транспортными представлен и функциональный арсенал складов как узловых объектов транспортно-логистической системы доставки грузов.

К сожалению, решая вопросы проектирования, оценки, логистики, технического оснащения, транспортного обслуживания, дополнительного сервиса отдельно, невозможно получить комплексных решений, ориентированных на клиента. «Сбитый» «прицел» всех ука-

# Управление перевозочными процессами и безопасность движения поездов

занных классификаций не только превращает работу звеньев логистических цепей в местечковую, но и значительно снижает ее эффективность, не дает полноценной картины, иллюстрирующей всю многогранность «ипостасей» логистических объектов, богатство их функционального арсенала [3]. Если визуализировать проведенный анализ, то результаты обзора литературных источников можно представить рисунками 1 и 2.

Полагаем необходимым интегрировать достижения транспортной и логистической науки в новом междисциплинарном разделе научных исследований ТУ как ЛО. Для этого в статье представлен разработанный новый функционально-логистический подход к исследованию ТУ.

<p>1</p> <p><b>«Логистических системы» ЭКОНОМИЧЕСКИЙ ПОДХОД</b> (виртуальный аспект понимания узла)</p> <p>ЦЕЛЬ: описание экономической роли в логистической системе.</p> <p>АВТОРЫ: А. М. Гаджинский, В. И. Сергеев, Т. А. Прокофьева, Л. Б. Миротин и др.</p>	<p>3</p> <p><b>«Склады и терминалы» ТЕХНИЧЕСКИЙ, ПРОЕКТИРОВОЧНЫЙ</b> (технический аспект понимания узла)</p> <p>ЦЕЛЬ: проектирование, планировка и эксплуатация, расчет технической оснащенности и строительной части.</p> <p>АВТОРЫ: А. А. Сысхов, О. Б. Машков, В. М. Николашин, Н. П. Журавлев, И. И. Бюшнев, Г. Н. Дегляев и др.</p>
<p>2</p> <p><b>«Транспортный узел» ТРАНСПОРТНЫЙ ПОДХОД</b> (техничко-технологический аспект понимания узла)</p> <p>ЦЕЛЬ: описание проектно-технического решения с учетом путевого развития и технической оснащенности.</p> <p>АВТОРЫ: В. И. Апатчев, Н. В. Правдин, О. Н. Числов, Е. В. Архангельский, В. А. Персианов, В. М. Акулиничев, Ю. И. Ефименко, В. В. Повороженко и др.</p>	<p>4</p> <p><b>«Склады и терминалы» КОММЕРЧЕСКИЙ ПОДХОД</b> (оценочный аспект понимания узла)</p> <p>ЦЕЛЬ: коммерческие сделки и оценка при покупке-аренде-продаже с учетом инженерных сетей.</p> <p>АВТОРЫ: компании Knight Frank, Swiss Realty Group, Jones Lang LaSalle, Penny Lane, Colliers International, ABC-property, РМС.</p>

Рисунок 1 – Обзор существующих подходов к исследованию ТУ (на основе анализа работ [5 – 10])

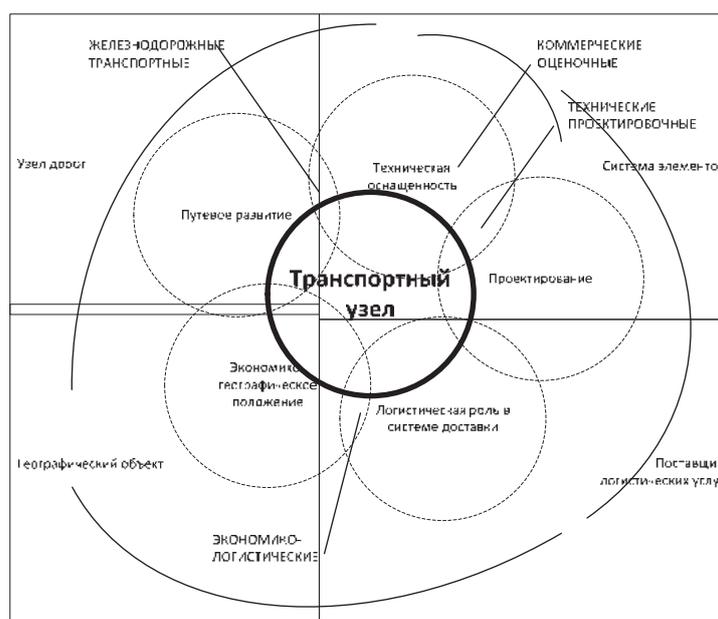


Рисунок 2 – Сравнение существующих классификаций транспортных узлов (на основе анализа работ [5 – 11]), области (ареалы) существующих концептуальных подходов к исследованию ТУ

## Функционально-логистический подход к развитию ТУ как ЛО.

Разнообразие условий, связанных с организацией перевозочного процесса, приводит к необходимости более детального рассмотрения сущности логистических центров и их места в системе мультимодальных перевозок. Классификация послужит инструментом для организации грузодвижения с учетом конструктивных особенностей, имеющейся инфраструктуры и ассортимента услуг.

В общем случае **логистический объект** – узловый элемент системы транспортно-складской инфраструктуры, выполняющий комплекс логистических функций в системе до-

# Управление перевозочными процессами и безопасность движения поездов

ставки груза от начального поставщика до конечного потребителя. Иными словами, ЛО могут выступать объекты инфраструктуры, физически обеспечивающие реализацию транспортно-складского обслуживания различных клиентов, сосредоточенные по совокупности признаков в пространственно определенном районе.

В частности, **железнодорожный ЛО** – объект терминально-складской инфраструктуры железнодорожного транспорта, располагаемый в транспортном узле и выполняющий функции узлового элемента терминально-логистической системы по техническому обеспечению и практическому выполнению услуг погрузки, выгрузки, хранения и распределения грузов, включая доведение грузов до конечного потребителя, при взаимодействии с участниками системы доставки и другими видами транспорта.

Эволюция ТУ представляет собой последовательное изменение состояний ЛО в сторону экстремума целевой функции его работы, сопровождающееся переходом ЛО на новый иерархический уровень.

Состояние ТУ – это совокупность показателей, идентифицирующих его в общей иерархической системе (определяющих его тип) и характеризующих его работу в целом.

Состояние любого ТУ выражается совокупностью показателей (ресурсов):  $X_{ЛО i} = (X_1, X_2, X_3, X_4, X_5)$ .

Факторы эволюции – это определяющие состояние ТУ параметры, изменяемые под внешним воздействием и выступающие как движущая сила эволюции ТУ.

$$X_{ЛО}^{эвол} = (Z_1, Z_2, Z_3, Z_4). \quad (1)$$

Направление эволюции любого ЛО связано с достижением максимальных значений параметров, что приводит к переходу ЛО на новый иерархический уровень, т.е. к трансформации его типа (по авторской классификации) от низшего к более высшему:

$$\sum Z_{max} \rightarrow X_{ЛО i max}. \quad (2)$$

Это показано на рисунке 3.



Рисунок 3 – Принцип эволюции ЛО

Изложенное выше позволяет сформировать многофакторную модель эволюции ЛО, состоящую из значащих признаков  $X_j$  и влияющих на них факторов  $Z_i$ :

$$F = X_1 Z_1 + X_2 Z_2 + \dots + X_n Z_n. \quad (3)$$

В частности, ТУ может находиться в различных состояниях  $X$  (ЛО), уточненных для каждого из его состояний (например, по авторской типологии это специализированные площадки, склады, терминально-складские комплексы и др.). Эти параметры назовем параметрами состояния ЛО. Среди всех возможных состояний ЛО имеет одно особое – режим «идеальный терминал», в котором параметры, характеризующие состояние всего ЛО, неизменно сохраняют позиции экстремума целевых функций, к которому ЛО будет стремиться в процессе своего функционирования [2 – 4]. Каждому состоянию соответствуют следующие параметры: определенный тип (по авторской классификации – 1...9); дислокация (координата-

# Управление перевозочными процессами и безопасность движения поездов

ты), км; площадь хранения, кв. м; грузоперерабатывающая способность (мощность), тыс.т/год; радиус обслуживания клиентов, км; ассортимент реализуемого транспортно-логистического сервиса, наимен.; стоимость грузопереработки, у.е./ед., и определенный размер инвестиций в строительство, у. е., соответственно:  $X(ЛО)_i = \sum\{i; D; S_{xp}, Q; R; S; S_{гр}; I\}$ .



Рисунок 4 – Иллюстрация интегрированного функционально-логистического подхода

# Управление перевозочными процессами и безопасность движения поездов

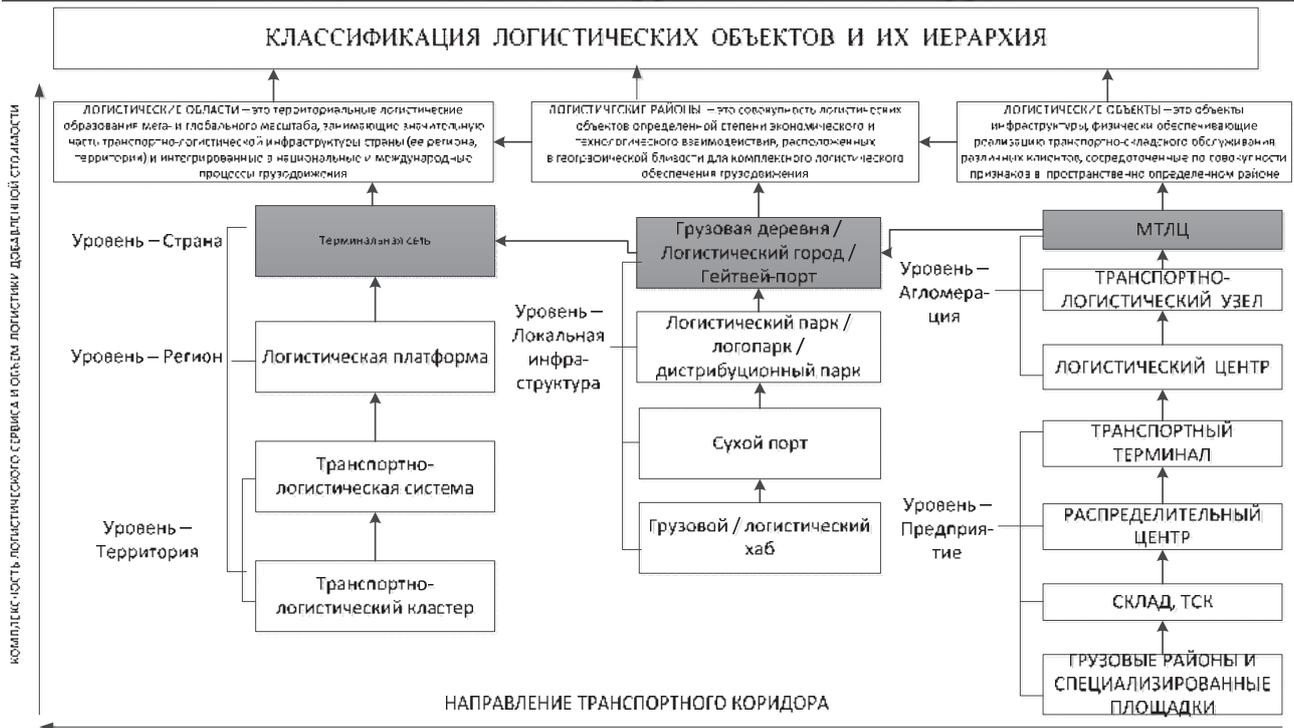


Рисунок 5 – Предлагаемая система иерархии и классификации ЛО

В общем случае типичный ТУ параметрически может быть описан так:

$$\text{ТУ} = \begin{cases} F_{\text{ТУ}}^{\Phi} = \sum_{i=1}^n C \{T_{\text{сфр}}; R_{\text{экс}}; S_{\text{гр}}\} \rightarrow \min; \\ F_{\text{ТУ}}^{\text{T}} = \sum_{i=1}^n C \{P; P'; Q_{\text{пол}}; A\} \rightarrow \max; \\ F_{\text{ТУ}}^{\text{K}} = \sum_{i=1}^n C \{K_{\text{лог}}; Q_{\text{лог}}; LOG\} \rightarrow \max, \end{cases} \quad (4)$$

где  $F_{\text{ЛО}}^{\Phi}$  – 1-й финансовый вид отражает экономическую эффективность стоимости складской грузопереработки, где  $R_{\text{экс}}$  – эксплуатационные расходы по текущему содержанию, тыс. руб./год;  $S_{\text{гр}}$  – стоимость складской переработки 1 тонны груза, руб./т;  $T_{\text{сфр}}$  – срок окупаемости инвестиций в строительство по сметно-финансовому расчету, лет;  $F_{\text{ЛО}}^{\text{T}}$  – 2-й вид – технический – отражает оптимальность технических решений, где  $P$  – производительность складского погрузочно-разгрузочного оборудования, т/сут;  $Q_{\text{пол}}$  – полезная емкость склада, тонн (полезная вместимость склада в натуральном измерении – тонн, единиц груза);  $A$  – уровень автоматизации логистических операций (коэффициент автоматизации – отношение полностью автоматизированных процессов на складе к общему количеству операций);  $F_{\text{ЛО}}^{\text{K}}$  – 3-й вид – качественный (логистический) – отражает качество оказываемых логистических услуг, где  $K_{\text{лог}}$  – комплексность логистических услуг, предоставляемых  $i$ -м складом (коэффициент комплексности логистики – отношение количества «пакетных» комплексных услуг логистики к общему объему складского сервиса);  $Q_{\text{лог}}$  – коэффициент покрытия логистикой добавленной стоимости стандартных складских операций;  $LOG$  – логистическая полезность ЛО [2]. Значачие признаки и влияющие на них факторы представлены в таблице 1. В упрощенном виде логика эволюционно-функционального подхода отражена в таблице 2. Иллюстрация функционально-логистического подхода, интегрирующего кластерный и синергетический подходы, приведена на рисунке 4 [3, 4].

## Классификация и терминология ЛО.

На рисунке 5 представлена авторская классификация ЛО. *Логистический район* – совокупность ЛО определенной степени экономического и технологического взаимодействия, расположенных в географической близости для комплексного логистического обеспечения процессов перевозок.

# Управление перевозочными процессами и безопасность движения поездов

Логистическая область – территориальные логистические образования глобального масштаба, занимающие значительную часть транспортно-логистической инфраструктуры страны и интегрированные в национальные и международные процессы перевозок. Затемненные блоки, соединенные стрелкой (рисунок 5), представляют собой последовательность трансформации (эволюции) логистического объекта до логистической области и выхода на глобальный уровень по схеме «Логистический объект (МТЛЦ)» =>> «Логистический район (Гейтвей)» =>> «Логистическая область (терминальная сеть)». Этому соответствует направление развития транспортного коридора (см. стрелка внизу).

Таблица 1 – Признаки и факторы модели эволюции ТУ

Значение признаки (параметры ТУ)	Влияющие факторы эволюции ТУ
Радиус обслуживания ТУ с учетом его дислокации	Дислокация клиентуры, удаленность клиентуры от ТУ
Полезная площадь хранения с учетом количества ЛО на территории	Дислокация клиентуры, мест грузообразования и грузопоглощения
Размер инвестиций с учетом типа ТУ	Характер и номенклатура грузопотоков, географическое расположение, транспортная доступность
Мощность ТУ (грузоперерабатывающая способность), стоимость грузопереработки	Объемы промышленного производства и торговые потоки региона, существующие логистические цепи, номенклатура грузов и клиентуры
Ассортимент логистического сервиса, реализуемого ТУ	Типология и требования клиентуры, характер и номенклатура грузопотоков, географическое расположение

Таблица 2 – Функционально-логистический подход

Этап эволюции ЛО	Эра массового производства	Эра качества	Эра потребителя
Период	1950 – 1980 гг.	1980 – 1999 гг.	2000 – наши дни
Характеристика этапа (принципы работы)	Доступность, снижение затрат за счет масштаба	Соответствие стандартам, гарантия качества, надежность	Глобализация, разнообразие сервиса, предоставление сквозных комплексных услуг
Формат работы	Локальный (точечный)	Модульный	Интегрированный
Функциональный тип ТУ	Универсальный	Специализированный (расширение ассортимента услуг для конкретного груза)	Гибкий (мультимодальный и многофункциональный)

Эволюция логистического сервиса определяет тип ЛО и поэтому положена в основу типологии ЛО. Развитие ЛО рассматривается на основе эволюции логистических функций, выполняемых ЛО. Развитие типового ЛО происходит при следующей трансформации внутренних процессов: 1) *разобщенное существование* отдельных элементов (объектов); 2) *концентрация* (укрупнение, концентрация и интеграция элементов (объектов) в узел (узловой инфраструктурный элемент); 3) *наращивание инфраструктуры* (подключение вспомогательных элементов); 4) *регионализация* с последующим выходом на новый уровень («подключением» к локальным и глобальным транспортно-логистическим системам) [2, 4]. Предлагаемый в данной работе функционально-логистический подход к развитию ЛО отражает этапное развитие ТУ по градации уровня услуг: *стандартная услуга* =>> *расширенная услуга* =>> *уникальная услуга* со смещением ключевой ориентации сервиса: *внутренняя среда* =>> *внешняя среда* =>> *клиент*. Это показано в таблице 3.

# Управление перевозочными процессами и безопасность движения поездов

Таблица 3 – Этапность развития ТУ

Этап	Описание этапа, виды ТУ	Тип услуги	Ориентация
Первый	<p>Формирование инфраструктуры ТУ</p> <p>Складские площадки, склады, ТСК</p> <p>Наращивание инфраструктуры и пропускных мощностей</p> <p>Первоочередное путевое развитие</p>	Стандартная услуга	<p>Ориентир – внутренняя среда</p> <p>Ориентация на обслуживание промышленных предприятий узла и на обеспечение завоза-вывоза груза в региональном и межрегиональном сообщении в целях региона и отдельных крупных предприятий</p>
Второй	<p>Модернизация ТУ</p> <p>РЦ, транспортный терминал, ЛЦ</p> <p>Комплексная механизация и автоматизация</p> <p>Техническое оснащение для обеспечения мультимодальных перевозок</p> <p>Собственная складская инфраструктура</p> <p>Первоочередное развитие складских мощностей</p>	Расширенная услуга	<p>Ориентир – внешняя среда</p> <p>Ориентация на комплексное обслуживание клиентуры. Расширение пакета предоставляемого ассортимента услуг. Построение цепей доставки. Расширение клиентской базы. Привлечение в структуру новых участников. Повышение инвестиционной привлекательности объектов и региона в целом</p>
Третий	<p>Клиентоориентированность ТУ, транспортно-логический узел, МТЛЦ</p> <p>Качественный сервис в интегрированных цепях доставки</p> <p>Первоочередное развитие мультимодальных мощностей</p>	От одного лица, в одном месте реализуется комплексная уникальная услуга	<p>Ориентир – клиент</p> <p>Усложнение структуры и планировки узла, ориентация на визуально-информационную поддержку сервиса, обеспечение онлайн-контроля</p>

### Эволюционная сеть состояний ЛО.

В соответствии с авторской теорией эволюционно-функционального подхода рассмотрим эволюцию ТУ в виде универсальной схемы на рисунках 6 и 7. На рисунке 6 представлена схема изменения состояния ЛО любого типа до достижения в его эволюции состояния «идеального терминала»: эволюционная сеть состояний. Имеется определенное исходное состояние какого-либо ЛО  $i$ -го типа. Структура сети состояний состоит из дуг (логические эволюционные связи-переходы между состояниями ЛО, определяющими его тип, под влиянием таких факторов, как ассортимент логистического сервиса, его направленности и др., в соответствии с теорией эволюционно-функционального подхода) и вершин (состояние ЛО, определяемое группой параметров – параметрической характеристикой). Совокупность всех взаимосвязанных вершин – это множество состояний ЛО. Каждый путь – последовательность прохождения взаимосвязанных дуг и вершин – один из альтернативных путей эволюции ЛО от одного типа к другому, более развитому.

*Эволюционная сеть состояний ЛО* – это иллюстрация вариантных путей развития ЛО. При этом ЛО может проследовать некоторые эволюционные стадии очень быстро, а на других пребывать долгое время, что связано, как указано в эволюционно-функциональной те-

## Управление перевозочными процессами и безопасность движения поездов

рии ЛО, с особенностями реализации логистического сервиса. Задача – отыскание кратчайшего пути перехода (достижения) ЛО к наилучшему состоянию – «идеальному терминалу» – или близкого к нему (приближения). Каждая вершина обладает одинаковым множеством параметров, различных по своим значениям. Итерации продолжаются до того момента, пока все параметры характеристики ЛО не обеспечат реализацию минимума целевой функции. Количество проследованных ЛО в своем развитии дуг равно числу стадий эволюции ЛО. Вершина сети состояний –  $i$ -й тип ЛО (из девяти по авторской классификации), соответствующий стадии эволюции, на которой находится ЛО. Каждая дуга – направление эволюций  $Ev$  – обладает значением времени и качества. Время, лет, показывает продолжительность каждой эволюционной стадии.

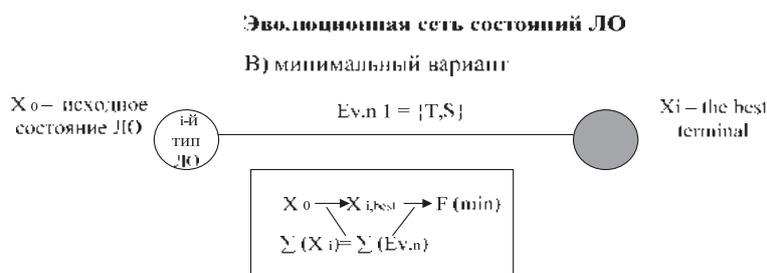


Рисунок 6 – Эволюционная сеть состояний ЛО в виде графа состояний

Качество в виде коэффициента логистического сервиса ЛО показывает, на каком качественном уровне находится ЛО, обладающий соответствующей совокупностью технических и иных количественных параметров, отраженных в его характеристике (вершине). Переход на новую стадию развития сопровождается существенным изменением функционального сервиса ЛО, что является движущим фактором его трансформации в следующий по иерархии тип ЛО. Минимальное количество вершин сети – две (исходное и идеальное состояние ЛО) при общем количестве типов ЛО (вершин), равном девяти (по авторской классификации). При этом переход на новый уровень эволюции возможен, минуя некоторые промежуточные стадии развития, возможно только для ЛО, находящихся на более высоком уровне развития, чем 1 и 2. Это видно на рисунке 6, на котором в соответствии с авторской классификацией ЛО графически представлена эволюционная сеть состояний ЛО. Так, для ЛО уровней 3 и 4 возможен непосредственный переход на уровень 5 – МТЛЦ (по авторской классификации). Предложена также иллюстрация эволюционно-функциональной теории на рисунке 8. **Система-интегратор G** (наивысший уровень) – объекты высшего порядка (сложнейшие многоэлементные), включающие в свой состав большое количество различных более мелких объектов. **Система-базис g** (нулевой уровень) – объекты низшего порядка (простейшие моноэлементные), обязательно входящие в состав всех прочих объектов на последующих уровнях. **Система-базис g – это простейшая складская площадка (СП)**, представляющая собой грузовой фронт, состоящий из погрузочно-разгрузочной машины, штабеля груза и подхода транспорта. Очевидно, что она присутствует во всех последующих эволюционных формах ЛО, входя в их состав. *Низший уровень* (обозначен номером 1) – это группа элементов  $X$  – «Склад», в которую входят такие логистические объекты, как склады и ТСК – терминально-складские комплексы. Данный уровень назван «склад», поскольку именно на этой функциональной стадии объект окончательно формируется в типичный склад и начинает выполнять непосредственно складские функции, а именно сортировку, подготовку, подгруппировку грузов, их приемку и выдачу, осуществлять учет, размещать на хранение, выгружать и загружать транспортные средства. *Средний уровень* (обозначен номером 2) – это группа элементов  $Y$  – «Центр». В нее входят такие логистические объекты, как РЦ, ТТ, ЛЦ (распределительный центр, транспортный терминал и логистический центр). Продолжительность эволюции на этом уровне определяет форма ромба. *Высший уровень* – группа элементов  $Z$  –

# Управление перевозочными процессами и безопасность движения поездов

«Узел», в которую входят транспортный узел (ТУ) и транспортно-логистический узел (ТЛУ). Система-интегратор **G** (наивысший уровень) – это мультимодальный транспортно-логистический центр, представляющий собой мегаобъект, включающий в свой состав все низшие элементы.

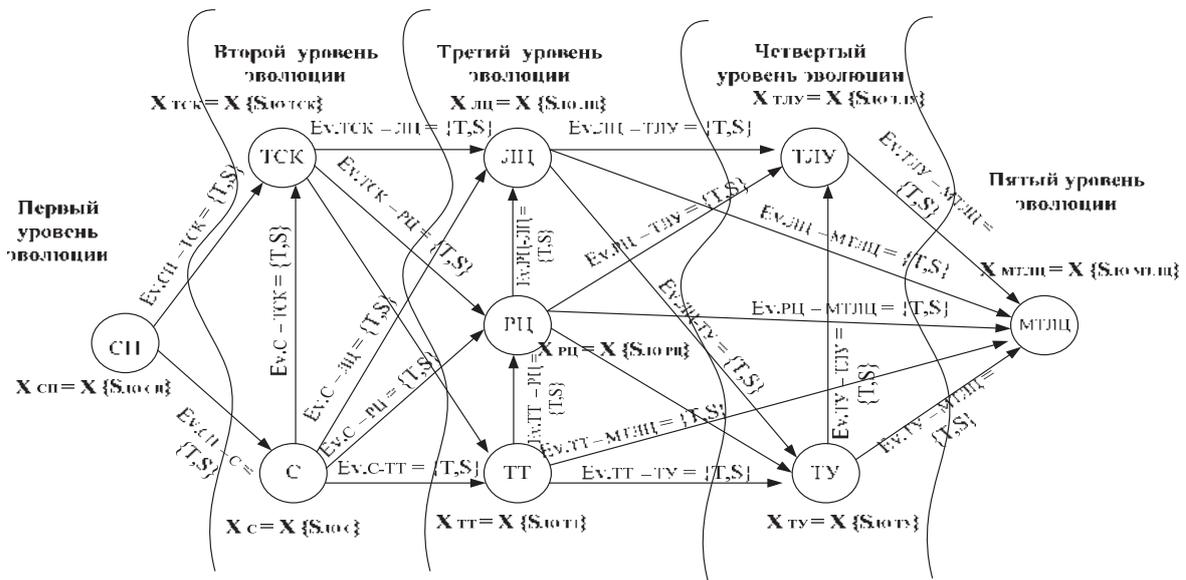


Рисунок 7 – Эволюционная схема ЛО в авторской классификации типов ЛО

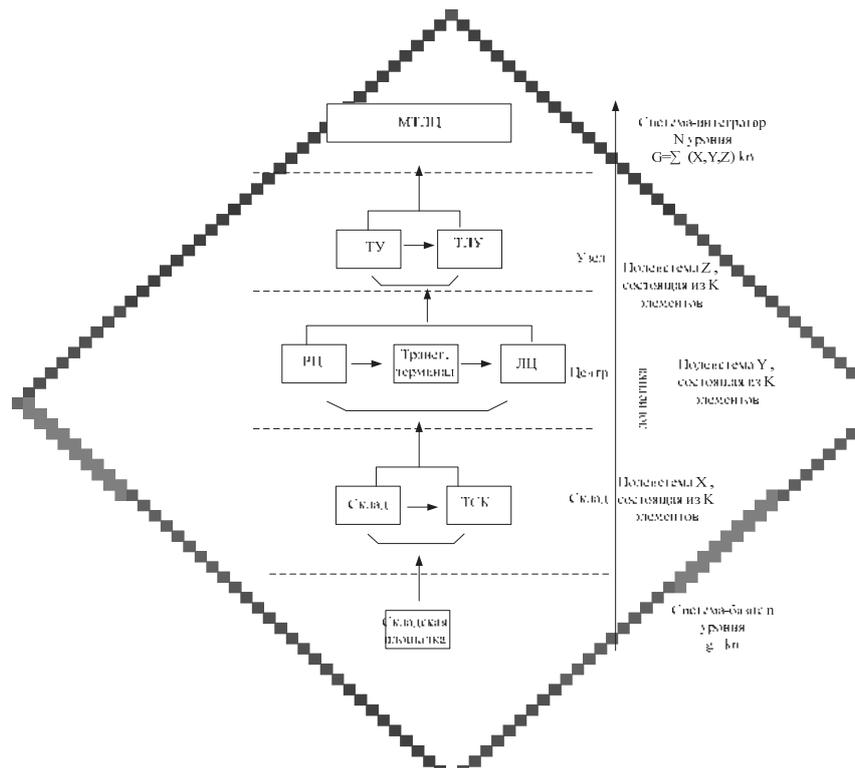
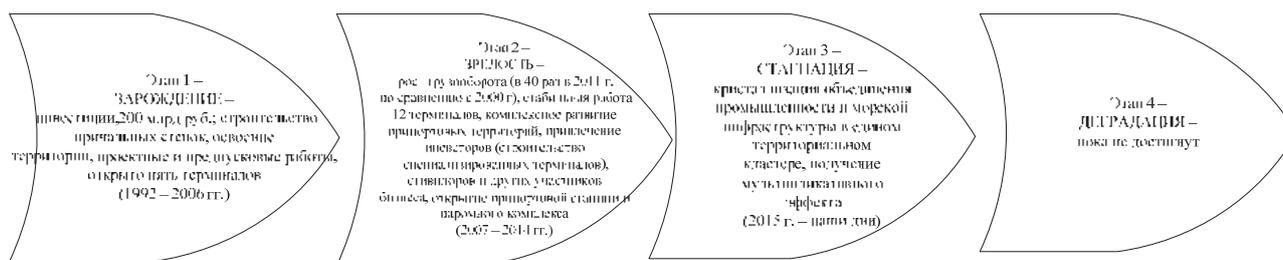


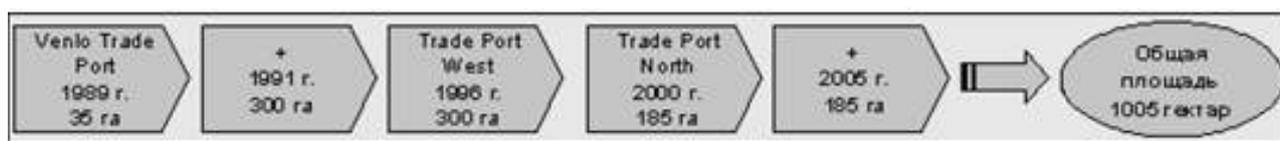
Рисунок 8 – Ромб эволюционно-функционального развития (П.О.Д.)

Иллюстрацией, подтверждающей применимость разработанного подхода к исследованию ТУ, могут стать примеры отечественного и зарубежного опыта формирования и развития ТУ. На рисунке 9 показана эволюция таких известных ТУ, как Усть-Луга (Россия) и Venlo Trade Port (Нидерланды), которые за период своего функционирования перешли на качественно новый уровень.

# Управление перевозочными процессами и безопасность движения поездов



а



1 – разобщенное существование отдельных элементов ЛЮ

2 – концентрация и укрупнение элементов в узловой ЛЮ

3 – наращивание инфраструктуры ЛЮ

4 – регионализация ЛЮ с последующим выходом на новый уровень – ЛР (логистический район) или ЛО (логистическая область)

б

Рисунок 9 – Пример развития ТУ в Усть-Луге (а) и в Венло (б)

Предложенные в статье функционально-логистический подход, терминология и классификация ЛО, а также методика исследования ТУ как ЛО могут быть применимы при определении условий наилучшего режима функционирования ЛО для планирования объектов терминально-складской инфраструктуры, при эксплуатации и развитии терминально-складской инфраструктуры, как оценочный инструмент по выявлению «узких мест» и по совершенствованию всех аспектов работы ТУ при проектировании, планировании развития и оценке.

## Список литературы

1. Стратегия развития железнодорожного транспорта РФ на период до 2030 года [Текст]. – М.: Красный пролетарий, 2008. – 58 с.
2. Покровская, О. Д. Терминалистика: общие вопросы: Монография [Текст] / О. Д. Покровская. – Казань: Бук, 2016. – 142 с.
3. Покровская, О. Д. Классификация объектов железнодорожной терминально-складской инфраструктуры [Текст] / О. Д. Покровская // Вестник УрГУПС / Уральский гос. ун-т путей сообщения. – Екатеринбург. – 2017. – № 1 (33). – С. 70 – 83.
4. Покровская, О. Д. Логистическое руководство: математические основы терминалистики, маркировка, классификация и идентификация логистических объектов железнодорожного транспорта: Монография [Текст] / О. Д. Покровская. – Казань: Бук, 2017. – 281 с.
5. Железнодорожные станции и узлы [Текст] / Ю. И. Ефименко, В. И. Апатцев и др. / УМЦ ЖДТ. – М., 2014. – 113 с.
6. Маликов, О. Б. Перевозки и складирование товаров в цепях поставок: Монография [Текст] / О. Б. Маликов / УМЦ ЖДТ. – М., 2014. – 537 с.
7. Прокофьева, Т. А. Логистические центры в транспортной системе России: Учебное пособие [Текст] / Т. А. Прокофьева, В. И. Сергеев. – М.: Экономическая газета, 2012. – 522 с.
8. Балалаев, А. С. Транспортно-грузовые системы железных дорог: Учебное пособие [Текст] / А. С. Балалаев, И. А. Чернышова, А. Ю. Костенко / Дальневосточный гос. ун-т путей сообщения. – Хабаровск, 2006. – 108 с.
9. Елисеев, С. Ю. Система логистического управления взаимодействием с морскими и речными портами и другими видами транспорта: Монография [Текст] / С. Ю. Елисеев / ВИНТИ РАН. – М., 2005. – 96 с.

10. Дыбская, В. В. Управление складированием в цепях поставок [Текст] / В. В. Дыбская. – М.: Альфа-Пресс, 2009. – 720 с.

## References

1. Strategiiia razvitiia zheleznodorozhnogo transporta RF na period do 2030 goda. M., Krasnyi proletarii, 2008. – 58 s.
2. Pokrovskaiia O.D. Terminalistika: obshchie voprosy: monografiia/ O. D. Pokrovskaiia. – Kazan', Izd-vo «Buk», 2016. – 142 s. ISBN 978-5-906873-28-6
3. Pokrovskaiia O.D. Klassifikatsiia ob"ektov zheleznodorozhnoi terminal'no-skladskoi infrastruktury. / O.D. Pokrovskaiia// Vestnik UrGUPS. 2017. № 1 (33). S.70-83.
4. Pokrovskaiia O.D. Logisticheskoe rukovodstvo: matematicheskie osnovy terminalistiki, markirovka, klassifikatsiia i identifikatsiia logisticheskikh ob"ektov zheleznodorozhnogo transporta: monografiia. / O. D. Pokrovskaiia. – Kazan', Izd-vo «Buk», 2017. – 281 s. ISBN: 978-5-906873-52-1
5. Zheleznodorozhnye stantsii i uzly / Iu.I. Efimenko, V.I. Apattsev i dr. // Pod red. Apattseva V.I., Efimenko Iu.I./ M., FBGOU UMTs na zh.-d. transporte, 2014.
6. Malikov O.B. Perevozki i skladirovanie tovarov v tsepiakh postavok: monografiia / O.B.Malikov // M., FBGOU UMTs na zh.-d. transporte, 2014.
7. Prokof'eva T.A., Sergeev V.I. Logisticheskie tsentry v transportnoi sisteme Rossii: Uchebnoe posobie. – M.: Izdatel'skii dom «Ekonomicheskaiia gazeta», 2012. – 522s.
8. Balalaev, A. S. Transportno-gruzovye sistemy zheleznykh dorog : ucheb. posobie / A. S. Balalaev, I. A. Chernyshova, A. Iu. Kostenko. – Khabarovsk, DVGUPS, 2006. – 108 s.
9. Eliseev S. Iu. Sistema logisticheskogo upravleniia vzaimodeistviem s morskimi i rechnymi portami i drugimi vidami transporta: monografiia. - M.: VINITI RAN, 2005. - 96 s.
10. Dybskaia V.V. Upravlenie skladirovaniem v tsepiakh postavok. – M., Al'fa-Press, 2009.– 720 s.

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

### Покровская Оксана Дмитриевна

Сибирский государственный университет путей сообщения (СГУПС).

ул. Дуси Ковальчук, д. 191, г. Новосибирск, 630049, Российская Федерация.

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Логистика, коммерческая работа и подвижной состав», СГУПС.

E-mail: insight1986@inbox.ru

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Покровская, О. Д. Исследование эволюции транспортных узлов как логистических объектов [Текст] / О. Д. Покровская // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2017. – № 2 (30). – С. 146 – 158.

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

### Pokrovskaya Oksana Dmitrievna

Siberian State University of Railway Transport (STU).

191, Dusi Kovalchuk st., Novosibirsk, 630049, Russia.

Candidate of Technical Sciences, associate professor of the department «Logistics, commercial work and rolling stock», STU.

E-mail: insight1986@inbox.ru

## BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Pokrovskaya O. D. The study of the evolution of transport hubs as logistics facilities. Journal of Transsib Railway Studies, 2017, vol. 30, no. 2, pp. 146 – 158 (In Russian).

## Уважаемые коллеги!

Редакция научно-технического журнала «Известия Транссиба» приглашает Вас публиковать результаты научных исследований по тематическим направлениям журнала:

- подвижной состав железных дорог;
- транспортная энергетика;
- информационные технологии, автоматика, связь, телекоммуникации;
- путь и искусственные сооружения;
- управление перевозочными процессами и безопасность движения поездов;
- организация производства на транспорте.

Материалы просим высылать ответственному секретарю редакционной коллегии журнала Захаренко Елене Игоревне по электронной почте: [izvestia\\_transsiba@mail.ru](mailto:izvestia_transsiba@mail.ru).

### Правила представления рукописей научных статей в научно-технический журнал «Известия Транссиба»

#### В редакцию журнала представляется:

рукопись статьи на белой бумаге формата А4 в двух экземплярах, а также в электронном виде (на любом носителе или по e-mail), имя файла определяется по фамилии первого автора: фамилия.doc;

экспертное заключение о возможности опубликования статьи в открытой печати.

Рукопись статьи включает в себя УДК, ФИО авторов, аффилиацию (место работы или учебы) авторов, название статьи, аннотацию, ключевые слова (5 – 10 слов) на русском и английском языках, текст статьи, список литературы (более 10 наименований), транслитерацию списка литературы в романском алфавите, сведения об авторах и библиографическое описание статьи на русском и английском языках.

Рукопись статьи оформляется в соответствии с образцом.

Сведения об авторах включают в себя фамилию, имя, отчество, ученую степень и звание, место работы с указанием почтового адреса, должность, контактные телефоны, e-mail для обратной связи.

Один экземпляр текста статьи должен быть подписан всеми авторами на оборотной стороне каждой страницы.

#### Требования к аннотации статьи:

аннотация должна быть кратким точным изложением содержания статьи, включающим в себя основные фактические сведения и выводы описываемой работы;

текст аннотации должен быть лаконичным и четким, свободным от второстепенной информации, должен отличаться убедительностью формулировок;

сведения, содержащиеся в заглавии статьи, не должны повторяться в тексте аннотации;

объем аннотации на русском и английском языках должен содержать от 200 до 250 слов;

аннотация на русском и английском языках должна включать в себя следующие аспекты содержания статьи: предмет, цель работы; метод или методологию проведения работы; результаты работы; область применения результатов; выводы;

дополнительно англоязычная аннотация должна быть оригинальной (не быть калькой русскоязычной аннотации); содержательной (отражать основное содержание статьи и результаты исследований); структурированной (следовать логике описания результатов в статье); англоязычной (написанной качественным английским языком); необходимо использовать активный, а не пассивный залог.

#### Требования к рукописи статьи:

рукопись статьи должна содержать УДК (в левом верхнем углу, обычный, 12 пт), инициалы и фамилию на русском языке (по центру, 12 пт), аффилиацию авторов на русском языке (по центру, 10 пт), название статьи на русском языке (по центру, прописными буквами, полужирный, 12 пт), аннотацию на русском языке (курсив, по ширине, 10 пт), ключевые слова на русском языке (курсив, по ширине, 10 пт), инициалы и фамилию на английском языке (по центру, 12 пт), аффилиацию авторов на английском языке (по центру, 10 пт), название статьи на английском языке (по центру, прописными буквами, полужирный, 12 пт), аннотацию на английском языке (курсив, по ширине, 10 пт), ключевые слова на английском языке (курсив, по ширине, 10 пт);

текст статьи должен быть набран в редакторе Word, размер страницы: формат А4 (210 × 297 мм);

размер полей: 20 мм (все четыре поля), размер и тип шрифта основного текста: Times New Roman, 12 пт;

размеры символов в формулах (Equation): обычный – 12 пт, крупный индекс – 7, мелкий – 5, крупный символ – 15, мелкий – 12 пт;

буквы латинского алфавита набираются курсивом, буквы греческого и русского алфавитов, математические символы такие, например, как cos, sin, max, min, – прямым шрифтом;

текст в таблицах, подрисовочные подписи и названия таблиц набираются шрифтом Times New Roman, 10 пт;

межстрочный интервал одинарный, абзацный отступ – 0,75 см;

каждый рисунок дополнительно должен быть представлен в оригинальном файле (формат JPEG или TIFF, разрешение – не ниже 300 пикс/дюйм);

рисунки, выполненные в редакторе Word, должны быть вставлены как объект;

после текста статьи следует список литературы на русском языке и в романском алфавите (латинице) с переводом названий литературных источников на английский язык;

ссылки на литературу в тексте статьи указываются в квадратных скобках, список литературы имеет заголовок *Список литературы* (не более 10 наименований), библиографическое описание источников на русском языке оформляется по требованиям ГОСТ 7.1-2003;

в романском алфавите (латинице) список литературы имеет заголовок *References* и оформляется по следующему образцу: Author1 A.A., Author2 A.A., Author3 A.A., Author4 A.A., Author5 A.A. Title of article [Nazvanie stat'i v romanskom alfavite]. Nazvanie zhurnala v romanskom alfavite – Title of Journal, 2014, no. 1, pp. 54 – 57.

Рукописи статей, опубликованных ранее или переданных в другие издания, не принимаются.

Число соавторов не должно превышать трех человек. Рекомендуемый объем статьи – не менее пяти и не более 10 страниц. В ином случае вопрос по объему статьи необходимо согласовать с редакцией журнала. Иллюстрации, схемы, таблицы, включаемые в текст статьи, учитываются в общем объеме текста.

Авторы должны избегать повторения одних и тех же данных в таблицах, на графиках и в тексте статьи.

В случае представления двух или более статей одновременно необходимо указывать желательную очередность их публикации.

В случае возвращения статьи автору для устранения замечаний или для ее сокращения датой представления статьи считается день получения редакцией журнала окончательного текста.

Принятые к публикации рукописи статей не возвращаются авторам.

Материалы, оформленные не в соответствии с указанными выше требованиями, не принимаются к публикации и не возвращаются.

Редакционный совет оставляет за собой право литературного редактирования статьи без согласования с авторами.

*Научное издание*

Научно-технический журнал «Известия Транссиба»

№ 2 (30) 2017

Научно-технический журнал «Известия Транссиба» зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор) 3 июня 2009 г., свидетельство о регистрации СМИ ПИ № ФС77-66605 от 21 июля 2016 г.

Номер ISSN – 2220-4245.

Подписной индекс в общероссийском каталоге НТИ агентства «Роспечать» – 66087.

Издание обрабатывается в системе Российского индекса научного цитирования (РИНЦа).

Журнал включен в Перечень российских рецензируемых научных журналов, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук.

Издание выходит с периодичностью 4 номера в год.

Цена свободная.

Редактор – Майорова Н. А.

Компьютерная верстка – Захаренко Е. И.

Адрес редакции (издательства) и типографии: 644046, г. Омск, пр. Маркса, 35;  
тел.: (3812) 31-05-54; e-mail: [izvestia\\_transsiba@mail.ru](mailto:izvestia_transsiba@mail.ru)

Подписано в печать 28.08.2017.

Тираж 500 экз.

Дата выпуска: 29.08.2017.

