

№ 2(26) 2016

Периодичность - 4 выпуска в год

#### РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ ЖУРНАЛА

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

#### **EDITORIAL BOARD**

- 1. Ovcharenko Sergey Mikhailovich chief editor, the rector of OSTU, D. Sa., associate professor (Omsk, Russia).
- **2.** Galiev 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 Yury Vasilyevich professor of the department «Electrical equipment and automation» of SSUWT, D. Sc., professor (Novosibirsk,
- **8.** Kamaev Valery Anatolyevich head of the department «Systems of automated designing» of VSTU, D. Sc., professor, the honored worker of science of the Russian Federation (Volgograd, Russia).
- science of the Russian Federation (Volgograd, Russia).

  9. Kargapolteev Sergey Konstantinovich vice-rector for research of ISTU, D. Sc., professor (Irkutsk, Russia).
- 10. Kosarev Alexander Borisovich deputy of general director of JSC «VNIIZhT» (Railway Research Institute), D. Sc., professor (Moscow, Russia).
- 11. Liu Jiankun Ph. D., professor of Beijing Jiaotong University, School of Civil Engineering (Beijing, China).
- 12. Sidorov Oleg Alexeevich head of the department «Power supply of rail transport» of OSTU, D. Sc., professor (Omsk, Russia).
- 13. Solonenko Vladimir Gelyevich professor of the department «Wagons» of KazATC, D. Sc., professor (Almary, Kazakhstan)
- 14. Fayzibaev Sherzod Sabirovich vice-rector for research of TashIRE, D. Se., professor (Tashkent, Uzbekistan).
- **15. Kharlamov Viktor Vasilyevich** head of the department «Electrical machines and common electrotechnic» of OSTU, D. Sc., professor (Omsk, Russia).

#### СОДЕРЖАНИЕ

#### Подвижной состав железных дорог

Аблялимов О. С. Исследование эксплуатации тепловозов 3ТЭ10М на холмисто-
горном участке АО «Ўзбекистон Темир Йўллари»
ЭНХ-АМГАЛАН Алтангэрэл. Обоснование выбора серии электровоза для Улан-
Баторской железной дороги
Базилевич С. В., Глотов В. А., Зайцев А. В. Обоснование применения планировщика
откосов балластной призмы в технологическом процессе модернизации
железнодорожного пути
Елисеев С. В., Хоменко А. П. Формы совместных движений элементов трехмассовой
колебательной системы: влияние динамических жесткостей
Крыгин А. Н., Плаксин А. В. Математическая модель оптимального регулирования
мощности электровозов постоянного тока в тяговом режиме и способ ее решения
Нехаев В. А. Влияние продольной неравноупругости железнодорожного пути на ди-
намическое поведение подвижного состава. Ч. 3. Определение областей
комбинационных параметрических резонансов
Шастин В. И., Каргапольцев С. К. Лазерное термоупрочнение пары трения
ДВС «кольцо – гильза цилиндра»

#### Транспортная энергетика

Закарюкин В. П., Крюков А. В., Авдиенко И. М. Моделирование систем тягового электроснабжения 2x25 кВ с коаксиальными кабелями и трансформаторами	
Вудбриджа	. 70
Кандаев В. А., Авдеева К. В., Уткина А. В., Медведева А. А. Распределение токов	
и потенциалов в системе подземных сооружений в поле блуждающих токов	. 78
Кулинич Ю. М., Шухарев С. А. Использование экстремального регулятора как	
средства повышения коэффициента мощности тиристорного преобразователя	. 91
Москалев Ю. В., Ахмедзянов Г. Г. Определение места размещения и мощности ком-	
пенсирующего устройства в системе тягового электроснабжения переменного тока	
двухпутного участка по минимуму потерь активной мощности	100
Сидоров О. А., Саля И. Л. Выбор метода численного моделирования токопри-	
емника электроподвижного состава	107
Сидорова Е. А., Подгорная С. О. Влияние коэффициента участковой скорости	
на удельный расход энергии в грузовом движении	112

#### Путь и искусственные сооружения

Карпущенко	H.	И.,	Труханов	Π.	C.	Оценка	И	прогнозирование	надежности	
DETLCOR R DAS	пиш	ILIV 3	кеппуатаци	иони	ILIV V	<b>УСПОВИЯХ</b>				118

#### Организация производства на транспорте

Дементьева Ю. В. Корреляционный анализ влияния фактора «вид происшествия» на	
статистические показатели производственного травматизма (на примере хоз-	
яйства пути Куйбышевской железной дороги)	127
Черемисин В. Т., Комяков А. А., Иванченко В. И. О комплексном подходе к анализу	
и контролю энергетической эффективности структурных подразделений желез-	
HOTODOWHOTO TRANSPORTS	134

Научно-пехнический ххурная «Иввесния Пранесиба»

644046, г. Омек, пр. Маркеа, 35

- Учрединены федеральное государстванное бюдиходное образованеныю учреждение высшего образования
- «Омений государственный универсилет пулей сообщения» (ОмГУПС (ОмИИТ)

Захаренко Елена Игоревна – ответственный секретарь (Омск).

УДК 629.42:629.4.054

#### О. С. Аблялимов

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

#### ИССЛЕДОВАНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ ТЕПЛОВОЗОВ 3ТЭ10М НА ХОЛМИСТО-ГОРНОМ УЧАСТКЕ АО «ЎЗБЕКИСТОН ТЕМИР ЙЎЛЛАРИ»

Аннотация. Представлены результаты исследований по анализу и оценке эффективности использования тепловозов 3ТЭ10М на холмисто-горном участке Мароканд — Навои узбекских железных дорог при движении грузовых поездов с остановками и без остановок на промежуточных станциях (раздельных пунктах). Приведены параметры основных показателей перевозочной работы исследуемых тепловозов 3ТЭ10М в виде табличных данных и графических зависимостей, а также обозначены уравнения регрессии для организации вычисления значений упомянутых показателей в принятом диапазоне изменения массы состава грузовых поездов.

**Ключевые слова:** исследование, результат, грузовой поезд, движение, тепловоз, железнодорожный путь, участок, эксплуатация, условие, направление, этап, скорость, расчет, подвижной состав, анализ, холмистогорный, оценка, станция, представить, пункт, средний, зависимость, обоснование, качество, перегон, профиль.

#### Oleg S. Ablyalimov

Toshkent Temir Yoʻl Muhandislari Instituti (ToshTYMI), Toshkent, Uzbekistan

# RESEARCHING AN EXPLOITATION OF 3TE10M DIESEL LOCOMOTIVE ON A HILLY-MOUNTAINOUS DIRECTION OF «UZBEKISTAN RAILWAYS» JSC

Abstract. The article includes research results of analyzing and evaluating 3TE10M diesel locomotive`s efficiency on a hilly-mountainous direction Marokand-Navoi of Uzbekistan railways while hauling freight trains with and without stopping on through stations (division points). Main parameters of basic movement work of researched UzTE16M3 diesel locomotives are shown as tabled values and graphic dependencies, also equations of organizing necessary calculations mentioned above in accepted range of mass variation are marked here.

**Keywords:** research, result, freight train, movement, diesel locomotive, railway track, direction, exploitation, condition, district, stage, speed, calculation, rolling-stock, analysis, hilly-mountainous, evaluation, station, present, point, average, dependence, base, quality, substantiation, profile.

В последнее время специалисты кафедры «Локомотивы и локомотивное хозяйство» Ташкентского института инженеров железнодорожного транспорта (ТашИИТа), опираясь на договоры о взаимном сотрудничестве между Управлениями по эксплуатации локомотивов и «Темирйўленилғитаъмин» АО «Ўзбекистон темир йўллари» и электромеханическим факультетом ТашИИТа, продолжают еще интенсивнее проводить теоретические и экспериментальные исследования, связанные с анализом и оценкой топливно-энергетической эффективности использования локомотивного парка железнодорожной отрасли в реальных условиях организации эксплуатационной деятельности действующих или вновь строящихся (уже построенных) участков железных дорог.

На железных дорогах АО «Ўзбекистон темир йўллари» движение грузовых и пассажирских поездов повсеместно организуется локомотивами электрической (электровозы серий  $BЛ80^{C}$ ,  $BЛ60^{K}$  и «Узбекистан») и дизельной (тепловозы серий TЭ10M, UzTE16M и TЭП70) тяги в разном секционном исполнении. Повышение эффективности использования дизельной (тепловозной) и электрической тяги с учетом увеличения пропускной и провозной способности железных дорог АО «Ўзбекистон темир йўллари» будет обеспечиваться за счет нового высокопроизводительного тягового подвижного состава, к которому относятся грузопассажирские, грузовые и пассажирские электровозы «Узбекистан», модернизирован-ные грузовые тепловозы серии UzTE16M и пассажирские тепловозы TЭП70БC.

Цель настоящих исследований заключается в обосновании параметров основных показателей перевозочной работы магистральных (поездных) грузовых тепловозов в реальных условиях организации эксплуатации локомотивов дизельной тяги тепловозного парка на одном из заданных (принятых) участков железной дороги железнодорожной отрасли Узбекистана.

Объект исследования – трехсекционные магистральные (поездные) грузовые тепловозы серии 3ТЭ10М и спрямленный профиль железнодорожного пути холмисто-горного участка Мароканд – Навои АО «Ўзбекистон темир йўллари».

Предметом исследования являются основные показатели и параметры топливноэнергетической эффективности перевозочной работы тепловозов на заданном холмистогорном участке железнодорожного пути.

В данное время проблема повышения эффективности использования тепловозного парка на неэлектрифицированных участках железных дорог успешно решается за счет модернизации части магистральных тепловозов серии ТЭ10М путем замены морально устаревшего дизеля 10Д100 на более современный и экономичный дизель 1А-5Д49 нового поколения [1].

И несмотря на то, что приблизительно 38 % всех главных железнодорожных путей АО «Ўзбекистон темир йўллари» уже электрифицированы, а на электровозный парк железнодорожной отрасли Узбекистана приходится примерно 183 единицы локомотивов электрической тяги в секционном исчислении [2], весьма ощутимый вклад в выполнение всего объема грузовых железнодорожных перевозок ложится на локомотивы дизельной тяги, к которым в первую очередь следует отнести магистральные (поездные) грузовые тепловозы серии ТЭ10М.

На сегодняшний день магистральные (поездные) грузовые тепловозы серии ТЭ10М, оборудованные дизелями 10Д100, в различном секционном исчислении составляют приблизительно 68 % всего тепловозного парка железнодорожной отрасли Узбекистана. Конструктивным отличием модернизированных трехсекционных грузовых тепловозов 3ТЭ10М является микропроцессорная система регулирования мощности дизель-генератора УСТА-75-02 (унифицированная система тепловозной автоматики), система КЛУБ-У (комплексное локомотивное устройство безопасности) и унифицированный пульт управления (УПУ). Кроме того, для обеспечения управления и контроля параметров на всех трех секциях в электрической схеме базового тепловоза 2ТЭ10М внесены изменения в соединениях интерфейсов и пультов управления каждой секции, а также систем подготовки пуска упомянутого тепловоза, пуска дизеля и пожарной сигнализации.

Для достижения поставленной цели исследований, обоснования параметров основных показателей перевозочной работы и оценки топливно-энергетической эффективности использования тепловозов 3ТЭ10М на участке Мароканд — Навои в различных условиях эксплуатации, опираясь на исходные данные [3, 6] и графический метод расчета скорости движения и времени хода поезда [4, 5], была выполнена серия тяговых расчетов.

Методика исследований предусматривает также составление математических моделей вождения грузовых поездов тепловозами 3ТЭ10М, реперной точкой которых являются не только тягово-эксплуатационные свойства (качества) этого тепловоза, но и условия организации перевозочной работы на заданном (принятом) участке Мароканд — Навои. При этом неодинаковые (разные) по величине крутизны уклона элементы (подъемы, площадки, спуски) профиля пути, чередуясь между собой в различной последовательности, и образуют тот самый реальный, холмисто-горный участок железной дороги, характеристики и параметры упомянутых элементов которого приведены в исследовании [6]. Участок железнодорожного пути Мароканд — Навои протяженностью в 140,5 километра содержит 99 элементов, из которых 57 и 39 элементов характеризуются изменением крутизны, соответственно подъемов от 0 до  $+4,46^{-0}/_{00}$  и спусков от 0 до  $-5,9^{-0}/_{00}$ , а три элемента — «площадки». Упомянутый участок относится к холмисто-горному, III типу профиля пути, так как здесь доля элементов профиля пути с крутизной уклонов в интервале от +3,0 до -3,0 ‰, включая площадки i=0, составляют примерно 43,4 % от общей длины рассматриваемого участка [3].

В работе [6] обозначены ограничения скоростей движения грузовых поездов при проследовании перегонов упомянутого холмисто-горного участка на проход (без остановок на промежуточных станциях и раздельных пунктах) и станций, в том числе промежуточных, а также раздельных пунктов при приеме таких поездов на главный или боковой железнодорожный пути. Железнодорожный участок пути Мароканд — Навои имеет пять промежуточных станций, на которых ограничение по скорости  $V^{\rm or}$  составляет 80 км/ч (ст. Джума), 60 км/ч (ст. Нурбулак, Каттакурган, Зирабулак) и 40 км/ч (ст. Зиевуддин) и шесть раздельных пунктов (разъездов) с ограничением скорости движения 60 км/ч на разъездах № 24, 28 и 29. Кроме этого на перегонах Мароканд — Джума и Нурбулак — Каттакурган имеется по одному ограничению по скорости движения в 80 км/ч и по два таких же ограничения по скорости движения грузовых поездов имеет каждый из перегонов Джума — Рзд № 24 и Каттакурган — Рзд № 28. При этом наибольшая скорость движения грузового поезда  $V^{\rm max} = 90$  км/ч.

В таблицах 1 и 2 обозначены результаты тяговых расчетов для трех различных вариантов ведения грузового поезда тепловозами 3ТЭ10М на участке Мароканд — Навои при движении без остановок и с остановками на промежуточных станциях (раздельных пунктах) с учетом дифференциации массы состава в диапазоне от  $Q_1 = 2500$  т до  $Q_3 = 3500$  т на величину  $\Delta Q = 500$  т и постоянным числом осей в составе m = 200 осей. Здесь приведены значения кинематических параметров (техническая скорость движения и время хода поезда, в том числе на различных режимах вождения поездов) основных показателей перевозочной работы тепловозов 3ТЭ10М по перегонам участка Мароканд — Навои, которые нами были определены (получены) для каждого из упомянутых выше видов движения с учетом общего и удельного расходов дизельного топлива на тягу поездов для исследуемого дизельного тягового подвижного состава в количественном и денежном исчислениях.

Таблица 1 – Показатели перевозочной работы тепловозов 3ТЭ10М по перегонам участка Мароканд – Навои (движение без остановок на промежуточных станциях и раздельных пунктах)

		Услови		Врем	Время хода пос		Время хода поезда,		Расход дизельного			Затраты	
	перен	возочной	работы	МИН			топлива	денежных					
		•			ı				средств				
<u> </u>			ая)				общий		тьный				
4e			10B			T'X		e,					
Вариант тягового расчета		<b>√</b> =	(ходовая)			в режиме холостого хода и торможения ґ <sub>ххэт</sub>		ва	a TTO				
0.1	у, т	cej	)		🗕	ТО!	r.	топлива гто	ива				
)B0	a Ç	1, 0	кен		И 1	пос	, KT	T0T 0TT	словного топлива $e_{\rm y}$ , кг/ $10^4$ ткм бругто				
Į Ķ	тав	й	кая		IXT	ХО	y E	o opy	T C	$C_{\mathrm{T}}$	$c_{ m \scriptscriptstyle T},$ KM		
11.	202	oce	leci b д	$t_{\rm x}$	Ме	то] То]	SATK.	101 M (	107 710	ые С сўм	ьные с <sub>т</sub> сўм/км		
иал	ca	OII	НИГ ЭСТ М/ч	ee	ЖИ	жи	:0e3	yph 4TK	OBE KT	HBi	ПБН . Сў		
	масса состава $Q$ ,	число осей т, осей	техническая (скорость движения, $V_{ m T},{ m kM/4}$	общее $t_{\mathrm{x}}$	в режиме тяги $t_{\scriptscriptstyle \mathrm{T}}$	в режиме холостого хода и торможения	за поездку $E,$	натурного топ кг/10 <sup>4</sup> ткм брутго	условного топлива $e_{\rm y}$ , кг/ $10^4$ ткм брут	полные тыс. сўм	удельные $c_{ m r},$ тыс. сўм/км		
		_											
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12		
	ı	1		•			L = 8,75		ı	1	I		
1	2500	200	69,96	7,80	4,30	3,50	112,35	49,41	70,66	198,91	21,870		
2	3000	200	70,41	7,75	4,40	3,75	115,15	42,20	60,35	203,87	22,415		
3	3500	200	67,37	8,10	5,30	2,80	136,75	42,96	61,43	242,11	26,620		
			Пеј	эегон Дж	ума – Ну		L = 29,00	KM					
1	2500	200	77,77	22,00	4,55	17,45	134,55	18,87	26,99	238,21	8,354		
2	3000	200	76,72	22,30	4,85	17,45	142,11	16,61	23,76	251,60	8,823		
3	3500	200	75,53	22,65	5,10	17,55	148,53	14,88	21,28	262,96	9,222		
			Перег	он Нурбу	ул <mark>ак – Ка</mark>	ттакурга	L = 24	,00 км					
1	2500	200	69,35	20,90	4,25	16,65	126,08	20,88	29,85	223,22	9,240		
2	3000	200	67,73	21,40	4,50	16,90	132,66	18,30	26,17	234,87	9,723		
3	3500	200	70,36	20,60	4,60	16,00	134,16	15,87	22,69	237,52	9,832		

Окончание таблицы 1

	Перегон Каттакурган – зд. № 28, <i>L</i> = 11,25 км											
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
1	2500	200	63,19	10,70	3,60	7,10	98,814	35,07	50,15	174,94	15,524	
2	3000	200	61,47	11,00	3,40	7,60	94,344	27,91	39,91	167,03	14,822	
3	3500	200	63,49	10,65	4,00	6,65	108,38	27,48	39,29	191,88	17,027	
	Перегон Рзд. № 28 — Зирабулак, <i>L</i> = 16,85 км											
1	2500	200	71,52	14,80	8,30	6,50	216,57	49,11	70,22	383,43	21,735	
2	3000	200	68,91	15,60	9,55	6,05	247,56	46,78	66,89	438,29	24,845	
3	3500	200	68,73	15,40	10,80	4,60	277,40	44,93	64,25	491,12	27,840	
			Пере	гон Зира	булак – З	Виевудди	L = 27	15 км				
1	2500	200	82,24	19,50	5,90	13,60	164,18	24,57	35,13	290,67	10,874	
2	3000	200	84,41	19,00	5,90	13,10	163,61	20,40	29,18	289,66	10,837	
3	3500	200	81,82	19,60	6,50	13,10	178,73	19,10	27,32	316,43	11,838	
			Пер	оегон Зис	евуддин -	– Навои,	L = 23,50	км				
1	2500	200	84,12	16,90	5,25	11,65	145,58	24,58	35,14	257,74	10,878	
2	3000	200	85,12	16,70	5,15	11,55	142,29	20,11	28,76	251,92	10,632	
3	3500	200	84,61	16,80	5,40	11,40	149,08	17,98	25,71	263,94	11,140	

Следует сказать, что в основе любого из возможных видов движения (равномерное, ускоренное или замедленное) грузового поезда при расчете его кинематических параметров (траектории) движения на участке счета лежит принцип максимального (наибольшего) использования мощности и тягово-эксплуатационных качеств (свойств) локомотива [4, 5], а также кинетической энергии поезда в соответствии с нормами [10]. Согласно тяговой характеристике трехсекционного магистрального (поездного) грузового тепловоза 3ТЭ10М такие условия будут «обеспечиваться» на пятнадцатой (номинальной) позиции контроллера машиниста в диапазоне изменения скоростей движения от скорости выхода на автоматическую характеристику (~17 км/ч) до конструкционной (100 км/ч).

Таблица 2 – Показатели перевозочной работы тепловозов 3ТЭ10М по перегонам участка Мароканд – Навои (движение с остановками на промежуточных станциях и раздельных пунктах)

		Услови	Я	Время хода поезда,			Pacxo	ц дизелы	НОГО	Затраты		
	перев	возочной	работы	мин		топлива			денежных			
- CT										средств		
leTa							общий	уделн	ный			
acr						.X. •T		e,				
Вариант тягового расчета	масса состава Q, т	нисло осей т, осей	техническая скорость движения, $V_{ m T}$ , км $^{ m I}$ ч	общее $t_{\mathrm{x}}$	в режиме тяги t <sub>r</sub>	в режиме холостого хода и торможения $t_{{ m x.x.r}}$	за поездку $E$ , кг	натурного топлива кг/10 <sup>4</sup> ткм брутто	условного топлива $e_{\rm y}$ , кг/ $10^4$ ткм брутго	полные $C_{ m r}$ тыс. сўм	удельные $c_{ ext{r}},$ тыс. сў $M$ км	
1		_							, .			
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
<u> </u>	2500	200					L = 8,75		<b>7107</b>	202.74	22.260	
1	2500	200	56,84	9,60	4,30	5,30	114,40	50,31	71,95	202,54	22,269	
2	3000	200	56,84	9,60	4,40	5,20	116,81	42,81	61,22	206,81	22,738	
3	3500	200	54,57	10,00	5,30	4,70	138,92	43,64	62,40	245,95	27,042	
							L = 29,00					
1	2500	200	68,99	24,80	7,50	17,30	208,72	29,28	41,87	369,53	12,959	
2	3000	200	66,83	25,60	8,15	17,45	225,27	26,33	37,66	398,83	13,987	
3	3500	200	65,93	25,95	8,35	17,60	230,48	23,09	33,02	408,05	14,311	
			Перег	он Нурб	улак – К	аттакург	ан, $L = 24$ ,	00 км				
1	2500	200	61,67	23,50	6,05	17,45	172,35	28,54	40,81	305,14	12,632	
2	3000	200	59,64	24,3	6,40	17,90	181,69	25,07	35,85	321,67	13,316	
3	3500	200	59,89	24,20	6,7	17,50	188,79	22,33	31,93	334,24	13,837	

#### Окончание таблицы 1

Перегон Каттакурган – Рзд. № 28, $L = 11,25$ км											
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	2500	200	58,29	11,60	4,80	6,80	128,71	45,69	65,33	227,87	20,221
2	3000	200	56,82	11,90	4,90	7,00	131,46	38,88	55,61	232,74	20,653
3	3500	200	58,04	11,65	5,70	5,95	150,42	38,14	54,54	266,31	23,632
	Перегон Рзд. № 28 — Зирабулак, <i>L</i> = 16,85 км										
1	2500	200	63,38	16,70	8,10	8,60	213,92	48,51	69,36	378,73	21,469
2	3000	200	59,46	17,80	9,25	8,55	242,85	45,89	65,62	429,95	24,372
3	3500	200	61,53	17,20	10,10	7,10	262,61	42,53	60,82	464,94	26,355
			Пере	гон Зира	булак – З	Зиевудди	$_{\rm IH}, L = 27, 1$	15 км			
1	2500	200	72,57	22,10	6,40	15,70	179,18	26,81	38,34	317,23	11,868
2	3000	200	70,34	22,80	6,80	16,00	189,60	23,64	33,81	335,68	12,558
3	3500	200	69,72	23,00	7,40	15,60	204,26	21,83	31,22	361,63	13,529
			Пе	регон Зи	евуддин	– Навои,	L = 23,50	КМ			
1	2500	200	74,44	19,10	7,50	11,60	202,22	34,14	48,82	358,02	15,111
2	3000	200	69,68	20,40	8,55	11,85	228,97	32,21	46,06	405,38	17,110
3	3500	200	66,74	21,30	9,50	11,80	252,85	30,49	43,60	447,7	18,894

Анализ результатов выполненных тяговых расчетов для различных условий организации грузового движения поездов на участке Мароканд — Навои подтверждает промежуточные выводы исследований [2, 6], т. е. при эксплуатации магистральных (поездных) грузовых тепловозов 3ТЭ10М на номинальной позиции контроллера машиниста в сочетании с режимами холостого хода и торможения также преобладает только ускоренное и замедленное движение, а движение с постоянной скоростью (равномерное движение) практически не наблюдается.

На рисунках 1 и 2 соответственно показан характер изменения параметров некоторых основных показателей перевозочной работы магистральных грузовых тепловозов 3ТЭ10М на заданном холмисто-горном участке железнодорожного пути при движении грузовых поездов без остановок и с остановками на промежуточных станциях (раздельных пунктах) в принятом диапазоне изменения их массы составов.

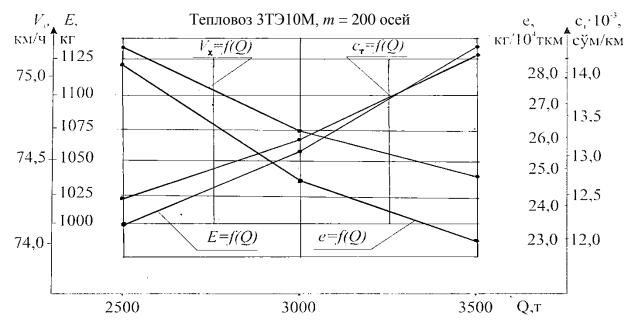


Рисунок 1 — Динамика показателей перевозочной работы тепловозов 3ТЭ10М на участке Мароканд — Навои, движение без остановок

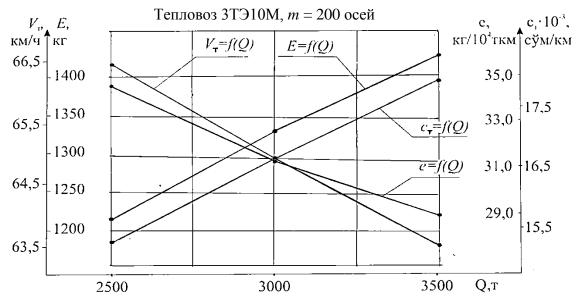


Рисунок 2 – Динамика показателей перевозочной работы тепловозов 3TЭ10M на участке Мароканд – Навои, движение с остановками

Анализ результатов тяговых расчетов относительно графикового (унифицированного) грузового поезда ( $Q_2 = 3000$  т) [5] позволил сделать следующие выводы (в скобках приведены значения для условий движения грузового поезда с остановками на промежуточных станциях и раздельных пунктах).

- 1. Усредненное общее время хода поезда составляет 1,89 ч (2,18 ч), а с увеличением или уменьшением массы состава на  $\Delta Q = 500$  т происходит увеличение или уменьшение этого времени соответственно на 0,4 % (0,68 %) и 1,01 % (3,77 %).
- 2. Техническая скорость движения поезда, наоборот, при аналогичном изменении массы состава имеет тенденцию к снижению и повышению в тех же пределах, причем в среднем она равна 74,66 км/ч (64,63 км/ч).
- 3. Общий и удельный средний расход дизельного топлива на тягу поездов составляет соответственно 1056,34 кг (1321,47 кг) и 25,25 кг/ $10^4$ ткм брутто (31,53 кг/ $10^4$ ткм брутто).
- 4. Увеличение массы состава на  $\Delta Q = 500$  т способствует увеличению полного и уменьшению удельного расхода дизельного топлива соответственно на 9,16 % (8,48 %) и 6,44 % (3,79 %), а уменьшение массы состава на  $\Delta Q = 500$  т обеспечивает уменьшение полного расхода дизельного топлива на 3,83 % (7,37 %) и увеличение удельного расхода дизельного топлива на 15,41 % (11,16 %).
- 5. Время хода поезда в режиме холостого хода и торможения, а также в режиме тяги составляет соответственно от 1,274 ч (1,379 ч) до 1,202 ч (1,337 ч) и от 0,603 ч (0,744 ч) до 0,695 ч (0,884 ч). При увеличении массы состава на  $\Delta Q = 500$  т происходит снижение времени хода поезда на режиме холостого хода и торможения, а также его увеличение в режиме тяги соответственно на 0,065 ч (0,062 ч) и 0,066 ч (0,077 ч). Время хода поезда в режиме холостого хода и торможения увеличивается, а в режиме тяги уменьшается соответственно на 0,0075 ч (уменьшается на 0,02 ч) и 0,0267 ч (0,063 ч) с уменьшением массы состава на  $\Delta Q = 500$  т.
- 6. Уменьшение массы состава на  $\Delta Q = 500$  т приводит к снижению на 3,28 % (4,21 %) и повышению на 1,62 % (2,43 %) соответственно показателей использования режимов тяги и холостого хода, торможения [2], а с увеличением массы состава на  $\Delta Q = 500$  т происходит повышение и снижение этих показателей соответственно на 10,39 % (8,77 %) и 5,16 % (5,06 %).
- 7. Уменьшение массы состава на  $\Delta Q = 500$  т приводит к снижению полной и удельной стоимостей перевозок на 3,83 % (7,37 %), а с увеличением массы состава на  $\Delta Q = 500$  т происходит повышение этих показателей на 9,16 % (8,48 %).

Помимо этого были определены значения технической скорости движения и времени хода грузовых поездов, а также общего и удельного расхода дизельного топлива на тягу для тепловозов 3ТЭ10М при движении грузовых поездов с остановками и без остановок на промежуточных станциях и раздельных пунктах по участку Мароканд – Навои в целом.

По данным таблицы 1, рисунков 1 и 2, опираясь на стандартную программу *Microsoft Excel Office*, нами были рассчитаны аналитические выражения (уравнения регрессии), предназначенные для определения значений параметров основных показателей перевозочного процесса на заданном холмисто-горном участке Мароканд — Навои, организованного магистральными грузовыми тепловозами 3ТЭ10М любой *i*-й массы состава  $Q_i$  грузового поезда с достаточной величиной достоверности аппроксимации  $R^2 = 1,0$  (необходимое условие достоверности —  $R^2 \ge 0,8$ ), где индекс звездочка \* — для движения с остановками на промежуточных станциях (раздельных пунктах) и фактор (показатель)  $Q_i = 1, 2, 3$  — вариант тягового расчета.

Общее время хода поезда, мин,

$$t_x = -0.2Q_i^2 + 1.4Q_i + 111.4 / t_x = -0.01Q_i^2 + 3.35Q_i + 124.15^*.$$
 (1)

Время хода поезда на режиме тяги, мин,

$$t_{\rm T} = 0.475Q_i^2 + 0.875Q_i + 34.8 / t_{\rm T} = -0.1Q_i^2 + 4.6Q_i + 40.15^*.$$
 (2)

Время хода поезда на режиме холостого хода и торможения, мин:

$$t_{xx,T} = -0.675Q_i^2 + 0.525Q_i + 76.6 / t_{xx,T} = -1.25Q_i + 84^*.$$
 (3)

Техническая скорость движения, км/ч,

$$V_{\rm T} = 0.135Q_i^2 - 0.935Q_i + 75.98 / V_{\rm T} = 0.08Q_i^2 + 1.679Q_i + 68.16^*.$$
 (4)

Общий расход дизельного топлива за поездку, кг,

$$e = 11,185Q_i^2 + 22,695Q_i + 964,25 / E = -1,5Q_i^2 + 114,4Q_i + 1107,6^*.$$
 (5)

Удельный расход натурного топлива, кг / 10<sup>4</sup>ткм брутто,

$$e = 0.71Q_i^2 - 5.52Q_i + 33.11 / e = 0.445Q_i^2 - 4.605Q_i + 38.73*.$$
 (6)

Удельный расход условного топлива, кг /  $10^4$ ткм брутто,

$$e = 1,015Q_i^2 - 7,885Q_i + 47,33 / e = 0,65Q_i^2 - 6,64Q_i + 55,43*.$$
 (7)

Полные денежные затраты, тыс. сўм,

$$C_{\rm T} = 19.8Q_i^2 + 40.2Q_i, +1707.1 / C_{\rm T} = -4.4Q_i^2 + 202.4Q_i, +1961.1*.$$
 (8)

Приведенные денежные затраты, тыс. сўм / км,

$$c_{\rm T} = 0.1405Q_i^2 + 0.2845Q_i + 12,099 / c_{\rm T} = -0.031Q_i^2 + 1.434Q_i + 13,899*.$$
 (9)

В принятом диапазоне изменения массы состава грузовых поездов (от 2500 до 3500 т) получены усредненные значения времени, затраченного на один разгон – замедление (составляет около 2,96 мин) и расхода дизельного топлива на одну остановку поезда, который колеблется в среднем приблизительно от 38,56 кг ( $Q_1 = 2500$  т) до 49,22 кг ( $Q_3 = 3500$  т).

Уменьшение объема перевозочной работы трехсекционных магистральных (поездных) грузовых тепловозов 3ТЭ10М на железнодорожных участках Мароканд – Каттакурган и Каттакурган – Навои независимо от вида движения грузовых поездов приводит к снижению эффективности их использования на обоих упомянутых участках несмотря на разные «тяговые» свойства (качества) профилей пути данных участков.

Полученные результаты вполне справедливы и корректны, так как хорошо согласуются с нашими предыдущими исследованиями [1, 2, 5-9 и др.], будут весьма полезны и необходимы специалистам локомотивного хозяйства узбекских железных дорог при разработке рекомендаций и мероприятий, направленных на повышение топливно-энергетической эффективности использования трехсекционных магистральных (поездных) грузовых тепловозов

3ТЭ10М в различных реальных условиях организации движения грузовых поездов на холмисто-горном участке Мароканд — Навои (и идентичным ему по тяговым качествам профиля пути участкам), а также машинистам и машинистам-инструкторам по теплотехнике локомотивного депо Бухара АО «Ўзбекистон темир йўллари».

#### Список литературы

- 1. Аблялимов, О. С. Исследование эксплуатации тепловозов UzTE16M4 на участке Кумкурган Ташгузар ГАЖК «Ўзбекистон темир йўллари» [Текст] / О. С. Аблялимов // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. Омск. 2014. № 2 (18). С. 2 7.
- 2. Аблялимов, О. С. Исследование перевозочной работы электровозов  $3BJ80^{C}$  на холмисто-горном участке АО «Ўзбекистон темир йўллари» [Текст] / О. С. Аблялимов // Вестник транспорта Поволжья / Самарский гос. ун-т путей сообщения. Самара. 2016. № 4 (58) С. 17 23.
- 3. Аблялимов, О. С. К исследованию эффективности использования тепловозной тяги на участке Мароканд Навои [Текст] / О. С. Аблялимов, Ф. С. Равшанов // Республика илмий амалий анжумани «Таълимнинг узвийлиги ва узликсизлигини таъминлаш соҳа тараққиетининг муҳим мезони» / Тошкент давлат иқтисодиет университети. Ташкент, 2015. С. 78 81.
- 4. Кузьмич, В. Д. Теория локомотивной тяги: Учебник [Текст] / В. Д. Кузьмич, В. С. Руднев, С. Я. Френкель. М.: Маршрут, 2005. 448 с.
- 5. Аблялимов О. С. Основы управления локомотивов: Учебник [Текст] / О. С. Аблялимов, Э. С. Ушаков. Ташкент: Davr, 2012. 392 с.
- 6. Аблялимов, О. С. Исследование эксплуатации тепловозов UzTE16M3 на холмистогорном участке АО «Ўзбекистон темир йўллари» [Текст] / О. С. Аблялимов // Вестник транспорта Поволжья / Самарский гос. ун-т путей сообщения. Самара. 2016. № 3 (57) С. 16-22.
- 7. Аблялимов, О. С. Исследование эффективности использования локомотивной тяги в эксплуатации [Текст] / О. С. Аблялимов, В. С. Кудряшов, И. Р. Каюмов // Вестник ТашИИТа / Ташкентский ин-т инж. ж.-д. трансп. Ташкент, 2013. N 2. C. 50 54.
- 8. Аблялимов, О. С. Исследование эффективности использования тепловозной тяги на холмистом участке железной дороги [Текст] / О. С. Аблялимов, Ж. Х. Атахажаев // Вестник ТашИИТа / Ташкентский ин-т инж. ж.-д. трансп. Ташкент. 2013. № 3/4. С. 31 34.
- 9. Аблялимов, О. С. К анализу использования магистральных грузовых электровозов «Узбекистан» на горном участке железной дороги [Текст] / О. С. Аблялимов, Т. М. Турсунов, Ф. А. Салимов // Вестник ТашИИТа / Ташкентский ин-т инж. ж.-д. трансп. Ташкент, 2015. N 2/4. С. 48 53.
- 10. Правила тяговых расчетов для поездной работы [Текст] / Всесоюзный научно-исследовательский ин-т ж.-д. трансп. М.: Транспорт, 1985. 287 с.

#### References

- 1. Ablialimov O. S. Research UzTE16M4 locomotives operating on Kumkurgan site Tashguzar SSRC «O'zbekiston Temir Yullari» [Issledovanie ekspluatatsii teplovozov UzTE16M4 na uchastke Kumkurgan Tashguzar GAZhK «Ўzbekiston temir iўllari»]. *Izvestiia Transsiba The journal of Transsib Railway Studies*, 2014, no. 2 (18), pp. 2 7.
- 2. Ablialimov O. S. Research electric transportation work 3VL80S on hilly mountain area of «Uzbekiston Temir Yullari» [Issledovanie perevozochnoi raboty elektrovozov 3VL80S na kholmisto-gornom uchastke AO «Ўzbekiston temir iўllari»]. *Vestnik transporta Povolzh'ia Bulletin of the Volga transport*, 2016, no. 4 (58), pp. 17 23.
- 3. Ablialimov O. S., Ravshanov F. S. To study the effectiveness of the use of diesel traction in the area Marokand Navoi [K issledovaniiu effektivnosti ispol'zovaniia teplovoznoi tiagi na uchastke Marokand Navoi]. Respublika ilmii amalii anzhumani «Ta"limning uzviiligi va uzliksizligini ta"minlash soҳa taraққietining muҳim mezoni» Republic ilmy Amal anzhumani «Talimning uzviyligi Islands uzliksizligini taminlash soҳa taraққietining muҳim mesons», 2015, pp. 78 81.

- 4. Kuz'mich V. D., Rudnev V. S., Frenkel' S. Ia. *Teoriia lokomotivnoi tiagi* (Locomotive traction theory). Moscow: Marshrut, 2005, 448 p.
- 5. Ablialimov O. S., Ushakov E. S. *Osnovy upravleniia lokomotivov* (Basics locomotives Management). Tashkent: Davr, 2012, 392 p.
- 6. Ablialimov O. S. Research UzTE16M3 locomotives operating on hilly and mountainous area of «Uzbekiston Temir Yullari» [Issledovanie ekspluatatsii teplovozov UzTE16M3 na kholmistogornom uchastke AO «Šzbekiston temir išllari»]. *Vestnik transporta Povolzh'ia Bulletin of the Volga transport*, 2016, no. 3 (57), pp. 16 22.
- 7. Ablialimov O. S., Kudriashov V. S., Kaiumov I. R. Research of efficiency of use of locomotive traction in operation [Issledovanie effektivnosti ispol'zovaniia lokomotivnoi tiagi v ekspluatatsii]. *Vestnik TashIITa Bulletin of the Tashiit*, 2013, no. 1/2, pp. 50 54.
- 8. Ablialimov O. S., Atakhazhaev Zh. Kh. Research of efficiency of use of diesel traction on the hilly section of the railway [Issledovanie effektivnosti ispol'zovaniia teplovoznoi tiagi na kholmistom uchastke zheleznoi dorogi]. *Vestnik TashIITa Bulletin of the Tashiit*, 2013, no. 3/4, pp. 31 34.
- 9. Ablialimov O. S., Tursunov T. M., Salimov F. A. to the analysis of the use of mainline freight locomotives «Uzbekistan» on the mountain section of the railway [K analizu ispol'zovaniia magistral'nykh gruzovykh elektrovozov «Uzbekistan» na gornom uchastke zheleznoi dorogi] *Vestnik TashIITa Bulletin of the Tashiit*, 2015, no. 3/4, pp. 48 53.
- 10. Grebeniuk P. T. *Pravila tiagovykh raschetov dlia poezdnoi raboty* (Rules of traction calculations for train operation). Moscow: Transport, 1985, 287 p.

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

#### Аблялимов Олег Сергеевич

Ташкентский институт инженеров железнодорожного транспорта (ТашИИТ).

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

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Локомотивы и локомотивное хозяйство», ТашИИТ.

Тел.: (81099871) 299-03-94. E-mail: icenter@tashiit.uz

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Аблялимов, О. С. Исследование эксплуатации тепловозов 3ТЭ10М на холмисто-горном участке АО «Ўзбекистон темир йўллари» [Текст] / О. С. Аблялимов // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. — Омск. — 2016. — N 2 (26). — С. 2 — 10.

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

#### Ablyalimov Oleg Sergeevich

Toshkent Temir Yoʻl Muhandislari Instituti (ToshTYMI).

1, Adilkhodjaev st., Toshkent, 100167, Uzbekistan.

Ph. D. in Engineering, Associate Professor of the department «Lokomotives and locomotive economy», ToshTYMI.

Phone: (81099871) 299-03-94. E-mail: icenter@tashiit.uz

#### BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Ablyalimov O. S. Researching an exploitation of 3TE10M diesel locomotive on a hilly-mountainous direction of «Uzbekistan railways» JSC. Journal of Transsib Railway Studies, 2016, vol. 26, no. 2, pp. 2 – 10. (In Russian).

УДК 621.331: 629.423

#### Алтангэрэл ЭНХ-АМГАЛАН

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

#### ОБОСНОВАНИЕ ВЫБОРА СЕРИИ ЭЛЕКТРОВОЗА ДЛЯ УЛАН-БАТОРСКОЙ ЖЕЛЕЗНОЙ ДОРОГИ

Аннотация. Приведена методика расчета максимальной массы состава вагонов. Выполнен расчет максимальной массы состава вагонов грузовых поездов тепловоза 2ТЭ116 и электровоза 2ЭС5К в условиях Улан-Баторской железной дороги. Представлено обоснование выбора серии электровоза для Улан-Баторской железной дороги.

Ключевые слова: железная дорога, электрификация, тяга, электровоз.

#### Altangerel ENKH-AMGALAN

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

# RATIONALE FOR SELECTION SERIES ELECTRIC LOVOMOTIVES ULAANBAATAR RAILWAY

**Abstract.** The methodology of calculation of the maximum weight of the composition of wagons. The calculation of the maximum weight of the composition of freight trains and wagons locomotive 2TE116 electric 2ES5K under the Ulaanbaatar Railway. Presented by the rationale for the choice of an electric series for Ulan-Bator Railway.

**Keywords:** railway electrification, traction, locomotive.

Огромная работа железнодорожного транспорта Монголии, как и везде, во многом определяется локомотивным парком железных дорог, эффективностью его использования в эксплуатации, техническими возможностями и состоянием, энергетическими затратами.

Повышение эффективности перевозочного процесса на железнодорожном транспорте вызывает необходимость увеличения массы и длины поездов, но при этом значительно возрастают энергозатраты. С целью снижения энергозатрат на тягу необходимо применять различные способы, в том числе рациональные режимы вождения поездов повышенной массы и длины, а также их тяговое обеспечение с использованием электровозов, имеющих улучшенные тягово-энергетические показатели.

Рациональное тяговое обеспечение поездов очень важно для эффективной и высокопроизводительной работы локомотивов и безопасности движения поездов. Оно позволяет найти скрытые резервы при электрификации линий, развитии провозной и пропускной способности действующих дорог, лучше использовать локомотивы на каждом участке, экономно расходуя электрическую энергию и топливо, а расход электроэнергии на тягу является показателем энергоемкости и качества перевозочного процесса.

Для рационального тягового обеспечения поезда важное значение имеет определение оптимальной массы состава при выбранной серии локомотива. Масса поезда является одним из важнейших показателей эффективности работы железнодорожного транспорта. Он напрямую влияет на все основные показатели работы локомотивного хозяйства. От массы поезда зависит всеобъемлющий интегральный показатель эффективности работы железных дорог — расход топливно-энергетических ресурсов на тягу, стоимость которых составляет значительную долю эксплуатационных расходов.

Обновление локомотивного парка — одна из важных составляющих качественной работы железных дорог. Внедрение в эксплуатацию новых электровозов сопровождается разработкой оптимальных режимов работы для наиболее полного и эффективного их использования. Так, с вводом в эксплуатацию на Восточно-Сибирской железной дороге грузовых электровозов переменного тока серии 2ЭС5К «Ермак» появилась необходимость выявления и принятия мер по более полному использованию ресурсов электровоза и повышению эффективности вождения ими грузовых поездов.

Исходя из существующей тенденции для освоения возросшего объема перевозок через 5 лет, т. е. в 2021 г., среднюю массу поезда потребуется увеличить до 4800 – 5200 т. Вождение поездов такой массы используемые на УБЖД в настоящее время тепловозы серии 2ТЭ116 и 2М62 не смогут обеспечить из-за недостаточной мощности и силы тяги. Возможно применение сдвоенной тяги для вождения поездов большой массы, однако при этом значительно возрастают эксплуатационные расходы на тепловозную тягу в основном из-за увеличения расхода топливно-энергетических ресурсов.

Опыт железных дорог других стран, прежде всего российских железных дорог, показывает, что для освоения возрастающего объема перевозок целесообразно переходить с тепловозной тяги на электрическую.

Улан-Баторская железная дорога Монголии соединена с Восточно-Сибирской железной дорогой Российской Федерации, на которую в настоящее время поступают новые грузовые электровозы переменного тока серии 2ЭС5К. Такие электровозы в перспективе могут работать на электрифицированной Улан-Баторской железной дороге, поэтому для них определим максимальную массу грузового поезда и оценим энергетическую эффективность применения электрической тяги на УБЖД.

Максимальную массу состава вагонов грузовых поездов определяют для расчетного режима работы электровоза, который характеризуется расчетными силой тяги и скоростью движения. Параметры расчетного режима работы грузового электровоза определяются координатами точки пересечения тяговой характеристики расчетной (обычно последней) позиции регулирования напряжения тягового двигателя с линией ограничения силы тяги по сцеплению колес электровоза с рельсами.

Максимальная масса состава вагонов определяется по различным условиям: по условиям трогания и разгона, по условиям движения с установившейся скоростью на расчетном подъеме, по условиям устойчивости колес подвижного состава в рельсовой колее. Расчет максимальной массы состава вагонов производится на основании рекомендаций [1].

Согласно рекомендациям [1] касательная сила тяги электровоза при трогании и разгоне поезда характеризуется выражением:

$$F_{\text{KP}} = W_{\text{O}} + W_{i} + W_{u} = W_{\text{O}\Pi} + W_{i\Pi} + W_{u\Pi} + W_{\text{OC}} + W_{i\text{C}} + W_{u\text{C}} = m_{\Pi}g(w_{\text{O}\Pi} + i + k_{u}u/g) + m_{c}g(w_{\text{OC}} + i + k_{u}u/g),$$
 (1)

откуда максимальная масса состава вагонов по условиям трогания и разгона, т,

$$m_c = \frac{F_{\rm kp} \cdot 10^3 - m_{\pi} g(w_{\rm on} + i + 10^3 k_u u / g)}{g(w_{\rm oc} + i + 10^3 k_u u / g)}.$$
 (2)

Согласно рекомендациям [1] касательная сила тяги электровоза при движении поезда с установившейся скоростью характеризуется выражением:

$$F_{\rm KD} = W_{\rm o} + W_i = W_{\rm on} + W_{in} + W_{\rm oc} + W_{ic} = m_{\pi}g(w_{\rm on} + i) + m_{\rm c}g(w_{\rm oc} + i), \tag{3}$$

откуда максимальная масса состава вагонов по условию движения поезда с установившейся скоростью, т,

$$m_{\rm c} = \frac{F_{\rm kp} \cdot 10^3 - m_{\rm \pi} g(w_{\rm on} + i)}{g(w_{\rm oc} + i)} \,. \tag{4}$$

В приведенных выражениях приняты следующие обозначения:  $W_{\rm o}, W_{\rm on}, W_{\rm oc}$  — силы основного сопротивления движению поезда, электровоза и состава вагонов;  $W_{i}, W_{in}, W_{ic}$  — силы от подъема, действующие на поезд, электровоз и состав вагонов;  $W_{u}, W_{un}, W_{uc}$  — силы инерции поезда, электровоза и состава вагонов; g — ускорение свободного падения;  $w_{\rm on}, w_{\rm oc}$  — удельное основное сопротивление движению электровоза и состава вагонов.

Удельное основное сопротивление движению электровоза под током, Н/кН,

для звеньевого пути -

$$w_{\text{ол}} = w_0' = 1.9 + 0.01V + 0.0003V^2; \tag{5}$$

для бесстыкового пути –

$$w_{\text{OI}} = w_{\text{O}}' = 1.9 + 0.008V + 0.00025V^2. \tag{6}$$

Удельное основное сопротивление движению 4-осных грузовых вагонов на роликовых подшипниках, H/кH,

для звеньевого пути -

$$w_{\rm oc} = w_{\rm o}'' = 0.7 + (3 + 0.1 \text{V} + 0.0025 \text{V}^2)/m_{\rm BO};$$
 (7)

для бесстыкового пути -

$$w_{\rm oc} = w_{\rm o}'' = 0.7 + (3 + 0.09V + 0.002V^2)/m_{\rm BO},$$
 (8)

где  $m_{\rm BO}$  — масса на ось вагона, т.

Количество вагонов состава поезда определяется выражением:

$$n_{\rm B} = m_{\rm c} / (4m_{\rm BO}).$$
 (9)

Для определения максимальной массы грузового поезда с 2-секционным электровозом 2ЭС5К по условиям трогания и разгона приняты исходные данные, приведенные в таблице 1.

Таблица 1 – Исходные данные для определения максимальной массы грузового поезда по условиям трогания и разгона

Параметр	Значение
Масса электровоза, т	$m_{\pi} = 192 \text{ T}$
Скорость разгона, км/ч	$V_{\mathrm{pasr}} = 43.5$
Расчетная касательная сила тяги электровоза, кН	$F_{\text{кразг}} = 502,2$
Ускорение поезда, $M/c^2$	u = 0.02
Коэффициент инерции вращающихся частей поезда	$k_u = 1,06$
Вагоны грузовые 4-осные на роликовых подшипниках с массой на ось вагона, т	$m_{\scriptscriptstyle \mathrm{BO}}\!=20$

Удельное основное сопротивление движению электровоза под током для звеньевого пути

$$w_0' = 1.9 + 0.01V + 0.0003V^2, (10)$$

$$w_0' = 1.9 + 0.01.43.5 + 0.0003 \cdot 43.5^2 = 2.902 \text{ H/kH}.$$

Удельное основное сопротивление движению 4-осных грузовых вагонов на роликовых подшипниках для звеньевого пути

$$w_0'' = 0.7 + (3 + 0.1.43.5 + 0.0025 \cdot 43.5^2)/20 = 1.304 \text{ H/kH}.$$

После подстановки величин в расчетную формулу получим выражение для определения максимальной массы состава вагонов по условиям трогания и разгона, для звеньевого пути:

$$m_c = \frac{502200 - 192 \cdot 9,81(2,9 + i + 10^3 \cdot 1,06 \cdot 0,02/9,81)}{9,81(1,304 + i + 10^3 \cdot 1,06 \cdot 0,02/9,81)}.$$
 (11)

Точно так же производим расчет для бесстыкового пути по формулам, получаем  $w_o' = 2,902 \text{ H/kH}, w_o'' = 1,304 \text{ H/kH}$  и подставляем значения в формулу.

Для определения максимальной массы грузового поезда с электровозом 2ЭС5К по условиям движения с установившейся скоростью приняты исходные данные, приведенные в таблице 2.

Таблица 2 – Исходные данные для определения максимальной массы грузового поезда по условиям движения с установившейся скоростью

Параметр	Значение
Масса электровоза, т	$m_{\pi} = 192$
Расчетная скорость движения, км/ч	$V_{\rm p} = 43.5$
Расчетная касательная сила тяги электровоза, кН	$F_{\rm kp} = 502,2$
Вагоны грузовые 4-осные на роликовых подшипниках с массой на ось ва-	m - 20
гона, т	$m_{\text{BO}} = 20$

После подстановки величин в расчетную формулу получим выражение для определения максимальной массы состава вагонов грузового поезда по условиям движения с установившейся расчетной скоростью, для звеньевого пути:

$$m_{\rm c} = \frac{502200 - 192 \cdot 9,81 \cdot (2,902 + i)}{9,81 \cdot (1,304 + i)} \,. \tag{12}$$

Электровозы серии 2ЭС5К могут работать также в 3- и 4-секционном вариантах, при этом их массы и расчетные касательные силы тяги возрастают соответственно в 1,5 и 2 раза, т. е. для 3-секционного варианта составляют 288 т и 753,3 кH, а для 4-секционного варианта -384 т и 1004,4 кH.

На рисунках 1 и 2 показана зависимость максимальной массы состава вагонов грузового поезда по разным условиям движения от крутизны подъемов і для звеньевого пути.

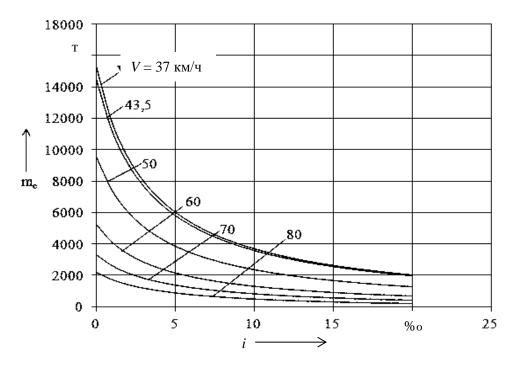


Рисунок 1 — Зависимости максимальной массы состава вагонов грузового поезда с электровозом 2ЭС5К по условиям трогания и разгона при различной крутизне подъема i

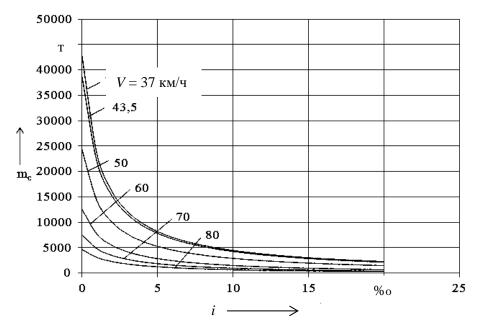


Рисунок 2 — Зависимости максимальной массы состава вагонов грузового поезда с электровозом 2ЭС5К по условию движения с установившейся скоростью при различной крутизне подъема i

Для определения максимальной массы грузового поезда с 2-секционным тепловозом 2ТЭ116 по условиям трогания и разгона приняты исходные данные, приведенные в таблице 3.

Таблица 3 – Исходные данные для определения максимальной массы грузового поезда по условиям трогания и разгона

Параметр	Значение
Масса тепловоза, т	т =276 т
Скорость разгона, км/ч	$V_{pa3\Gamma} = 24,2$
Расчетная касательная сила тяги электровоза, кН	$F_{\text{кразг}} = 496,4$
Ускорение поезда, м/c <sup>2</sup>	u = 0.02
Коэффициент инерции вращающихся частей поезда	$k_{\rm u} = 1,06$
Вагоны грузовые 4-осные на роликовых подшипниках с массой на ось вагона, т	$m_{_{\rm BO}} = 20$

Удельное основное сопротивление движению электровоза под током для звеньевого пути

$$w_{o}' = 1.9 + 0.01V + 0.0003V^{2},$$

$$w_{o}' = 1.9 + 0.01 \cdot 24.2 + 0.0003 \cdot 24.2^{2} = 2.31 \text{ H/kH}.$$
(13)

Удельное основное сопротивление движению 4-осных грузовых вагонов на роликовых подшипниках для звеньевого пути

$$w_o'' = 0.7 + (3 + 0.1V + 0.0025V^2)/m_{BO},$$

$$w_o'' = 0.7 + (3 + 0.1.24, 2 + 0.0025 \cdot 24, 2^2)/20 = 1.04 \text{ H/kH}.$$
(14)

После подстановки величин в расчетную формулу получим выражение для определения максимальной массы состава вагонов по условиям трогания и разгона, для звеньевого пути:

$$m_{\rm c} = \frac{496400 - 276 \cdot 9,81(2,31 + i + 10^3 \cdot 1,06 \cdot 0,02/9,81)}{9,81(1,04 + i + 10^3 \cdot 1,06 \cdot 0,02/9,81)}.$$
 (15)

Точно так же производим расчет для бесстыкового пути по формулам, получаем  $w_0' = 2{,}317 \text{ H/kH}, w_0'' = 1{,}044 \text{ H/kH}$  и подставляем значения в формулу (2).

Для определения максимальной массы грузового поезда с тепловозом 2ТЭ116 по условиям движения с установившейся скоростью в приняты исходные данные, приведенные в таблице 4.

Таблица 4 – Исходные данные для определения максимальной массы грузового поезда по условиям движения с установившейся скоростью

Параметр	Значение
Масса тепловоза, т	$m_{\pi} = 276$
Расчетная скорость движения, км/ч	$V_{\rm p} = 24.2$
Расчетная касательная сила тяги электровоза, кН	$F_{\rm kp} = 496,4$
Вагоны грузовые 4-осные на роликовых подшипниках с массой на ось ва-	$m_{_{\rm BO}} = 20$
гона, т	- BO — -

После подстановки величин в расчетную формулу получим выражение для определения максимальной массы состава вагонов грузового поезда по условиям движения с установившейся расчетной скоростью для звеньевого пути:

$$m_{\rm c} = \frac{496400 - 276 \cdot 9,81 \cdot (2,317 + i)}{9,81 \cdot (1,044 + i)}.$$
 (16)

На рисунке 3 и 4 показана зависимость максимальной массы состава вагонов грузового поезда по разным условиям движения от крутизны подъемов і для звеньевого пути.

На рисунке 5 показана зависимости максимальной массы состава вагонов грузового поезда при движении на подъемах разной крутизны і с установившейся скоростью локомотивов 2ЭС5К и 2ТЭ116.

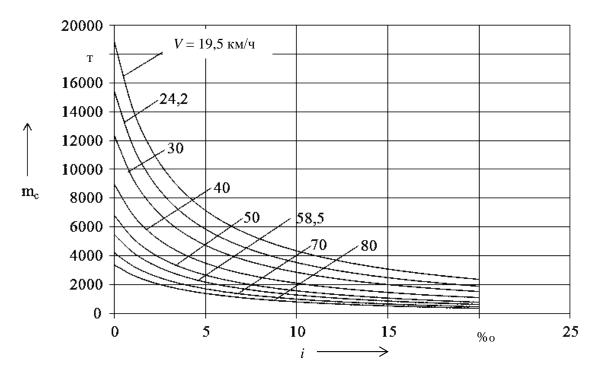


Рисунок 3 — Зависимости максимальной массы состава вагонов грузового поезда с тепловозами 2ТЭ116 по условиям трогания и разгона при различной крутизне подъема i

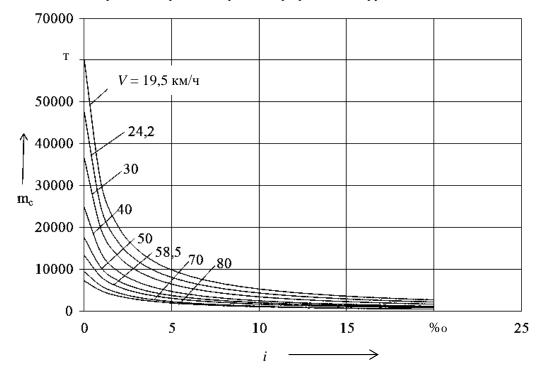


Рисунок 4— Зависимости максимальной массы состава вагонов грузового поезда с тепловозами 2ТЭ116 по условиям движения с установившей при различной крутизне подъема *i* 

Поэтому при увеличении массы поезда производительность локомотива, т. е. его эффективность использования, возрастает в большей степени. Следовательно, становится больше пропускная способность полигона, не требуется вкладывать дополнительные

средства в развитие путей на станциях и перегонах, и это тоже дает значительный экономический эффект.

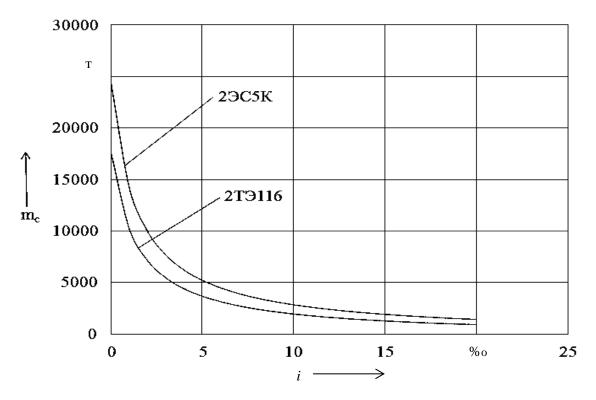


Рисунок 5 — Зависимости максимальной массы состава вагонов грузового поезда с локомотивами 2ЭС5К и 2ТЭ116 по условиям движения с установившейся скоростью V = 50 км/ч при разной крутизне подъема i

#### Список литературы

- 1. Осипов, С. И. Теория электрической тяги [Текст] / С. И. Осипов, С. С. Осипов, В. П. Феоктистов. М.: Маршрут, 2006. 434 с.
- 2. Правила тяговых расчетов для поездной работы [Текст] / П. Т. Гребенюк, А. Н. Долганов и др. М.: Транспорт, 1985. 287 с.

#### References

- 1. Osipov S. I., Osipov S. S., Feoktistov V. P. *Teoriya elektricheskoi tyagi* (Theory of electric traction). Moscow: Marshrut, 2006, 434 p.
- 2. Grebenyuk P. T., Dolganov A. N., Nekrasov O. A., Lisitsyn A. L., Stromsky P. P., Borovikov A. P., Chukova T. S. *Pravila tyagovih raschetov dlya poezdnoi raboty* (Rules of traction calculations for train operation). Moscow: Transport, 1985, 287 p.

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

#### Алтангэрэл ЭНХ-АМГАЛАН

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

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

Тел.: (+976) 99192520.

E-mail: amgaa\_02\_03@yahoo.com

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

#### Altangerel ENKH-AMGALAN

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Post-graduate student of the department «Rolling stock of electric railways», OSTU.

Phone: (+976) 99192520.

 $E\text{-mail: amgaa\_}02\_03@yahoo.com$ 

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

ЭНХ-АМГАЛАН Алтангэрэл. Обоснование выбора серии электровоза для Улан-баторской железной дороги [Текст] / Алтангэрэл ЭНХ-АМГАЛАН // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. — Омск. — 2016. — 2(26). — 0.10.

#### BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

ENKH-AMGALAN Altangerel Rationale for selection series electric lovomotives ulaanbaatar railway. Journal of Transsib Railway Studies, 2016, vol. 26, no. 2, pp. 10-18. (In Russian).

УДК 625.144.5: 625.173.2/5

#### С. В. Базилевич<sup>1</sup>, В. А. Глотов<sup>2</sup>, А. В. Зайцев<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС), г. Омск, Российская Федерация, <sup>2</sup>Сибирский государственный университет путей сообщения (СГУПС), г. Новосибирск, Российская Федерация

# ОБОСНОВАНИЕ ПРИМЕНЕНИЯ ПЛАНИРОВЩИКА ОТКОСОВ БАЛЛАСТНОЙ ПРИЗМЫ В ТЕХНОЛОГИЧЕСКОМ ПРОЦЕССЕ МОДЕРНИЗАЦИИ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ПУТИ

**Аннотация.** Разработана конструкция рабочего органа планировщика откосов для выправочно-подбивочно-отделочной машины ВПО-3000.

На основе проведенного анализа существующих конструкций планировщиков балласта путевых машин (ВПО-3000, СЗП-600Р, ПБ-01, СС-3, ЭЛБ-3МК, ЭЛБ-4К), находящихся в эксплуатации на сети Западно-Сибирской железной дороги, выбран наиболее подходящий аналог — плуг машины СЗП-600Р. В предлагаемом проекте конструкция всех структурных элементов плуга СЗП-600Р была изменена с учетом требуемых траекторий движения планировщика откосов и его геометрической компоновки на машине ВПО-3000, а также с учетом требований, предъявляемых к конструкции и состоянию верхнего строения пути, в частности, щебеночной балластной призмы, после проведения работ по ее очистке щебнеочистительной машиной СЧ-600.

Выбор геометрических параметров и расчет конструкции элементов планировщика откосов выполнены с применением программы APMWinMashin согласно реальным условиям эксплуатации и действующим нагрузкам, в частности:

стрела с плугом находится в рабочем положении и осуществляет срезание и сдвижку неочищенного балласта за опоры контактной сети;

стрела раскрыта на максимальный угол  $\varphi$ ; плуги не раскрываются и располагаются вдоль оси стрелы.

Разработанная конструкция планировщика откосов позволяет производить удаление загрязненного участка балластной призмы от железнодорожного пути и другие операции по планированию откосов призмы.

Предлагаемый проект усовершенствования машины ВПО-3000 позволяет исключить из технологического процесса модернизации железнодорожного полотна дополнительную машину по удалению загрязненного участка балластной призмы, что обеспечивает снижение себестоимости производимых работ.

**Ключевые слова:** железнодорожный путь, путевые машины, выправочно-подбивочно-отделочная машина, планировщик откосов, балластная призма, модернизация железнодорожного полотна, снижение себесто-имости производимых работ.

### Svetlana V. Bazilevich<sup>1</sup>, Victor A. Glotov<sup>2</sup>, Alexander V. Zaytsev<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Omsk State Transport University (OSTU), Omsk, the Russian Federation, <sup>2</sup>Siberian State Transport University (SSTU), Novosibirsk, the Russian Federation

# JUSTIFICATION OF SCHEDULER SLOPES THE BALLAST TECHNOLOGICAL PROCESS MODERNIZATION RAILWAY TRACK

Abstract. The design of the working body planner slopes for liner-tamping-finishing machine VPO-3000.

Based on the analysis of existing designs of planners ball-fin track machines (VPO-3000, SZP-600R, PB-01, SS-3, ELB-3MK, ELB-4K), finding to operate on a network of West-Siberian Railway selected under the most-walked analogue – plow machine SZP-600r. The proposed project design of all structural elements of the plow SZP-600R has been

changed in view of the desired trajectories scheduler slopes and its geometrical layout on the machine VPO-3000, as well as taking into account the requirements of the design and of top-Story-of way, in particular gravel ballast, after work on her cleaning ballast cleaner MF-600.

The selection of geometric parameters and the calculation of design elements scheduler slopes are made using APM WinMashin programs according to the real conditionscess of the load operation and, in particular:

arrow with the plow is in working position and performs cutting and Zdzvizhkou crude ballast for support of contact network;

arrow disclosed at the maximum angle  $\varphi$ ; plows are not disclosed and are located along the axis of the boom.

The developed design planner slopes allows removal of contaminated ballast portion of the railway line, as well as other operators, radio planning prism slopes.

The proposed project will improve the machine VPO-3000 allows the excluded-tained from the technological process of modernization of railroad tracks Add-tional machine to remove the contaminated site ballast, which reduces the cost of performing the work.

**Keywords:** railway, track machines, straightening – tamping – finishing machine, planner slopes. Ballast prism, modernization of the railway, reducing the cost of work performed.

Балластная призма железнодорожного пути предназначена для восприятия, упругой переработки и передачи на земляное полотно динамического давления от колес подвижного состава. В процессе эксплуатации происходит постепенное засорение балластной призмы сыпучими грузами с проходящих поездов, мелкими фракциями грунта и мелкими частицами щебня при его разрушении под воздействием поездной нагрузки. При этом балластная призма теряет свои первоначальные свойства, ухудшается ее дренирующая способность.

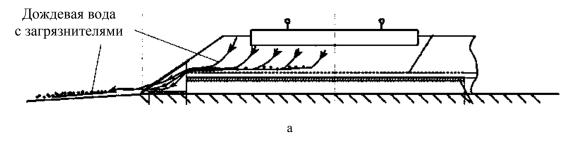
Необходимо своевременно производить очистку щебня либо его замену. Для этих целей существуют специальные щебнеочистительные машины (СЧ-600, СЧ-601, RM-80, RM-2002 и т. д.) [1]. При ремонте пути с сохранением разделительного слоя балластной призмы – дорогостоящего геотекстиля и пенополистирола, уложенных ранее, щебнеочистительными машинами загрязненный щебень вынимается из верхней части призмы (на высоте 5 – 7 см над разделительным слоем) [6, 7]. Рабочая площадка пути планируется таким образом, чтобы разделительный слой был несколько выше, чем планируемая обочина. Это обеспечивает вымывание дождевой водой, просачивающейся через очищенную призму, вновь попадающих засорителей (рисунок 1, а).

По данным дирекции по ремонту пути Западно-Сибирской железной дороги в настоящее время начальная загрязненность щебеночного балласта по весу при укладке в путь составляет 10 %. Это обусловлено не только наличием некоторого количества засорителей во вновь отсыпаемом щебне, а в основном остатками неочищенного щебня в балластной призме. Так, после прохода щебнеочистительной машины остается неочищенным участок (валик) с полевой стороны призмы (рисунок 1, б), препятствующий оттоку воды, что негативно сказывается на состоянии призмы в целом.

Штатный планировщик откосов, устанавливаемый на выправочно-подбивочноотделочной машине ВПО-3000 [2, 3], не может обеспечить срезание и сдвиг на обочину неочищенного участка балластной призмы, а использование совместно с ВПО-3000 машины, обеспечивающей данные операции, является довольно затратным, а иногда и трудновыполнимым из-за разноподчиненности данных типов машин. Таким образом, возникла необходимость в разработке планировщика откосов балластной призмы для использования его в технологическом процессе модернизации железнодорожного пути с целью обеспечения снижения себестоимости производимых работ и увеличения срока службы балласта.

В 2015 г. дирекцией по ремонту пути Западно-Сибирской железной дороги кафедре «Подъемно-транспортных, путевых, строительных и дорожных машин» СГУПСа было предложено разработать проект нового планировщика откосов и его установки на машину ВПО-3000.

На основе проведенного анализа существующих конструкций планировщиков балласта действующих путевых машин (ВПО-3000, СЗП-600Р, ПБ-01, СС-3, ЭЛБ-3МК, ЭЛБ-4К) выбран наиболее подходящий аналог – плуг машины СЗП-600Р (рисунок 2).



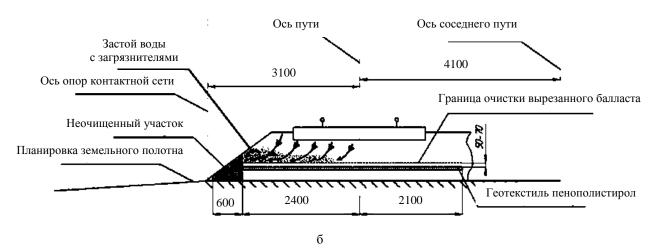


Рисунок 1 – Поперечный разрез балластной призмы: а – нормальный отток дождевой воды; б – застой воды при наличии неочищенного участка

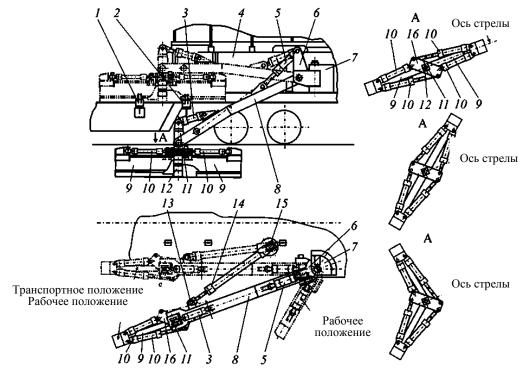


Рисунок 2 – Планировочный плуг СЗП-600Р: 1 и 2 – транспортные упоры; 3 и 5 – гидроцилиндры наклона отвалов и балки; 4 – корпус машины; 6, 7 и 11 – корневой, опорный и нижний поворотный кронштейны; 8 – балка; 9 – поворотные отвалы; 10 – гидроцилиндры поворота отвалов; 12 – петлевой шарнир соединения отвалов; 13, 15 – универсальные шарнирные узлы; 14 – гидроцилиндр поворота балки в плане; 16 – упор

В предлагаемом проекте конструкция всех структурных элементов плуга СЗП-600Р была изменена с учетом требуемых траекторий движения планировщика откосов и его местоположения на машине ВПО-3000 (рисунок 3).

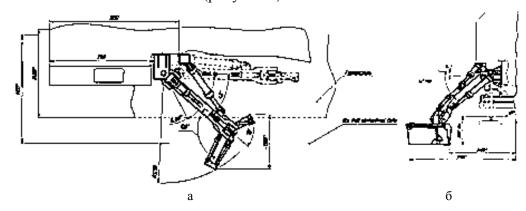


Рисунок 3 — Рабочее положение планировщика при удалении неочищенного участка: a-в плане; b-c торца машины

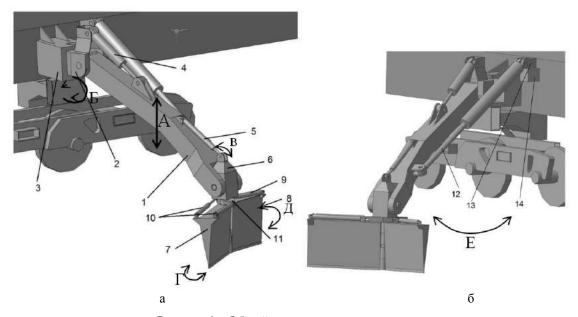


Рисунок 4 – Общий вид планировщика откосов

Разработанный планировщик (рисунок 4) состоит из стрелы 1, которая через ось закреплена в кронштейне 2 и имеет возможность подъема и опускания (направление A) с помощью гидроцилиндра 4. Кронштейн 2 также посредством оси закреплен в опоре 3 и имеет возможность поворачиваться в горизонтальной плоскости (направление Б) гидроцилиндром 12, тем самым обеспечивая необходимый угол раскрытия стрелы (направление Е). Опора 3 закреплена неподвижно на ферме машины посредством сварки. На конце стрелы расположен кронштейн 6, который имеет возможность поворота в вертикальной плоскости (направление В) с помощью гидроцилиндра 5. К нижней части кронштейна приварена соединительная плита 11. В нижней части этой плиты имеется отверстие для закрепления оси, на которой располагается правая часть плуга 8 и левая 7. Правая часть поворачивается вокруг оси (направление Д) с помощью гидроцилиндра 9, а левая – с помощью двух гидроцилиндров 10 (направление Г). Гидроцилиндр 12 корпусом закреплен в поворотном кронштейне 13, который через ось закреплен в опоре 14, расположенной на ферме машины.

Стрела (рисунок 5, а) спроектирована из условий обеспечения необходимого вылета относительно продольной оси пути и необходимого заглубления относительно уровня головки рельса. Стрела имеет сварную конструкцию, в сечении имеет форму квадратной

трубы, что обеспечивает ее достаточную прочность под действием нагрузок и отсутствие чрезмерных деформаций.

Плуг (рисунок 5, б) предназначен для резания балласта и его сдвига. Одна часть плуга имеет меньшую длину, что обеспечивает его вписывание при транспортном положении в имеющуюся нишу на раме машины (рисунок 6).

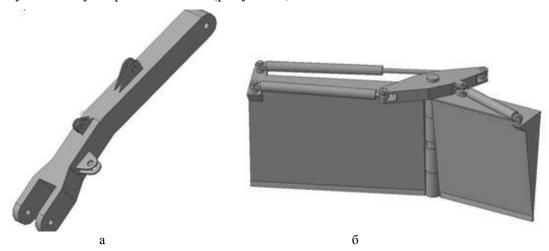


Рисунок 5 – Элементы планировщика: а – стрела; б – плуг

Обе части плуга имеют высоту 750 мм, что вполне достаточно для решаемой нами задачи. Длина меньшей части плуга составляет 780 мм, длина большей – 1200 мм. В сечении плуги имеют форму треугольника. С торца большей части плуга имеется два выступающих кронштейна для закрепления на них гидроцилиндров поворота плуга, а с торца меньшей части – один кронштейн.

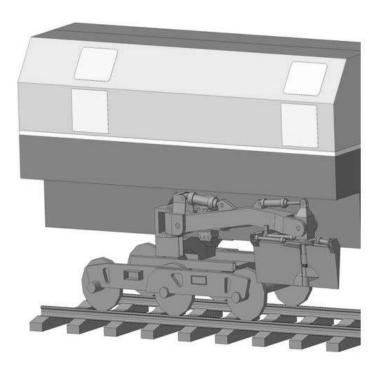


Рисунок 6 – Транспортное положение планировщика

Были рассмотрены два случая нагружения плуга:

стрела с плугом находится в рабочем положении и осуществляет срезание и сдвижку неочищенного балласта за опоры контактной сети (рисунок 7, a);

стрела раскрыта на максимальный угол  $\phi$ ; плуги не раскрываются и располагаются вдоль оси стрелы (рисунок 7,  $\delta$ ).

На основе рассмотренных схем нагружения установлено, что максимальные нагрузки планировщика возникают при максимальном раскрытии стрелы (см. рисунок 7, б). По нагрузкам данного рабочего состояния было произведено определение напряжений и деформаций, возникающих в различных элементах конструкции (стрела (рисунок 8, а), кронштейны, плуги (рисунок 8, б), опоры на основе их трехмерных моделей, созданных в программном комплексе APM WinMashin (модули Studio и Structure 3D). По результатам расчетов внесены необходимые изменения в конструкцию отдельных элементов для обеспечения требуемых параметров прочности и жесткости [8, 10].

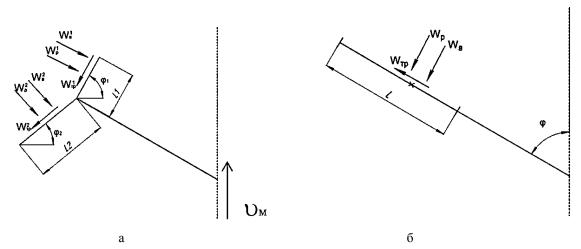
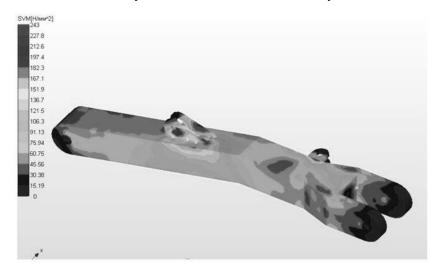


Рисунок 7 – Расчетные положения плуга



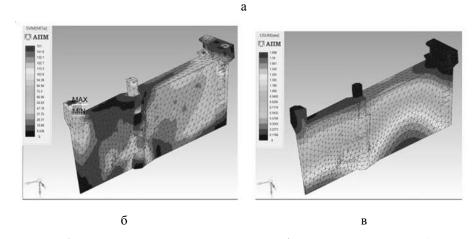


Рисунок 8 – Карты распределения напряжений и деформаций: a – b стреле; b, b – b плуге

Исходя из максимальных действующих нагрузок произведено определение силовых и мощностных параметров элементов гидропередачи и разработана ее принципиальная схема.

Установлено, что мощности энергетической установки машины ВПО-3000 достаточно для обеспечения одновременной работы двух планировщиков откосов (с каждой стороны машины) в режиме работы машины по разуплотнению балласта (требуемая мощность -110 кВт, при свободной -170 кВт).

Разработанная конструкция планировщика откосов позволяет производить удаление загрязненного участка балластной призмы (после прохода щебнеочистительной машины) на необходимое удаление (рисунок 9) от железнодорожного пути (за пределы контактной сети), что приведет к уменьшению начальной загрязненности щебеночного балласта (по весу) до 5 %, соответствующей техническим требованиям норм содержания железнодорожного пути [9].

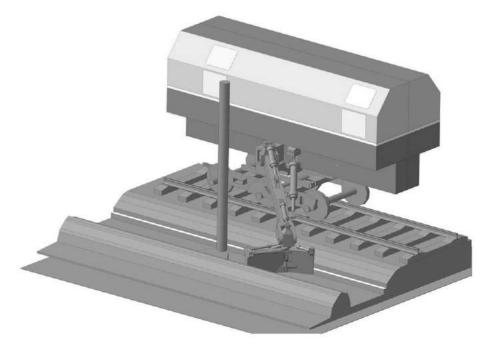


Рисунок 9 – Удаление неочищенного участка балластной призмы модернизированной машиной ВПО-3000

Срок службы балласта [9]

$$T_{6} = \frac{D - d}{cT_{\Gamma}} \tag{1}$$

где D=40 % — максимально допустимая степень загрязнения щебеночного балласта перед очисткой или заменой;  $T_{\Gamma}$  — грузонапряженность, млн ткм (брутто)/км в год; c — интенсивность загрязнения и засорения щебеночного балласта, процент по весу за период перевозки по пути 1 млн т грузов (брутто) (таблица 1).

Таблица 1 — Примерные значения интенсивности загрязнения и засорения щебеночного балласта c, процент по весу

Род балласта, тип рельсов	Число шпал на 1 км пути	Расстояние от мест погрузки сыпучих грузов, км		
		более 200	200 – 100	менее 100
Щебеночный балласт с рельсами Р65	1840	0,18	0,23	0,38

В таблице 2 представлены результаты расчета по формуле (1) срока службы балласта  $T_6$  в зависимости от группы пути по грузонапряженности до применения планировщика балласта на машине ВПО-3000 и после его установки для расстояния от мест погрузки сыпучих грузов более 200 км.

Таблица 2 — Данные расчета по формуле (1) срока службы балласта  $T_6$  в зависимости от группы пути по грузонапряженности до применения планировщика балласта на машине ВПО-3000 и после его установки для расстояний от мест погрузки сыпучих грузов более 200 км

		Срок службы балласта $T_6$ , годы		
Группа пути	Грузонапряженность $T_{ m r}$ , млн ткм бругто/ км в год	до применения планировщика балласта на машине ВПО	после установки планировщика бал-ласта на машине ВПО-3000	увеличение срока службы балласта, %
A	Более 80	до 2,08	до 2,43	16,8
Б	51 - 80	2,083,26	2,433,81	16,816,9
В	26 - 50	3,336,41	3,887,48	16,516,7
Γ	11 - 25	6,6615,1	7,7817,7	16,817,1
Д	6 – 10	16,727,8	19,432,4	16,7

Расчетная себестоимость [5, 6] модернизации машины ВПО-3000, включающая в себя проектирование, изготовление планировщика откосов и его монтаж на машину взамен штатного планировщика, составила 132,3 тыс. р. Экономический эффект с учетом выполнения операций по разуплотнению балласта и удалению загрязненного участка балластной призмы одной машиной ВПО-3000 (без привлечения машины СЗП-600Р) составил 1300 тыс. р./год, что обеспечивает окупаемость модернизации за один год.

Разработанная конструкция планировщика откосов на базе машины ВПО-3000 позволяет исключить из технологического процесса модернизации железнодорожного полотна дополнительную машину по удалению загрязненного участка балластной призмы, что обеспечивает снижение себестоимости производимых работ и увеличивает срок службы балласта на 16.5-17.1~% при расстоянии от мест погрузки сыпучих грузов более  $200~\rm km$ .

#### Список литературы

- 1. Путевые машины. Полный курс: Учебник [Текст] / Под ред. М. В. Поповича, В. М. Бугаенко. M., 2009. 860 с.
- 2. Альбом чертежей выправочно-подбивочной отделочной машины ВПО-3000 [Текст]. М., 1973. T. 1 4.
- 3. Гальперин, М. И. Строительные машины [Текст] / М. И. Гальперин, Н. Г. Домбровский. М., 1990.-170 с.
- 4. Ревдов, Н. И. Расчет экономической эффективности путевых машин [Текст] / Н. И. Ревдов. М., 1995. 174 с.
- 5. Глотов, В. А. Обоснование применения путевой снегоуборочной машины ПСМ-С для очистки станционных путей от снега [Текст] / В. А. Глотов, А. В. Зайцев // Экономика железных дорог. -2013. -№ 7. С. 85 89.
- 6. Зайцев, А. В. Использование рабочего органа с горизонтальными роторами на щебнеочистительной машине [Текст] / А. В. Зайцев, В. Н. Анферов // Экономика железных дорог. 2013. № 5. С. 68 75.
- 7. Зайцев, А. В. Обоснование применения рабочего органа с горизонтальными роторами на щебнеочистительных машинах СЧ-601[Текст] / А. В. Зайцев, В. Н. Анферов // Вестник Сибирского гос. ун-та путей сообщения.  $-2014.- \mathbb{N} 20.- \mathbb{C}$ . 55-59.
- 8. Базилевич, С. В. Организационно-технологические показатели эксплуатации выправочно-подбивочно-рихтовочных машин циклического действия [Текст] / С. В. Базилевич, А. В. Зайцев, С. М. Кузнецов // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. Омск. 2015. № 2. С. 115 122.
- 9. Басилов, В. В. Справочник инженера-путейца. [Текст] / В. В. Басилов, М. А. Чернышев. М.: Транспорт, 1972. 520 с.
- 10. Базилевич, С. В. Модели показателей эксплуатации выправочно-подбивочно-рихтовочных машин ВПР-02 и ВПРС-02 [Текст] / С. В. Базилевич, А. В. Зайцев, С. М. Кузне-

цов // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. — Омск. — 2015. — № 3. — С. 109 - 118.

#### References

- 1. Popovich M. V., Bugaenko V. M., Volkovoynov B. G. *Putevyye mashiny* (Etalon Track machines). Moscow, 2009, 860 p.
- 2. Al'bom chertezhey vypravochno-podbivochnoy otdelochnoy mashiny VPO-3000 (The album of drawings liner-tamping finisher VPO-3000). Moscow, 1973, T. 1-4.
- 3. Halperin M. I., Dombrowski N. G. *Stroitel'nyye mashiny* (Construction machinery). Moscow, 1990, 170 p.
- 4. Revdov N. I. *Raschet ekonomicheskoy effektivnosti putevykh mashin* (The calculation of the economic efficiency of traveling cars). Moscow, 1995, 174 p.
- 5. Glotov V. A., Zaitsev A. V. Rationale for the use of track snowplow PSM-C for the treatment of station tracks from snow [Obosnovaniye primeneniya putevoy snegouborochnoy mashiny PSM-S dlya ochistki stantsionnykh putey ot snega]. *Ehkonomika zheleznyh dorog Economy railways*, 2013, no. 7, pp. 85 89.
- 6. Zaitsev A. V., Anferov V. N. Using the working body with horizontal axis on the ballast cleaner [Ispol'zovaniye rabochego organa s gorizontal'nymi rotorami na shchebneochistitel'noy mashine]. *Ehkonomika zheleznyh dorog Economy railways*, 2013, no. 5, pp. 68 75.
- 7. Zaitsev A. V., Anferov V. N. Rationale for the use of the working body with horizontal axis on the ballast cleaner SCH-601 [Obosnovaniye primeneniya rabochego organa s gorizontal'nymi rotorami na shchebneochistitel'nykh mashinakh SCH-601]. *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo universiteta putey soobshcheniya Bulletin of the Siberian state University of means of communication*, 2014, no. 30, pp. 55 59.
- 8. Bazilevich S. V., Zaitsev A. V., Kuznetsov S. M. Organizational and technological parameters of operation of the liner-tamping-straightening machines cyclic action [Organizacionno–tehnologicheskie pokazateli ekspluatacii vipravochno-podbivochno-rihtovochnih mashin ciklicheskogo deistviya]. *Izvestiia Transsiba The journal of Transsib Railway Studies*, 2015, no. 2 (22), pp. 115 122.
- 9. Basilov V. V., Chernyshev M. A. *Spravochnik inzhenera-puteytsa* (Reference railway engineer). Moscow, 1972, T. 2, 520 p.
- 10. Bazilevich S. V., Zaytsev A. V., Kuznetsov S. M. Model performance liner-tamping-straightening machines VPR-02 and VPRS-02 [Modeli pokazatelei ekspluatacii vipravochno-podbivochno-rihtovochnih mashin VPR-02 i VPRS-02]. *Izvestiia Transsiba The journal of Transsib Railway Studies*, 2015, no. 3 (23), pp. 109 118.

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

#### Базилевич Светлана Викторовна

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Менеджмент, маркетинг и коммерция», ОмГУПС.

E-mail: bcv65@mail.ru

#### Глотов Виктор Анатольевич

Сибирский государственный университет путей сообщения (СГУПС).

Дуси Ковальчук ул., 191, г. Новосибирск, 630049, Российская Федерация.

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Подъемно-транспортные, путевые, строительные и дорожные машины», СГУПС.

E-mail: v.glotov@ngs.ru

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

#### Bazilevich Svetlana Viktorovna

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Ph. D. in Engineering, Associate Professor of the department «Management, marketing and commerce», OSTU.

E-mail: bcv65@mail.ru

#### **Glotov Victor Anatolyevich**

Siberian State Transport University (SSTU).

191, Dusi Kovalchuk st., Novosibirsk, 630049, the Russion Federation.

Ph. D. in Engineering, Associate Professor of the department «Lifting-transport, travel, construction and road machines», SSTU.

E-mail: v.glotov@ngs.ru

#### Zaytsev Alexander Vasilyevich

Siberian State Transport University (SSTU).

#### Зайцев Александр Васильевич

Сибирский государственный университет путей сообщения (СГУПС).

Дуси Ковальчук ул., 191, г. Новосибирск, 630049, Российская Федерация.

Старший преподаватель кафедры «Подъемнотранспортные, путевые, строительные и дорожные машины», СГУПС.

E-mail: zaitsev.zaw@yandex.ru

# 191, Dusi Kovalchuk st., Novosibirsk, 630049, the Russion Federation.

Engineer Master, senior Lecturer of the «Lifting-transport, travel, construction and road machines», SSTU.

E-mail: zaitsev.zaw@yandex.ru

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Базилевич, С. В. Обоснование применения планировщика откосов балластной призмы в технологическом процессе модернизации железнодорожного пути [Текст] / С. В. Базилевич, В. А. Глотов, А. В. Зайцев // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. — Омск. — 2016. — N 2 (26). — C. 18 — 27.

#### BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Bazilevich S. V., Glotov V. A., Zaytsev A. V. Justification of scheduler slopes the ballast technological process modernization railway track. Journal of Transsib Railway Studies, 2016, vol. 26, no. 2, pp. 18-27. (In Russian).

УДК 629.4; 534-16; 62.752; 621:534;833; 888.6

#### С. В. Елисеев, А. П. Хоменко

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

#### ФОРМЫ СОВМЕСТНЫХ ДВИЖЕНИЙ ЭЛЕМЕНТОВ ТРЕХМАССОВОЙ КОЛЕБАТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ: ВЛИЯНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ЖЕСТКОСТЕЙ

Аннотация. Предлагается метод оценки динамических свойств механических колебательных систем с несколькими степенями свободы. Метод основан на преобразованиях характеристического частотного уравнения системы. Для преобразований вводятся понятия динамических жесткостей по отношению к отдельным элементам, их блокам и системы в целом. Преобразование характеристического частотного уравнения производится при использовании понятия об обобщенной парциальной системе. Такая система представляет собой последовательное соединение двух парциальных систем обычного вида. В результате преобразований характеристическое частотное уравнение интерпретируется как сумма динамических жесткостей, равная нулю. В физическом смысле это означает, что суммирование предполагает приведение жесткостей отдельных элементов и блоков к некоторой опорной базе, которой выступает парциальная система с приложенным к ней внешним возмущением. Использование метода ориентировано на задачи управления динамическим состоянием объекта с одной степенью свободы, в частности, для решения задач вибрационной защиты. Обосновано введение квазипружин как некоторых структур в составе системы, которые могут иметь положительную, нулевую и отрицательные жесткости на определенных частотах внешнего воздействия. Показано, что режим резонансных явлений может рассматриваться как особенность поведения системы при действии гармонического возмущения и нулевой динамической жесткости системы в целом.

Фрагменты системы квазипружины в частности также могут обладать нулевой жесткостью, что проявляется через особенности совместных движений элементов системы.

Результаты исследований подтверждаются вычислительным моделированием, приводятся графики частотных зависимостей для отношений координат движения. Получен ряд аналитических соотношений для определения частот граничных условий перехода к различным режимам. Для оценки динамических свойств используются структурные математические модели и правила их преобразования.

**Ключевые слова:** обобщенные парциальные системы, межпарциальные связи, динамическая жесткость, квазипружины.

#### Sergey V. Eliseev, Andrey P. Khomenko

Irkutsk State Transport University (ISTU), Irkutsk, the Russian Federation

# FORMS OF JOINT MOTION OF ELEMENT OF THREE-MASS OSCILLATING SYSTEM: INFLUENCE OF DYNAMIC STIFFNESS

**Abstract.** The method of an assessment of dynamic properties of mechanical oscillatory systems with several degrees of freedom is offered. The method is based on transformations of the characteristic frequency equation of system.

For transformations concepts of dynamic rigidity in relation to separate elements, their blocks and systems in general are entered. Transformation of the characteristic frequency equation is made when using concept about the generalized partial system. Such system represents serial connection of two partial systems of a normal look. As a result of transformations the characteristic frequency equation is interpreted as the sum of dynamic rigidity equal to zero. In physical terms, this means that the sum involves bringing the stiffness of individual elements and blocks to a supporting base, which acts as a partial system attached to it an external perturbation. Use of a method is oriented to problems of management of a dynamic condition of object with one degree of freedom, in particular, for the solution of problems of vibration protection. Introduction of quasi-springs as some structures as a part of system which can have positive, zero and negative rigidity at certain frequencies of external influence is proved. It is shown that the mode of the resonant phenomena can be considered as feature of behavior of system at action of harmonious oscillations and zero dynamic rigidity of system in general.

Fragments of system, quasi-spring, in particular, can also possess zero rigidity that is shown through features of joint movements of elements of system.

Results of researches are confirmed by computing modeling; schedules of frequency dependences for the relations of coordinates of the movement are provided. A number of analytical ratios for determination of frequencies of boundary conditions of transition to the different modes is received. For an assessment of dynamic properties structural mathematical models and rules of their transformation are used.

Keywords: generalized partial system, inter-partial ties, dynamic rigidity, quasi-springs.

Совместные движения элементов механических колебательных систем определяют специфику их динамических свойств, которая проявляется не только при собственных колебаниях в главных формах, но и в таких режимах, как динамическое гашение колебаний, резонансы и др. Исследование таких процессов связано с оценкой и изучением особенностей формирования совместных движений элементов, проявляющихся через распределение амплитуд колебаний элементов систем с учетом эффектов образования узлов и «пучностей», характерных для систем с распределенными параметрами, что нашло отражение в работах [1, 2]. Вместе с тем аналогичные эффекты проявляются и в системах с сосредоточенными параметрами, в частности, в механических цепях, что представляет интерес в плане усовершенствования и развития методических основ определения динамических реакций, возникающих в специфичных формах совместных движений элементов. Такие подходы создают возможности исследований и оценок, связанных с распределением энергетических потоков, выявлением условий концентрации напряжений и др.

Многие вопросы динамики взаимодействия элементов механических колебательных систем еще не получили должной степени детализации физических представлений. К числу таких вопросов относятся особенности совместных движений элементов и их самоорганизация в различных формах ее проявления.

В предлагаемой статье рассматриваются вопросы формирования динамических жесткостей в различных точках механических систем с несколькими степенями свободы в связи с возможностями определения условий совместных движений нескольких соединенных между собой элементов системы при гармонических внешних воздействиях.

Совместные формы движения элементов механических систем характерны для многих задач динамики машин, в частности, для задач вибрационной защиты различных технических объектов [3-5].

Рассмотрим в качестве исходной расчетную схему виброзащитной системы (ВЗС) в виде механической колебательной системы с тремя степенями свободы (рисунок 1, а). Система совершает малые колебания относительно положения устойчивого равновесия под действием гармонических сил  $Q_1$ ,  $Q_2$ ,  $Q_3$ . Предполагается, что силы  $Q_1$ ,  $Q_2$ ,  $Q_3$  приложены к массоинерционным элементам  $m_1$ ,  $m_2$ ,  $m_3$ . Механическая цепь формируется с помощью соединительных элементов – пружин с жесткостями  $k_1$ ,  $k_2$ ,  $k_3$ ,  $k_4$ ,  $k_5$ . Для описания движений используется система координат  $y_1$ ,  $y_2$ ,  $y_3$ , связанная с неподвижным базисом. Для составления математической модели применяются обычные методы, основанные на использовании уравнения Лагранжа 2-го рода, что характерно для методов структурного математического моделирования [3, 5]. На рисунке 1, б представлена структурная схема системы, использование ко-

торой дает возможность детализации представлений о связях между элементами и определения необходимых передаточных функций систем.

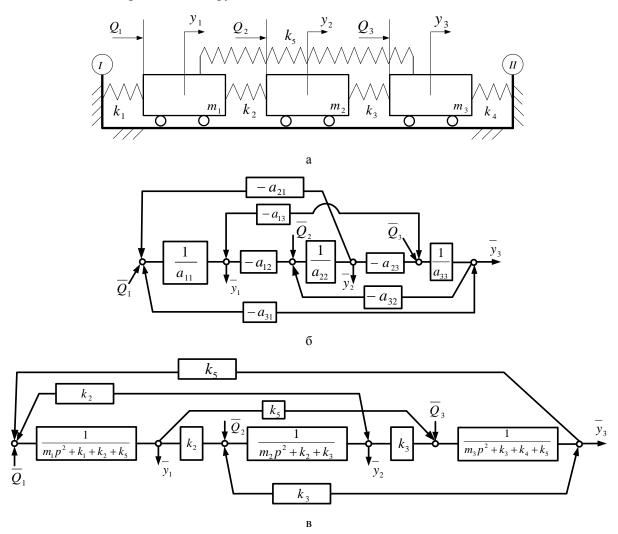


Рисунок 1 — Расчетная (a), структурная ( $\delta$ ) и детализированная ( $\epsilon$ ) схемы механической колебательной системы с тремя степенями свободы ( $p = j\omega$  — комплексная переменная, значок «—» означает изображение по Лапласу [3])

Математическая модель представляет собой, как это следует из описания, систему трех обыкновенных линейных дифференциальных уравнений с постоянными коэффициентами. В таблице приведены соответствующие коэффициенты уравнений в координатах  $y_1$ ,  $y_2$ ,  $y_3$ .

Система коэффициентов уравнений движения в координатах  $y_1, y_2, y_3$ 

$a_{11}$	$a_{12}$	$a_{13}$
$m_1p^2 + k_1 + k_2 + k_5$	$-k_2$	$-k_5$
$a_{21}$	$a_{22}$	$a_{23}$
$-k_2$	$m_2p^2 + k_2 + k_3$	$-k_3$
$a_{31}$	$a_{32}$	$a_{33}$
$-k_5$	$-k_3$	$m_3p^2 + k_3 + k_4 + k_5$
$Q_1$	$Q_2$	$Q_3$

Связи между переменными  $y_1$ ,  $y_2$ ,  $y_3$  и  $Q_1$ ,  $Q_2$ ,  $Q_3$  в операторной форме могут быть представлены в виде следующих выражений:

$$\overline{y}_{1} = \frac{\overline{Q}_{1}(a_{22}a_{33} - a_{23}a_{32}) + \overline{Q}_{2}(a_{13}a_{32} - a_{33}a_{12}) + \overline{Q}_{3}(a_{12}a_{23} - a_{13}a_{22})}{A_{0}};$$
(1)

$$\overline{y}_{2} = \frac{\overline{Q}_{1}(a_{23}a_{31} - a_{31}a_{33}) + \overline{Q}_{2}(a_{11}a_{33} - a_{13}a_{31}) + \overline{Q}_{3}(a_{13}a_{21} - a_{11}a_{23})}{A_{0}};$$
(2)

$$\overline{y}_{3} = \frac{\overline{Q}_{1}(a_{21}a_{32} - a_{22}a_{31}) + \overline{Q}_{2}(a_{12}a_{31} - a_{11}a_{32}) + \overline{Q}_{3}(a_{11}a_{22} - a_{12}a_{21})}{A_{0}},$$
(3)

где

$$A_0 = a_{11}a_{22}a_{33} - a_{11}a_{23}a_{32} - a_{33}a_{12}a_{21} - a_{22}a_{13}a_{31} + a_{13}a_{21}a_{32} + a_{12}a_{23}a_{31}.$$

$$\tag{4}$$

На основе выражения (4) при  $A_0 = 0$  может быть получено характеристическое уравнение системы (система симметрична:  $a_{12} = a_{21}$ ;  $a_{13} = a_{31}$ ;  $a_{23} = a_{32}$ ). При использовании формул (1) – (3) определяются передаточные функции. Для дальнейшего рассмотрения принято, что на массоинерционные элементы  $m_1$ ,  $m_2$ ,  $m_3$  действуют внешние периодические (гармонические) силы  $Q_1$ ,  $Q_2$ ,  $Q_3$ , но на каждый элемент по отдельности. Совместное действие внешних сил в данном случае не рассматривается.

Задача исследования заключается в разработке метода определения параметров системы, особенностей ее структуры, форм взаимодействия элементов систем и специфических режимов при внешнем силовом возмущении на основе преобразований и трансформации частотного характеристического уравнения.

Метод оценки форм совместных движений элементов цепной системы с тремя степенями свободы.

1. Если внешнее воздействие Q связано с массоинерционным элементом  $m_1$ , то передаточные функции системы (1)-(3) примут вид:

$$W_{1}(p) = \frac{\overline{y}_{1}}{\overline{Q}_{1}} = \frac{a_{22}a_{33} - a_{23}^{2}}{A_{0}};$$

$$(5)$$

$$W_2(p) = \frac{\overline{y}_2}{\overline{Q}_1} = \frac{a_{23}a_{31} - a_{31}a_{33}}{A_0};$$
 (6)

$$W_3(p) = \frac{\overline{y}_3}{\overline{Q}_1} = \frac{a_{12}a_{23} - a_{13}a_{22}}{A_0}.$$
 (7)

2. Для случая  $Q_2 \neq 0$  ( $Q_1 = 0$ ,  $Q_3 = 0$ ) имеем следующие выражения:

$$W_1'(p) = \frac{\bar{y}_1}{\bar{Q}_2} = \frac{a_{13}a_{32} - a_{12}a_{33}}{A_0}; \tag{8}$$

$$W_2'(p) = \frac{\overline{y}_2}{\overline{Q}_2} = \frac{a_{11}a_{33} - a_{13}a_{31}}{A_0}; \tag{9}$$

$$W_3'(p) = \frac{\bar{y}_3}{\bar{Q}_2} = \frac{a_{12}a_{31} - a_{11}a_{32}}{A_0}.$$
 (10)

Выражения (5) - (10) для передаточных функций могут быть также получены на основе преобразований структурной схемы на рисунке 1, 6 [6].

3. В случае действия силы  $Q_3$  на элемент  $m_3$  ( $Q_2=0,\ Q_1=0$ ) соответственно можно получить:

$$W_1''(p) = \frac{\overline{y}_1}{\overline{Q}_3} = \frac{a_{21}a_{32} - a_{22}a_{31}}{A_0};$$
 (11)

$$W_2''(p) = \frac{\overline{y}_2}{\overline{Q}_3} = \frac{a_{32}a_{31} - a_{11}a_{32}}{A_0};$$
 (12)

$$W_{3}''(p) = \frac{\overline{y}_{3}}{\overline{Q}_{3}} = \frac{a_{11}a_{22} - a_{12}^{2}}{A_{0}}.$$
 (13)

4. Для исследований характеристического частотного уравнения (4), учитывая, что возмущение  $Q_1$  будет приложено к элементу  $m_1$ , проведем некоторые преобразования и получим уравнение (4) в виде:

$$a_{11} - \frac{a_{22}a_{31}^2}{[m_2m_3]} - \frac{a_{33}a_{21}^2}{[m_2m_3]} + \frac{2a_{12}a_{23}a_{31}}{[m_2m_3]} = 0.$$
(14)

Уравнение (14), в свою очередь, можно представить так:

$$a_{11} - \frac{a_{31} \left( a_{31} a_{22} - a_{21} a_{23} \right)}{\left[ m_2 m_3 \right]} - \frac{a_{12} \left( a_{12} a_{33} - a_{23} a_{31} \right)}{\left[ m_2 m_3 \right]} = 0, \tag{14'}$$

где

$$[m_2m_3] = a_{22}a_{33} - a_{23}^2 = [m_2p^2 + k_2 + k_3] \cdot [m_3p^2 + k_3 + k_4 + k_5] - k_3^2.$$
 (15)

Структурная схема системы (см. рисунок 1, б) в этом случае трансформируется, что представлено на рисунке 2.

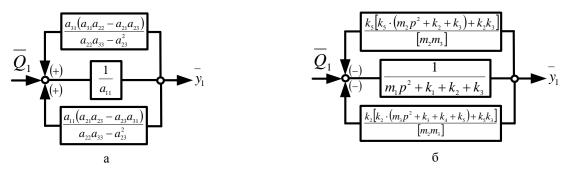


Рисунок 2 — Структурные схемы для варианта действия возмущающей силы  $Q_1$ , приложенной к элементу  $m_1$ : а — обобщенный вид; б — детализированный вид

Для придания решаемым задачам технического содержания будем полагать, что массоинерционный элемент  $m_1$  рассматривается как объект защиты от вибрационных внешних возмущений. На структурной схеме, как показано на рисунке 2, а, объекту защиты будет соответствовать звено с передаточной функцией

$$W_{\text{o6.}}(p) = \frac{1}{a_{11}}. (15')$$

Относительно объекта защиты, как основного элемента структурной модели, могут быть сформированы две цепи обратной связи. Эти цепи отражают действие на объект защиты со стороны системы «в целом» при динамических взаимодействиях элементов, вызванных приложением к объекту силы  $\overline{Q}_1$ .

Элемент с передаточной функцией  $W_{\text{об.}}(p) = \frac{1}{a_{11}}$  может быть представлен в виде:

$$W'_{\text{of.}}(p) = \frac{1}{a_{11}} = \frac{1}{m_1 p^2 + k_1 + k_2 + k_5}.$$
 (16)

В этом случае в рассмотрение вводится парциальная система. Очевидно, что объект защиты, т. е. его свойства, определяются, в соответствующей части, параметрами парциальной системы [7].

5. На рисунке 2, в исходная структурная схема (см. рисунок 2, б) представлена в детализированном виде, что позволяет интерпретировать, в данном случае, объект виброзащиты (парциальная система определяется выражением (16)), обратные цепи на структурной схеме (см. рисунок 2, б) как действие обобщенных пружин (или квазипружин).

Дополнительные обратные цепи, возникающие при преобразованиях исходных систем (рисунок 1, б, в) привносят в такой постановке задачи обратные отрицательные связи. При этом передаточная функция цепи обратной связи в физическом смысле соответствует динамической жесткости квазипружины. В данном случае в структурной математической модели системы, представленной на рисунке 2, а, могут рассматриваться две квазипружины, как показано на рисунке 2, б.

На структурных математических моделях (см. рисунок 2, а, б) показано, что исходная система (см. рисунок 1, б) может быть преобразована и условно приведена к системе с одной степенью свободы. В таком случае имеет смысл выделять базовую систему ( $a_{11} = m_1 p^2 + k_1 + k_2 + k_5$ ), как это показано на рисунке 2, б. Базовая система является парциальной системой, в которой имеются связи с опорной поверхностью ( $k_1$ ) и массоинерционным элементом  $m_3(k_5)$ .

Отметим, что в такой интерпретации определенные части системы (см. рисунок 2, а) могут быть представлены в виде квазипружин с динамическими жесткостями:

$$\bar{k}_{\text{npl}}(p) = \frac{k_5^2 \left[ \left( m_2 p^2 + k_2 + k_3 \right) k_5 + k_2 k_3 \right]}{\left[ m_2 m_3 \right]}; \tag{17}$$

$$\bar{k}_{np2}(p) = \frac{k_2^2 \left[ \left( m_3 p^2 + k_3 + k_4 + k_5 \right) k_2 + k_3 k_5 \right]}{\left[ m_2 m_3 \right]}.$$
(18)

С учетом выражений (17), (18) характеристическое частотное уравнение (14') примет вид:

$$m_1 p^2 + k_1 + k_2 + k_5 - \overline{k}_{np1} - \overline{k}_{np2} = 0.$$
 (19)

Физический смысл характеристического уравнения (14') в форме (19) заключается в том, что сумма динамических жесткостей элементов и фрагментов исходной системы (см. рисунок 1, а), приведенных к точке приложения силы  $Q_1$ , равняется нулю. Отметим также еще одну возможность интерпретации. Поскольку преобразования (14) по существу связаны с исключением координат  $y_2$  и  $y_3$ , то умножение (19) на  $y_1$  позволяет сделать заключение о том, что в точке приведения (точка приложения силы  $Q_1$ ) сумма всех действующих на систему сил, включая силы реакции связей, будет равна нулю. Последнее отражает проявление действия принципа Даламбера [6, 7].

Рассмотрим некоторые подходы к построению математических моделей.

1. Если для упрощения принять  $k_5 = 0$ , что исходную систему, приведенную на рисунке 1, а – в, превращает из замкнутой в цепную систему, то можно ввести в рассмотрение понятие обобщенной парциальной системы. Такая система образуется при остановке движения по координате  $y_1$ . Обобщенная парциальная система приведена на рисунке 3, а, б в виде принципиальной схемы механической колебательной системы (см. рисунок 3, а) и ее структурного аналога (см. рисунок 3, б).

Обобщенная парциальная система представляет собой цепную механическую колебательную систему с кинематическим возмущением в виде координаты  $y_1$ ; в этом случае

$$W_1'(p) = \frac{\overline{y}_2}{\overline{y}_1} = \frac{(m_3 p^2 + k_3 + k_4) \cdot k_2}{[m_2 m_3]};$$
 (20)

$$W_2''(p) = \frac{\overline{y}_3}{\overline{y}_1} = \frac{k_2 k_3}{[m_2 m_3]}.$$
 (21)

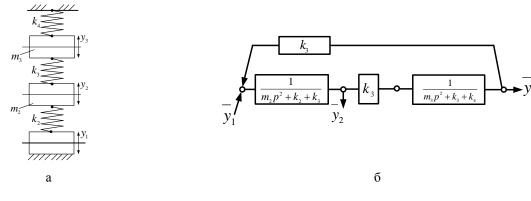


Рисунок 3 – Принципиальная (а) и структурная (б) схемы обобщенной парциальной системы

Парциальная система (см. рисунок 3, а), рассматриваемая отдельно, имеет две частоты «собственных» колебаний, определяемых из уравнения  $[m_2m_3] = 0$ , получаемого из формулы (15). Обозначим эти частоты через  $n'_2$  и  $n'_3$ . Обычная парциальная система при  $a_{11} = 0$  имеет парциальную частоту

$$n_1 = \sqrt{\frac{k_1 + k_2}{m_1}} {.} {(22)}$$

Аналогично, что для других парциальных систем в обычной форме

$$n_2 = \sqrt{\frac{k_2 + k_3}{m_2}}; (22')$$

$$n_3 = \sqrt{\frac{k_3 + k_4}{m_3}} {.} {(22")}$$

Запишем характеристическое уравнение системы «в целом» при  $k_5 = 0$ , используя выражение (19) для динамической жесткости  $k_{\text{пр.2}}(p)$ , поскольку квазипружина имеет непосредственный контакт с массоинерционным элементом  $m_1$ :

$$m_1 p^2 + k_1 + k_2 - k_{\text{np.1}} = m_1 p^2 + k_1 + k_2 - \frac{k_2 (m_3 p^2 + k_3 + k_4)}{[m_2 m_3]}$$
 (23)

Из соотношения (23) следует, что

$$k_1 + k_2 - m_1 \omega^2 = \frac{k_2 (k_3 + k_4 - m_3 \omega^2)}{(k_2 + k_3 - m_2 \omega^2) \cdot (k_3 + k_4 - m_3 \omega^2) - k_3^2}.$$
 (24)

Уравнение (25) может быть решено графическим методом в соответствии со схемой пересечения двух графиков:

$$D(\omega) = k_1 + k_2 - m_1 \omega^2;$$
 (25)

$$D_1(\omega) = k_{\text{IID},2}(\omega). \tag{25'}$$

Отметим при этом, что из  $[m_2m_3] = 0$  могут быть найдены частоты  $n_2'$ ,  $n_3'$ , при которых значения  $k_{\text{пр.2}}(\omega)$  будут принимать бесконечно большие значения; на этих частотах динамическая жесткость  $D_1(\omega)$  квазипружины становится бесконечно большой, что соответствует частотам, определяющим режимы динамического гашения колебаний для массы  $m_1$ . В частности, это следует из выражения (1) при  $Q_2 = 0$ ,  $Q_3 = 0$ .

При пересечении  $D(\omega)$  и  $D_1(\omega)$  определяются частоты собственных колебаний исходной системы (см. рисунок 1, а).

2. Если при силовом внешнем возмущении  $Q_1$  рассматривать движение по координатам  $y_2$  и  $y_3$ , то связи между координатами  $y_2$ ,  $y_3$  и  $y_1$  характеризуются передаточными функциями (20) и (21); такие передаточные функции можно было бы назвать «передаточными функциями межпарциальных связей».

Для взаимодействия элементов системы характерно, что в связях  $y_1 - y_3$  возможен режим динамического гашения на частоте

$$n_{1,\text{дин.}}^2 = \frac{k_3 + k_4}{m_3} \,. \tag{26}$$

Отметим также, что частоты динамического гашения для случая, когда  $Q_1$  приложено к массе  $m_1$ , определяются из частотного уравнения (14'). Такие значения соответствуют значениям собственных частот обобщенной парциальной системы с двумя степенями свободы.

При возбуждении колебаний в цепных системах с тремя степенями свободы вид амплитудно-частотных характеристик существенно зависит от выбора места приложения силы [1, 8, 9]; отличаются и частотные характеристики по отдельным координатам. На рисунке 4, а – в представлено семейство амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) при силовом возмущении  $Q_1$ , приложенном к массе  $m_1$  (при  $k_5 = 0$ ).

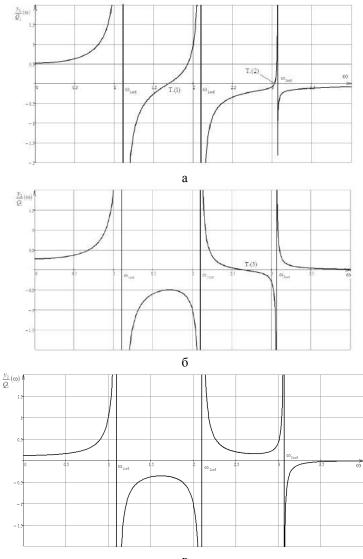


Рисунок 4 — Амплитудно-частотные характеристики системы с тремя степенями свободы при приложении внешней силы к массе  $m_1$  (по рисунку 1, а): АЧХ соответствует движению по координате  $y_1$  (а); по координате  $y_2$  (б); по координате  $y_3$  (в); (т. (1), (2), (3) определяют частоты динамического гашения при  $Q_1 \neq 0$ ,  $Q_2 = 0$ ,  $Q_3 = 0$ )

Характерным для семейства АЧХ является уменьшение числа режимов динамического гашения при переходе к координатам  $y_2$  и  $y_3$  соответственно, а также появление режимов, для которых характерны графики АЧХ с формированием зон уменьшения колебаний массоинерционных элементов до минимума; при этом движение по координатам происходит без изменения знака. Специфическая особенность колебаний механических систем достаточно подробно рассмотрена в работах [8, 9].

Отношения амплитуд колебаний, определяемых передаточными функциями (20), (21), представлены на рисунке 5.

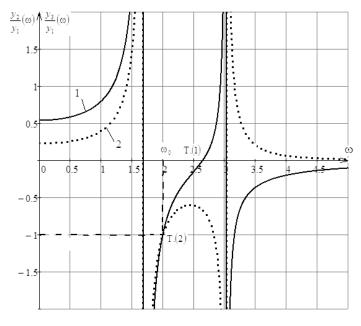


Рисунок 5 — Графики отношения амплитуд  $\frac{y_2}{y_1}(\omega)$  и  $\frac{y_3}{y_1}(\omega)$  колебаний системы с тремя степенями свободы

при приложении внешней силы к массе  $m_1$  ( $k_5=0$ ): кривая 1 соответствует  $\frac{\mathcal{Y}_2}{\mathcal{Y}_1}$  ( $\omega$ );

кривая 2 соответствует 
$$\frac{y_3}{y_1}(\omega)$$

При частоте, определяемой выражением (26), движение по координате  $y_2 = 0$ , что соответствует режиму динамического гашения колебаний (т.(1) на рис. 5). Одновременно на двух частотах возможны резонансные явления; их частоты  $n_2'$  и  $n_3'$  совпадают с частотами динамического гашения по координате  $y_1$ : частоты определяются из условия  $[m_2m_3] = 0$  (или из решения частотного уравнения (14')). Отметим также, что совместное решение уравнений

(20) и (21) при 
$$\frac{y_2}{y_1} = \frac{y_3}{y_1}$$
 дает значение частоты

$$\omega_0^2 = \frac{k_4}{m_3} \,, \tag{27}$$

при которой движение по координатам  $y_2$  и  $y_3$  будет происходить «слитно», т. е. с равными амплитудами и в одном направлении (т. (2) и  $\omega_0$  на рисунке 5).

Детализация представлений о движениях по отдельным координатам носит, при всей общности представлений, и ряд различий в зависимости от способа возбуждения (или места приложения) внешнего возмущения.

На рисунке 6 представлена сводная картина взаимодействий элементов системы, что дает возможность выявить некоторые характерные особенности.

Пересечение кривых  $D(\omega)$  и  $D_1(\omega)$ , определяемых выражениями (25) и (25') собственных колебаний  $\omega_{1\text{соб}}$ ,  $\omega_{2\text{соб}}$ ,  $\omega_{3\text{соб}}$  в физическом смысле, можно интерпретировать как выявление частот определенных режимов от приложенного к элементу  $m_1$  внешнего возмущения. При этом на выявленных частотах суммарная динамическая жесткость для системы в целом становится равной нулю. По существу на каждой из трех частот собственных колебаний выполняется условие

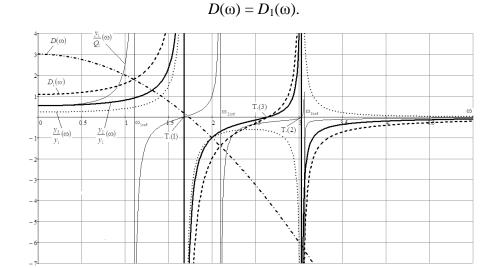


Рисунок 6 – Схема расположения зависимостей, соответственно обозначенных:

$$- \frac{y_1}{Q_1}(\omega); - \cdot - \cdot - D(\omega); - - \cdot - D_1(\omega); - \frac{y_2}{y_1}(\omega); \cdot \cdot \cdot - \frac{y_3}{y_1}(\omega)$$

Из условия (28), частности, следует, что динамические жесткости могут иметь положительные и отрицательные значения. Вопросы определения динамических жесткостей упругих элементов и квазипружины как обобщенных пружин с приведенными жесткостями, зависящими от частоты, рассматривались в работе [3]. Таким образом, резонансный режим в механической колебательной системе может трактоваться как режим, в рамках которого внешняя гармоническая сила, действуя на массоинерционный элемент (в данном случае на массу  $m_1$ ), не встречает на этой частоте «сопротивления» или противодействия.

Отметим также, что динамическая жесткость парциальной системы  $m_1$ ,  $k_1$ ,  $k_2$  может принимать нулевое значение на частоте, определяемой выражением (22). Нулевое значение динамической жесткости фрагмента механической колебательной системы  $D_1(\omega)$ , что соответствует частоте, определяемой выражением (26). В подобного рода случаях возможна перемена знака динамических жесткостей и соответственно динамических реакций, что «генерирует» определенные формы совместных движений. На графиках зависимостей, приведенных на

рисунке 5, имеются особенности изменения соотношений  $\frac{y_2}{y_1}(\omega)$  и  $\frac{y_3}{y_1}(\omega)$ , которые в сово-

купности с движением по координате  $y_1$  дают представление о формах совместных движений элементов системы при нагружении силой  $Q_1$ . В определенной степени такие представления можно отнести к особенностям форм свободных колебаний системы.

Особенности совместных движений по трем координатам —  $y_1$ ,  $y_2$ ,  $y_3$ . Анализ расположения графиков на рисунке 5 показывает, что соотношение  $\frac{y_2}{y_1}(\omega)$  в т. (1) (см. рисунок 5) при частоте из выражения (26) меняет знак. При этом в диапазоне от 0 до  $n_{1дин}$  происходит плавное изменение отношения  $\frac{y_2}{y_1}$ , в том числе при прохождении через частоту первого резонан-

ca  $\omega_{1co\delta}$ .

(28)

В упомянутом диапазоне частот все координаты движутся в одном направлении («слитно»), хотя соотношения амплитуд  $y_1$ ,  $y_2$ ,  $y_3$  на разных частотах будет различным. В определенном смысле можно рассматривать такое совместное движение как некоторый аналог движений по первой форме свободных колебаний системы. Вместе с тем отношения между амплитудами движения, особенно на частотах собственных колебаний  $\omega_{1\text{соб}}$ ,  $\omega_{2\text{соб}}$ ,  $\omega_{3\text{соб}}$ , имеют значения, которые коррелируются с соответствующими данными при определении частот собственных колебаний системы по энергетическому методу [10].

Точка (1) на рисунке 5 соответствует «резонансу» значения динамической жесткости квазипружины  $D_1(\omega)$ , что одновременно определяет режим динамического гашений колебаний на графике  $y_1(\omega)$  (см. рисунок 6), точка (1)). Частота второго резонанса динамической жесткости  $D_1(\omega)$  (см. рисунок 5, точка (2)) совпадает с частотой динамического гашения по координате  $y_1$ , что совпадает с т. (2) на рисунке 6. В каждой из точек (т. (1) и т. (2)) на рисунке 6 координата  $y_1$  меняет свой знак. Между т. (1) и (2) на рисунке 5 находится т. (3). В т. (3) координата  $y_2$  принимает нулевое значение. На рисунке 6 этой точке также соответствует т. 3. Динамическая жесткость фрагмента системы  $D_1(\omega)$  будет равна нулю, но это не означает, что динамическая жесткость системы в целом будет нулевой. На этой частоте движение системы будет происходить с определенным соотношением амплитуд колебаний элементов системы, создавая определенную форму.

Таким образом, движение трех элементов –  $m_1$ ,  $m_2$  и  $m_3$  – в частотном диапазоне 0 – т. (1) будет происходить «слитно», как уже упоминалось выше. При переходе через т. (3) (см. рисунок 6)  $\frac{y_2}{y_1}$  ( $\omega$ ) меняет знак, и форма совместного движения трех элементов изменяется. Если анализировать формы совместных движений элементов по графикам на рисунке 4, то можно выделить ряд диапазонов частот.

- 1. При изменении частоты внешнего воздействия от 0 до частоты динамического гашения по координате  $y_1$  (т. (1) на рисунке 4) все элементы ( $m_1$ ,  $m_2$ ,  $m_3$ ) движутся «слитно», что сохраняется при переходе через  $\omega_{1\text{co6}}$ ; при переходе через  $\omega_{1\text{co6}}$  отношения амплитуд  $\frac{y_2}{y_1}(\omega_{1\text{co6}})$
- и  $\frac{y_3}{y_1}(\omega_{1\cos 0})$  при численных экспериментах совпадают с коэффициентами отношения координат при построении частотной энергетической функции [9].
- 2. В точке (1) на рисунке 4 на частоте динамического гашения ( $n'_1$  определяется из решения частотного уравнения [ $m_2m_3$ ] = 0) движение идет по координате  $y_1$  = 0, а массы  $m_2$  и  $m_3$  движутся в одном направлении («слитно»).
- 3. При дальнейшем увеличении частоты направление движения по координате  $y_1$  меняется на противоположное; движение по координате  $y_1$  будет противоположным по отношению к движению по координатам  $y_2$  и  $y_3$ , которые на каждой частоте перемещаются «слитно» (или группой), хотя при изменении частоты отношение амплитуд  $\frac{y_2}{y_3}$  будет соответственно изме-

няться. Описанная выше форма совместных движений элементов системы сохраняется и при переходе через вторую частоту собственных колебаний  $\omega_{2\text{co}6}$ .

4. Изменения в совместных формах движения по координатам  $y_1$ ,  $y_2$ ,  $y_3$  начинаются при частоте, соответствующей режиму динамического гашения по координате  $y_2$  (т. (3) на рисунке 4). В этом случае движение идет по координате  $y_2 = 0$ , а движение по координатам  $y_1$  и  $y_3$  будет «совместным». Возникающая форма совместных движений может быть отмечена как особая из-за движения центрального элемента  $m_2$  в противоположном направлении по отношению к  $m_1$  и  $m_3$ , перемещающимся «слитно». Такая форма движения при увеличении частоты внешнего воздействия сохраняется до второй частоты динамического гашения  $n_2'$  по координате  $y_1$  (т. (2) на рисунке 4), определяемой из решения частотного уравнения [ $m_2m_3$ ] = 0.

На частоте  $n'_2$  движение идет по координате  $y_1 = 0$ . Что касается движений по координатам  $y_2$  и  $y_3$ , то они будут направлены противоположно друг другу.

5. При прохождении частоты динамического гашения колебаний  $n'_2$  (т. (2) на рисунке 4) форма предыдущего движения сохраняется. При прохождении частоты собственных колебаний возникающая форма совместных движений также сохраняется.

На рисунке 5 представлены графики зависимостей  $\frac{y_2}{y_1}$  (кривая 1) и  $\frac{y_3}{y_1}$  ( $\omega$ ) (кривая 2).

Соотношение графиков зависимостей на рисунке 5 также определяется положением т. (1), (2) и (3), характеризующих расположения частот, соответствующих режимам динамического гашения колебаний. Сводная картина взаимного расположения АЧХ, а также графиков динамических жесткостей  $D(\omega)$  и  $D_1(\omega)$  и графиков отношения координат  $\frac{y_2}{y_1}(\omega)$  и  $\frac{y_3}{y_1}(\omega)$  приве-

дена на рисунке 6. В целом можно было бы отметить, что на низких частотах система реализует форму совместно «слитного» движения всех элементов при соответствующих различиях в величинах перемещений по  $y_1$ ,  $y_2$  и  $y_3$ . На высоких частотах (после  $\omega_{3\cos 6}$ ) движение представляет собой колебания в противоположных направлениях элемента  $m_3$  по координате  $y_3$  и двух элементов —  $m_1$  и  $m_2$ , движущихся по координатам  $y_1$  и  $y_2$  в противоположном направлении. При этом силовое возмущение  $Q_1$  приложено к элементу  $m_1$ .

Если силовое возмущение прикладывается к другим массам, то формы воздействия элементов и их движения носят общий характер, однако формы взаимодействия будут различаться.

Взаимодействие в системе с тремя степенями свободы (замкнутый контур). При исследованиях использовались методы вычислительного моделирования при следующих соотношениях параметров:  $m_1 = m_2 = m_3 = m = 1$ ,  $k_1 = k$ ,  $k_2 = 2k$ ,  $k_3 = 3k$ ,  $k_4 = 4k$ ,  $k_5 = 0$ . При  $k_5 \neq 0$  (см. рисунок 1, а) механическая колебательная система приобретает более сложную структуру. Поскольку  $a_{31} = k_5 \neq 0$ , то характеристики, используемые при частотном анализе, преобразуются к виду:

$$D(\omega) = a_{11} = m_1 p^2 + k_1 + k_2 + k_5; \tag{29}$$

$$D_{1}(\omega) = \frac{k_{5}^{2} \cdot (m_{2}p^{2} + k_{2} + k_{3}) + k_{2}(m_{3}p^{2} + k_{3} + k_{4} + k_{5}) + 2k_{2}k_{3}k_{5}}{[m_{2}m_{3}]};$$
(30)

$$[m_2m_3] = [m_2p^2 + k_2 + k_3] \cdot [m_3p^2 + k_3 + k_4 + k_5] - k_3^2.$$
(31)

Соответственно изменяются частотные характеристики  $\frac{y_2}{y_1}(\omega)$ ,  $\frac{y_3}{y_1}(\omega)$ :

$$W_{21}(p) = \frac{y_2}{y_1}(\omega) = \frac{k_2 k_5 + k_5 (m_3 p^2 + k_3 + k_4 + k_5)}{[m_2 m_3]};$$
(32)

$$W_{31}(p) = \frac{y_3}{y_1}(\omega) = \frac{k_2 k_3 + k_5 (m_2 p^2 + k_2 + k_3 + k_5)}{[m_2 m_3]}.$$
 (33)

Анализ частотных графических зависимостей на рисунке 7 показывает, что переход системы от цепного вида к замкнутому контуру принципиально свойства не изменяет.

При построении графиков изменяются и характерные частоты:

динамического гашения по координате  $y_1$  на двух частотах, определяемых из частотного уравнения (14');

собственных колебаний  $\omega_{1\text{co6}}$ ,  $\omega_{2\text{co6}}$ ,  $\omega_{3\text{co6}}$  в связи с изменением частотной характеристического уравнения при  $k_5 \neq 0$ ;

динамического гашения на промежуточной массе  $m_2$ .

Системы с несколькими степенями свободы характеризуются большим разнообразием форм динамических взаимодействий элементов. Предлагается метод оценки форм взаимодействия элементов и их совместного движения на основе преобразований частотного характеристического уравнения.

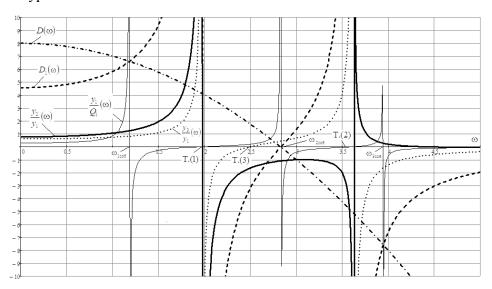


Рисунок 7 — Схема расположения зависимостей (при  $k_5 \neq 0$ ), соответственно обозначенных:

- 1. Метод заключается в выделении определенного массоинерционного элемента (в данном случае  $m_1$ ), рассматриваемого как некоторый объект, динамическое состояние которого подлежит оценке (например, в задачах вибрационной защиты). Такой объект обладает свойствами парциальной системы с одной степенью свободы. При делении частотного характеристического уравнения на частное характеристическое уравнение обобщенной парциальной системы (в данном случае  $[m_2m_3]$ ) исходное частотное уравнение преобразуется к виду, удобному для графоаналитического решения.
- 2. Преобразованное характеристическое уравнение по существу представляет собой сумму динамических жесткостей. Такие жесткости формируются парциальной системой обычного вида (системы с одной степенью свободы) и вводимой обобщенной парциальной системы с двумя степенями свободы. На основе таких подходов предлагается введение понятия о квазипружине.
- 3. Динамические свойства системы с несколькими степенями свободы соотносятся с их значениями и по отношению к отдельному элементу, блоку элементов (или квазипружине), а также к системе «в целом».
- 4. Резонансный режим системы «в целом» возникает в механической колебательной системе, когда ее динамическая жесткость равняется нулю. При равенстве нулю динамической жесткости квазипружины реализуется тот или иной режим совместных движений элементов.

Динамическое гашение колебаний возникает при бесконечно больших значениях динамической жесткости в выбранной точке.

5. Предлагаемая последовательность процедур исследования дает возможность оценить широкий спектр динамических свойств системы в различных частотных диапазонах внешних гармонических воздействий.

#### Список литературы

1. Биргер, И. А. Прочность. Устойчивость. Колебания: Справочник: В 3 т. [Текст] / И. А. Биргер, Я. Г. Пановко. — М.: Машиностроение, 1968. - T. 1. - 831 с.

- 2. Тимошенко, С. П. Теория колебаний в инженерном деле [Текст] / С. П. Тимошенко, Д. Х. Янг, У. Уивер // Пер. с англ. Л. Г. Корнейчука; Под ред. Э. И. Григолюка. М.: Машиностроение, 1985. 472 с.
- 3. Елисеев, С. В. Мехатронные подходы в динамике механических колебательных систем [Текст] / С. В. Елисеев, Ю. Н. Резник, А. П. Хоменко. Новосибирск: Наука, 2011. 384 с.
- 4. Елисеев, А. В. Динамика вибрационных взаимодействий элементов технологических систем с учетом неудерживающих связей [Текст] / А. В. Елисеев, В. В. Сельвинский, С. В. Елисеев. Новосибирск: Наука, 2015. 332 с.
- 5. Хоменко, А. П. Системный анализ и математическое моделирование в мехатронике виброзащитных систем [Текст] / А. П. Хоменко, С. В. Елисеев, Ю. В. Ермошенко / Иркутский гос. ун-т путей сообщения. Иркутск, 2012. 288 с.
- 6. Дружинский, И. А. Механические цепи [Текст] / И. А. Дружинский. Л.: Машиностроение, 1977. 240 с.
- 7. Цзе, Ф. С. Механические колебания [Текст] / Ф. С. Цзе, И. Е. Морзе, Р. Т. Хинкл; Под ред. чл.-корр. АН СССР И. Ф. Образцова. М.: Машиностроение, 1966. 508 с.
- 8. Вибрации в технике: Справочник: В 6 т. / Под общ. ред. В. Н. Челомея. М.: Машиностроение, 1978. T. 1. 352 с.
- 9. Соотношения координат движения элементов механических колебательных систем как форма проявления рычажных связей [Текст] / С. В. Белокобыльский, С. В. Елисеев и др. // Системы. Методы. Технологии / Братский гос. ун-т. Братск, 2015. № 3 (27). С. 7 14.
- 10. Хоменко, А. П. Развитие энергетического метода определения частот свободных колебаний механических систем [Текст] / А. П. Хоменко, С. В. Елисеев // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование / Иркутский гос. ун-т путей сообщения. Иркутск. 2016. № 1 (49). С. 8 19.

#### References

- 1. Birger I.A., Panovko Ya. G. *Prochnost'. Ustoychivost'. Kolebaniya.* (Strength. Stability. Oscillations). Moscow: Mashinostroenie, Vol. 1, 1968, 831 p.
- 2. Timoshenko S.P., Young D.H., Weaver W. *Teoriya kolebaniy v inzhenernom dele* [Vibration problems in engineering]. Moscow: Mashinostroenie, 1985. 472 p.
- 3. Eliseev S.V., Reznik Yu. N., Khomenko A.P. *Mekhatronnyye podkhody v dinamike mekhanicheskikh kolebatel'nykh sistem* [Mechatronic approaches in the dynamics of mechanical vibration systems]. Novosibirsk: Nauka, 2011. 384 p.
- 4. Eliseev A.V., Sel'vinskiy V.V., Eliseev S.V. *Dinamika vibratsionnykh vzaimodeystviy elementov tekhnologicheskikh sistem s uchetom neuderzhivayushchikh svyazey* [Dynamics of vibrating elements of interactions of technological systems based on unilateral ties]. Novosibirsk: Nauka, 2015. 332 p.
- 5. Khomenko A.P., Eliseev S.V., Ermoshenko Yu. V. *Sistemnyy analiz i matematicheskoye modelirovaniye v mekhatronike vibrozashchitnykh sistem* [System analysis and mathematical modeling in mechatronics vibration isolation systems]. Irkutsk: ISTU, 2012. 288 p.
- 6. Druzhinskiy I.A. *Mekhanicheskie tsepi* [Mechanical chains]. Leningrad: Mashinostroenie, 1977. 240 p.
- 7. Tse F.S., Morse I.E., Hinkle R.T. *Mekhanicheskie kolebaniya* [Mechanical vibrations]. M.: Mashinostroenie, 1966. 508 p.
- 8. Vibratsii v tekhnike [Vibrations in technic]. Moscow: Mashinostroenie, 1978. Vol. 1. Kolebaniya lineynykh sistem [The vibrations of linear systems]. 1978. 352 p.
- 9. Belokobyl'skiy S.V., Eliseev S.V., Kashuba V.B., Nguyen D. Kh. The relations of mechanical vibration systems elements of motion origin as a form of lever ties [Sootnosheniya koordinat dvizheniya elementov mekhanicheskikh kolebatel'nykh sistem kak forma proyavleniya rychazhnykh svyazey]. *Sistemy. Metody. Tekhnologii*, 2015, no. 3 (27), pp. 7 14.

10. Khomenko A.P., Eliseev S.V. The development of the energy method for determining the frequency of free oscillations of mechanical systems [Razvitiye energeticheskogo metoda opredeleniya chastot svobodnykh kolebaniy mekhanicheskikh sistem]. *Sovremennyye tekhnologii* . *Sistemnyy analiz* . *Modelirovaniye*, 2016, no. 1 (49), pp. 8 – 19.

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

#### Елисеев Сергей Викторович

Иркутский государственный университет путей сообщения (ИрГУПС).

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

Доктор технических наук, профессор, директор – главный научный сотрудник НОЦ современных технологий, системного анализа и моделирования, ИрГУПС.

Тел.: +7 (3952) 63-83-26. E-mail: eliseev\_s@inbox.ru

#### Хоменко Андрей Павлович

Иркутский государственный университет путей сообщения (ИрГУПС).

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

Доктор технических наук, профессор, ректор ИрГУПСа.

Тел.: +7 (3952) 63-83-11. E-mail: homenko@irgups.ru

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Елисеев, С. В. Формы совместных движений элементов трехмассовой колебательной системы: влияние динамических жесткостей [Текст] / С. В. Елисеев, А. П. Хоменко // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. — Омск. — 2016. —  $N \ge 2$  (26). — С. 27 — 41.

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

#### Eliseev Sergey Victorovich

Irkutsk State Transport University (ISTU).

15, Chernishvsky st., Irkutsk, 664074, the Russion Federation.

Doctor of Technical Sciences, Professor, Director of Research and Educational Center «Modern technologies, systems analysis and modeling» Irkutsk State Transport University.

Phone: +7 (3952) 63-83-26. E-mail: eliseev\_s@inbox.ru

#### **Khomenko Andrey Pavlovich**

Irkutsk State Transport University (ISTU).

15, Chernishvsky st., Irkutsk, 664074, the Russion Federation.

Doctor of Technical Sciences, Professor, Rector of Irkutsk State Transport University.

Phone: +7 (3952) 63-83-11. E-mail: homenko@irgups.ru

#### BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Eliseev S.V., Khomenko A.P. Forms of joint motion of element of three-mass oscillating system: influence of dynamic stiffness. Journal of Transsib Railway Studies, 2016, vol. 26, no. 2, pp. 27 – 41. (In Russian).

УДК 681.3: 624.4

### А. Н. Крыгин<sup>1</sup>, А. В. Плаксин<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС), г. Омск, Российская Федерация, <sup>2</sup>Западно-Сибирская железная дорога – филиал ОАО «РЖД», г. Новосибирск, Российская Федерация

# МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОПТИМАЛЬНОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ МОЩНОСТИ ЭЛЕКТРОВОЗОВ ПОСТОЯННОГО ТОКА В ТЯГОВОМ РЕЖИМЕ И СПОСОБ ЕЕ РЕШЕНИЯ

**Аннотация.** Рациональным способом повышения эксплуатационного КПД локомотива является ступенчатое регулирование мощности.

Осуществление данного способа возможно при применении устройств автоматического регулирования мощности, реализующих оптимальный нагрузочный режим работы тягово-энергетической установки (ТЭУ) локомотива.

Целью данной работы является получение математической зависимости, устанавливающей оптимальное соотношение количества работающих тяговых двигателей (ТД) с учетом силы тяги и скорости движения.

Определение оптимального соотношения находящихся в работе тяговых двигателей базируется на нахождении минимума потерь мощности в узлах ТЭУ.

№ 2(26) 2016

Поиск минимума сложной функции представляет собой задачу оптимизации, которая с математической точки зрения сводится к определению минимума функции многих переменных, имеющих целый ряд ограничений и связей.

Для решения задачи поиска минимума сложной функции использован метод неопределенных множителей Лагранжа.

Процесс оптимизации рассматривается при постоянном значении напряжения, подведенного к ТД, и реализуемой мощности. Переменные величины — сила тяги, скорость движения, коэффициент добавочных потерь, сопротивление цепи якоря ТД — были приняты постоянными, что позволило упростить решение задачи, сведя его к поиску трех неизвестных величин — тока, числа ТД и магнитного потока.

Решением данной системы уравнений относительно числа ТД, участвующих в работе, были получены аналитические зависимости оптимальных значений числа ТД в зависимости от скорости движения, силы тяги на ободе движущих колес электровоза и напряжения.

Аналитические выражения для определения оптимальных параметров регулирования мощности электровозов постоянного тока позволяют получить оптимальные значения числа работающих ТД и их нагрузку в зависимости от заданных значений силы тяги и скорости движения во всем диапазоне нагрузочных режимов ЭПС.

Полученные аналитические выражения могут быть использованы при составлении режимных карт и энергетических паспортов ЭПС, а также для задания оптимального соотношения количества работающих ТД в решающих автоматических устройствах регулирования мощности подвижного состава.

**Ключевые слова:** математическая модель, оптимальное число движущих осей электровоза, постоянный ток, режим тяги.

### Anatoly N. Krygin<sup>1</sup>, Alexey V. Plaksin<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Omsk State Transport University (OSTU), Omsk, the Russian Federation, <sup>2</sup>The West Siberian railway – branch of JSC «RZD», Novosibirsk, the Russian Federation

## MATHEMATICAL MODEL OF OPTIMUM POWER CONTROL OF DC ELECTRIC LOCOMOTIVE IN TRACTION MODE AND THE METHOD OF ITS SOLUTION

**Abstract.** Rational way to improve the operational efficiency of the locomotive is adjustable power. The implementation of this method possible with the use of automatic power regulation implementing the optimal load, the operation mode of the traction and energy unit (TEU) of the locomotive.

The aim of this work is to obtain mathematical relationships, establishing the optimal ratio between the number of employees of TD given thrust and speed.

Determination of the optimal ratio being in the traction motors is based on finding the minimum power losses at the nodes of the TEU.

Search the minimum of complex functions is an optimization problem, which from a mathematical point of view is to determine the minimum of function of several variables with a number of constraints, and relationships.

To solve the problem of finding the minimum of a complex function, we used the method of indeterminate Lagrange multipliers.

The optimization process is considered at a constant value of the voltage supplied to the TD and sold power. Variables – the force of traction, speed of movement, the ratio of incremental losses, the resistance of the circuit of the armature of TD was assumed constant, which allowed to simplify the solution of the problem, reducing it to find three unknown quantities – current, the number of TD and magnetic flux.

The solution to this system of equations for the number TD, participating in the work were obtained analytical dependences the optimum values of the TD depending on the speed, the thrust force on the rim of the driving wheels of the locomotive and tension.

Analytical expressions for determining optimal parameters of power regulation of electric DC, allow to obtain the optimal values of the number of workers so and the load depending on the given values of thrust and speed in the entire range of load modes of EPS.

The analytical expressions can be used when drawing up regime maps and energy performance certificates EPS, and also in the most important automatic devices of power control of the rolling stock to set the optimal ratio of number of employees and so on..

**Keywords:** mathematical model, optimal number of driving axles of electric locomotives, direct current, traction mode.

Железнодорожный транспорт является одним из основных потребителей электроэнергии. На долю его потребления приходится до 5 % вырабатываемой в стране электрической

энергии, из которых более 80 % расходуется на тягу поездов. В связи с этим снижение затрат электроэнергии на тягу поездов является одной из важнейших задач на железнодорожном транспорте.

Расход электроэнергии на тягу в значительной степени определяется режимами управления движением поездов и потерями в оборудовании электровозов. Потери в оборудовании зависят от многих факторов, в том числе и от нагрузки подвижного состава.

При движении электровоза в режимах с малой нагрузкой (малое количество вагонов, низкая скорость движения, легкие элементы профиля пути) происходит недоиспользование его мощности, в результате чего подвижной состав работает в режимах с заниженным значением КПД.

С целью снижения потерь в оборудовании применяют способ регулирования мощности путем отключения части тяговых двигателей и перевода оставшихся в работе в режим с большей загруженностью, повышая, таким образом, эксплуатационный КПД электровоза. В частности, на пассажирских электровозах ЧС7 установлена система оперативного регулирования мощности (ОРМЛ), которая позволяет машинисту производить отключение части ТД. Отключение части ТД используют и на электровозах ВЛ10К, эксплуатирующихся на Западно-Сибирской железной дороге.

Для выбора оптимальных режимов работы электровозов при использовании способа регулирования мощности была поставлена задача установить функциональные зависимости оптимального числа ТД и их нагрузочных параметров (тока и напряжения на зажимах ТД) в зависимости от заданных условий движения (скорости и силы тяги).

Методы определения оптимального режима тягового электропривода базируются на нахождении минимума потерь мощности в его узлах. Поиск минимума сложной функции представляет собой задачу оптимизации, которая с математической точки зрения сводится к определению минимума функции многих переменных, имеющих целый ряд ограничений и связей [1].

Математически задача оптимизации для данного случая была сформулирована следующим образом.

На электровозе имеется N тяговых двигателей. Нужно определить необходимое количество работающих ТД  $N_{\rm дp}$  и их нагрузку, чтобы потребление электроэнергии  $A(N_{\rm дp})$  для заданных значений силы тяги  $F_{\rm k}$  и скорости движения V было минимальным:

$$A(N_{_{\rm IID}}) \Rightarrow \min.$$
 (1)

Поскольку потребление электроэнергии при заданных значениях силы тяги  $F_{\kappa}$  и скорости движения V зависит от величины КПД электровоза или потерь мощности в его узлах, то задачу оптимизации режима работы для любого момента времени можно свести к минимизации потерь его мощности:

$$_{\Delta}P_{_{2}}(N_{_{\mathrm{ID}}}) \Longrightarrow \min.$$
 (2)

Основные потери в узлах электровоза постоянного тока состоят из следующих потерь: в ТД, которые включают в себя потери в меди, стали, добавочные, механические и переходные потери в щеточном контакте; в зубчатой передаче и на вращение колесно-моторных блоков (КМБ) с отключенными двигателями [2-5]. Присутствуют также затраты энергии на собственные нужды  $P_{\rm ch}$ .

Применительно к электровозу постоянного тока, с учетом числа ТД, участвующих в работе  $N_{\rm дp}$ , данные потери были приведены к следующему виду.

Электрические потери (потери в меди) в обмотках ТД электровоза

$$_{\Delta}P_{_{\mathfrak{I},\mathfrak{I},\mathfrak{I},\mathfrak{I}}} = N_{_{\mathfrak{I}\mathfrak{P}}} \cdot \left(\frac{I_{_{\mathfrak{I}}}}{I_{_{\mathfrak{I},\mathfrak{H}}}}\right)^{2} \cdot_{\Delta}P_{_{\mathfrak{I},\mathfrak{I},\mathfrak{I},\mathfrak{H}}},\tag{3}$$

где  $I_{\scriptscriptstyle \rm I}$  – ток ТД, А;

 $I_{\scriptscriptstyle \mathrm{Д.H}}$  – номинальный ток ТД, А;

 $_{\Delta}P_{_{\mathrm{Д.эл.H}}}$  – электрические потери в двигателе при номинальном режиме работы, Вт.

Магнитные (в стали) и добавочные потери в ТД электровоза:

$${}_{\Delta}P_{_{3,\text{MA}\Gamma+\mathcal{I},\mathcal{I}}} = N_{_{\mathcal{I}\mathcal{D}}} \cdot (1+k_{_{\mathcal{I}}}) \cdot (\frac{c\Phi}{c\Phi_{_{\mathbf{H}}}})^2 \cdot (\frac{V}{V_{_{\mathbf{H}}}})^{1.5} \cdot {}_{\Delta}P_{_{\mathcal{I},\text{MA}\Gamma,\mathbf{H}}}, \tag{4}$$

где  $k_{_{\rm I\!I}}$  – коэффициент добавочных потерь;

 $c\Phi$  – магнитный поток ТД, Вб;

 $c\Phi_{_{\rm H}}$  – номинальный магнитный поток ТД, Вб;

 $V_{_{\rm H}}$  — номинальная скорость движения электровоза, км/ч;

 $\Delta P_{\text{магн}}$  — магнитные потери в двигателе при номинальном режиме работы, Вт.

Механические потери в ТД электровоза

$${}_{\Delta}P_{_{3.\text{Mex},\text{H}}} = N_{_{\text{ДP}}} \cdot (\frac{V}{V_{_{\text{H}}}}) \cdot_{\Delta} P_{_{\text{Д.Mex},\text{H}}}, \tag{5}$$

где  $_{\Delta}P_{_{\rm Л,Mex,H}}$  – механические потери в двигателе при номинальном режиме работы, Вт.

Потери в контакте «щетка – коллектор» ТД электровоза

$$_{\Delta}P_{_{\mathfrak{I},\mathfrak{I}\mathfrak{I}\mathfrak{I},\mathfrak{I}}} = N_{_{\mathfrak{I}\mathfrak{P}}} \cdot (\frac{I_{_{\mathfrak{I}}}}{I_{_{\mathfrak{I},\mathfrak{I}}}}) \cdot_{\Delta} P_{_{\mathfrak{I},\mathfrak{I}\mathfrak{I}\mathfrak{I},\mathfrak{I}}}, \tag{6}$$

Потери в зубчатой передаче электровоза были получены путем аппроксимации табличных значений потерь в зубчатой передаче (величина достоверности аппроксимации  $R^2 = 0.959$ ):

где  $U_{_{\rm J}}$  – напряжение, подведенное к зажимам ТД, В;

 $U_{\rm д.н.c}$  — номинальное напряжение ТД на соответствующем соединении (сериесном, сериес-параллельном или параллельном), В;

 $P_{\rm д.н.c}$  — номинальная мощность двигателя на соответствующем соединении (сериесном, сериес-параллельном или параллельном), Вт;

 $z_0$ ,  $z_1$ ,  $z_2$  – коэффициенты.

Потери на вращение КМБ с отключенными двигателями:

$${}_{\Delta}P_{_{3,KM6,0}} = (1 - \frac{N_{_{\pi p}}}{N})(w_{_{X}} - w_{_{0}}^{/}) \cdot P \cdot 2,725 = (1 - \frac{N_{_{\pi p}}}{N}) \cdot \left[ (a_{_{1}} + b_{_{1}} \cdot V + c_{_{1}} \cdot V^{2}) \cdot V \cdot P \cdot d_{_{1}} \right], \tag{8}$$

где  $w_{\rm o}^{\prime}$ ,  $w_{\rm x}$  — основные удельные сопротивления движению электровоза под током и без тока, кгс/т;

 $a_1$ ,  $b_1$ ,  $c_1$ ,  $d_1$  – постоянные коэффициенты;

P — масса электровоза, т.

Для отыскания минимума потерь мощности был проведен анализ основных видов потерь в узлах электровоза постоянного тока в зависимости от числа работающих ТД, который показал, что потери мощности в его узлах при постоянном напряжении на зажимах ТД  $U_{_{\rm Л}}$  и реализации заданных значений силы тяги  $F_{_{\rm R}}$  и поступательной скорости движения V при различном количестве движущих осей будут отличающимися не только по величине, но и по характеру изменения слагаемых потерь. Так, например, по мере отключения части ТД и уменьшения числа движущих осей, находящихся под нагрузкой, одни потери возрастают, другие снижаются, а третьи остаются неизменными, в связи с чем суммарные потери мощности в узлах электровоза постоянного тока были сгруппированы по характеру изменений и представлены в виде суммы трех составляющих:

$${}_{\Delta}P_{3}(N_{np}) = {}_{\Delta}P_{31} + {}_{\Delta}P_{32} + {}_{\Delta}P_{33}, \tag{9}$$

где  $_{_{\Delta}}P_{_{\!\!\text{ol}}}$  – потери электровоза, уменьшающиеся по мере отключения отдельных ТД,

$$_{\Delta}P_{\text{sl}} = _{\Delta}P_{\text{s.Mar}+\text{J.J.}} + _{\Delta}P_{\text{s.sur,J}} + _{\Delta}P_{\text{s.s.r.}} + _{\Delta}P_{\text{s.mex,J.}}; \tag{10}$$

$$_{\Delta}P_{92} = _{\Delta}P_{9.9JI,JI} + _{\Delta}P_{9.KMB,o}; \tag{11}$$

 $_{\Lambda}P_{_{33}}$  – постоянная составляющая потерь мощности

$$_{\Lambda}P_{23} = P_{\text{CH}}. \tag{12}$$

Для того чтобы определить, при каких условиях достигается минимум потерь мощности (функция достигает своего экстремума), были проведены дополнительные исследования функции  $_{\Delta}P_{_{3}}(N_{_{\mathrm{др}}})$  на минимум по числу движущих осей локомотива. Для этого была определена производная от суммарных потерь мощности, которая равна сумме производных по трем составляющим [6, 7]:

$$\frac{\partial_{\Delta} P_{3}}{\partial N_{\rm np}} = \frac{\partial_{\Delta} P_{31}}{\partial N_{\rm np}} + \frac{\partial_{\Delta} P_{32}}{\partial N_{\rm np}} + \frac{\partial_{\Delta} P_{33}}{\partial N_{\rm np}}.$$
 (13)

Так как  $\frac{\partial_{\Delta} P_{_{3}}}{\partial N_{_{\rm AD}}}=0$  по условию существования экстремума функции, а  $\frac{\partial_{\Delta} P_{_{33}}}{\partial N_{_{\rm AD}}}=0$  – как пос-

тоянная величина, данное выражение можно привести к виду:

$$\frac{\partial_{\Delta} P_{31}}{\partial N_{\rm ap}} = -\frac{\partial_{\Delta} P_{32}}{\partial N_{\rm ap}},\tag{14}$$

а применительно к электровозу постоянного тока -

$$\frac{\partial(_{\Delta}P_{\text{9KMB.T}} - _{\Delta}P_{\text{9.9Л.Д}})}{\partial N_{\text{дp}}} = -\frac{\partial(_{\Delta}P_{\text{9KMB.0}} + _{\Delta}P_{\text{9.9Л.Д}})}{\partial N_{\text{дp}}},$$
(15)

где  $_{\scriptscriptstyle \Delta} P_{\scriptscriptstyle \rm 3KMB.t}$  — потери мощности в КМБ электровоза, находящихся под нагрузкой.

Из анализа выражения (15) можно заключить, что для электровоза постоянного тока в режимах движения с заданными значениями силы тяги и скорости движения при постоянных значениях напряжения на зажимах ТД минимум потерь мощности  $_{\Delta}P_{3\,\text{min}}$  в точке с оптимальными значениями работающих ТД  $N_{\text{др опт}}$  характеризуется равенством первых производных потерь мощности в рабочих КМБ, находящихся под нагрузкой, за исключением электриче-

ских потерь (в меди) ТД  $\frac{\partial (_{\Delta}P_{_{9,\text{КМБ,T}}} - _{\Delta}P_{_{9,9,\text{Л},\text{Д}}})}{\partial N_{_{\text{Др}}}}$  и потерь мощности в отключенных КМБ с учетом электрических потерь в работающих ТД  $\frac{\partial (_{\Delta}P_{_{9,\text{КМБ,o}}} + _{\Delta}P_{_{9,9,\text{Л},\text{Д}}})}{\partial N_{_{_{\text{ЛD}}}}}$ .

На основании проведенного анализа можно сделать вывод о том, что целевая функция  $_{\Delta}P_{_{3}}(N_{_{\mathrm{дp}}})$  при заданных значениях скорости движения, силы тяги на ободах движущих колес и напряжения на зажимах ТД является нелинейной, имеет один минимум и является одной экстремальной задачей. При этом уравнение (15) представляет собой математическую модель и основное условие определения оптимального числа движущих осей локомотива.

В связи с тем, что на величину потерь мощности  $\Delta P_{\text{91}}$ ,  $\Delta P_{\text{92}}$  оказывают влияние сила тяги и скорость движения, оптимальное число ТД  $N_{\text{др опт}}$  для каждого значения  $F_{\text{к}}$  и V будет свое.

Решение задачи по поиску оптимальных параметров целевой функция  $_{\Delta}P_{_{3}}(N_{_{\rm дp}})$  выполнено методом неопределенных множителей Лагранжа [8].

Суть метода Лагранжа заключается в следующем. Вместо условий экстремума функции  $F(X_1, X_2, ..., X_n)$  и переменных, связанных между собой k соотношениями, необходимо найти условия экстремума функции Лагранжа:

$$S = F + \sum_{i=1}^{k} \lambda_i W_i, \qquad (16)$$

где  $\lambda_i$  (i=1,2,...,k) — постоянные множители при отыскании экстремума функции F. Приравняв к нулю частные производные от S по всем n переменным аргументам, получаем следующие n уравнений:

$$\begin{cases}
\frac{dS}{dx_1} = \frac{\partial F}{\partial x_1} + \sum_{i=1}^k \lambda_i \frac{dW_i}{dx_1} = 0; \\
\frac{dS}{dx_k} = \frac{\partial F}{\partial x_k} + \sum_{i=1}^k \lambda_i \frac{dW_i}{dx_k} = 0.
\end{cases}$$
(17)

Из n уравнений и k уравнений связи составляем всего (n+k) уравнений. Число неизвестных также равно (n+k), а именно: n искомых значений переменных —  $x_1, x_2, ..., x_n$  и k множителей Лагранжа —  $\lambda_1, \lambda_2, ..., \lambda_k$ . Решением данных уравнений находим аргументы, соответствующие экстремуму функции F.

Для решения полученной математической модели методом Лагранжа (уравнение цели  ${}_{\Delta}P_{_{3}}(N_{_{\mathrm{дp}}})$   $\to$  min ) суммарные потери мощности в узлах электровоза постоянного тока были приведены к виду:

$${}_{\Delta}P_{3}(N_{\text{др}}) = N_{\text{др}} \cdot (\frac{I_{\text{д}}}{I_{\text{д.H}}})^{2} \cdot {}_{\Delta}P_{\text{д.эл.H}} + N_{\text{др}} \cdot (1 + k_{\text{д}}) \cdot (\frac{c\Phi}{c\Phi_{\text{H}}})^{2} \cdot (\frac{V}{V_{\text{H}}})^{1.5} \cdot {}_{\Delta}P_{\text{д.маг.H}} +$$

$$+ N_{\text{др}} \cdot (z_{0} + z_{1}(\frac{I_{\text{д}} \cdot U_{\text{д}}}{I_{\text{д.H}} \cdot U_{\text{д.H.c}}}) + z_{2}(\frac{I_{\text{д}} \cdot U_{\text{д}}}{I_{\text{д.H}} \cdot U_{\text{д.H.c}}})^{2}) \cdot P_{\text{д.H.c}} + N_{\text{др}} \cdot (\frac{I_{\text{д}}}{I_{\text{д.H}}}) \cdot {}_{\Delta}P_{\text{д.эш.H}} +$$

$$+ N_{\text{др}} \cdot (\frac{V}{V_{\text{H}}}) \cdot {}_{\Delta}P_{\text{д.мех.H}} + (1 - \frac{N_{\text{дp}}}{N}) \cdot \left[ (a_{1} + b_{1} \cdot V + c_{1} \cdot V^{2}) \cdot V \cdot d_{1} \right].$$

$$(18)$$

Как видно из выражения (18), потери мощности в узлах электровоза зависят от следующих переменных: скорости движения V, тока  $I_{_{\rm I}}$ , напряжения на зажимах двигателя  $U_{_{\rm I}}$ , магнитного потока  $c\Phi$  и числа ТД, участвующих в работе  $N_{_{{\rm II}}}$ . Кроме того, переменные параметры регулирования мощности имеют ограничения по максимально допустимым значениям нагрузочных параметров: току ТД  $I_{{\rm max}}$ , напряжению ТД  $U_{{\rm II}}$ , скорости движения  $V_{{\rm max}}$  и по силе тяги по сцеплению  $F_{{\rm Keq}}$ , а также связаны между собой следующими уравнениями связи:

$$V = \frac{U_{\Lambda} - I_{\Lambda} \cdot r_{\Lambda}}{c\Phi}; \tag{19}$$

$$\alpha \cdot F_{\kappa} \cdot V = N_{\text{дp}} \cdot U_{\pi} \cdot I_{\pi} - N_{\text{дp}} \cdot {}_{\Delta} P_{\text{9.(д)}} - {}_{\Delta} P_{\text{9.3.\Pi}} - {}_{\Delta} P_{\text{9KMB.0)}}, \tag{20}$$

где  $r_{\!\scriptscriptstyle \perp}$  – суммарное сопротивление цепи якоря ТД;

 $_{\Delta}P_{_{9,\mathrm{I}}}$  – потери в тяговом двигателе.

Процесс определения оптимальных нагрузочных параметров функции  $_{\Delta}P_{_{3}}=f(F_{_{\rm K}},V,I_{_{\rm J}},U_{_{\rm J}},c\Phi,N_{_{\rm Jp}})$  рассматривается при постоянном значении напряжения, подведенного к ТД и реализуемой мощности в тяге  $P_{_{\rm 9K}}={\rm const}$  без потери силы тяги, поэтому переменные величины — сила тяги  $F_{_{\rm K}}$ , скорость движения V и напряжение на зажимах ТД  $U_{_{\rm J}}$  — были приняты постоянными, что позволило исключить их из анализа и упростить решение задачи, сведя его к поиску трех неизвестных величин — тока ТД  $I_{_{\rm J}}$ , числа ТД, участвующих в работе  $N_{_{\rm Jp}}$  и магнитного потока  $c\Phi$  — и привести функцию суммарных потерь мощности к зависимости от трех переменных:  ${}_{\Delta}P_{_{\rm J}}(N_{_{\rm Jp}})={\rm f}(I_{_{\rm J}},c\Phi,N_{_{\rm Jp}})$   $\to$  min .

Для упрощения решений данной функции были приняты следующие допущения: коэффициент добавочных потерь  $k_{_{\rm I\! I}}$  считается постоянным, соответствующим длительному режиму работы ТД, сопротивление цепи якоря ТД  $r_{_{\rm I\! I}}$  принято постоянным и равным сопротивлению цепи якоря при полном поле ТД.

С учетом принятых ограничений (уравнений связи)

$$W = N_{\text{AD}} \cdot U_{\text{A}} \cdot I_{\text{A}} - \alpha \cdot F_{\text{K}} \cdot V - N_{\text{AD}} \cdot {}_{\Delta}P_{\text{9.(A)}} - {}_{\Delta}P_{\text{9.(3.II)}} - {}_{\Delta}P_{\text{9KMB.o}};$$
(21)

$$W1 = c\Phi \cdot V - U_{_{\Pi}} + I_{_{\Pi}} \cdot r_{_{\Pi}}, \tag{22}$$

функция потерь мощности  $_{\Delta}P_{_{9}}(I_{_{\rm J}},\!N_{_{\rm J}},\!c\Phi)$  была преобразована к функции Лагранжа

$$S(I_{\scriptscriptstyle \Pi}, N_{\scriptscriptstyle \Pi p}, c\Phi, \lambda, \lambda 1) =_{\scriptscriptstyle \Delta} P_{\scriptscriptstyle 9}(I_{\scriptscriptstyle \Pi}, N_{\scriptscriptstyle \Pi p}, c\Phi) + \lambda(W) + \lambda 1(W1), \qquad (23)$$

которая была приведена к системе уравнений:

$$\begin{cases}
\frac{\partial S}{\partial I_{_{A}}} = -\frac{\partial_{_{\Delta}} P_{_{3}}}{\partial I_{_{A}}} - \lambda \frac{\partial W}{\partial I_{_{A}}} - \lambda 1 \frac{\partial W1}{\partial I_{_{A}}} = 0; \\
\frac{\partial S}{\partial N_{_{Ap}}} = -\frac{\partial_{_{\Delta}} P_{_{3}}}{\partial N_{_{Ap}}} - \lambda \frac{\partial W}{\partial N_{_{Ap}}} - \lambda 1 \frac{\partial W1}{\partial N_{_{Ap}}} = 0; \\
\frac{\partial S}{\partial c \Phi} = -\frac{\partial_{_{\Delta}} P_{_{3}}}{\partial c \Phi} - \lambda \frac{\partial W}{\partial c \Phi} - \lambda 1 \frac{\partial W1}{\partial c \Phi} = 0; \\
\frac{\partial S}{\partial \lambda} = -\frac{\partial_{_{\Delta}} P_{_{3}}}{\partial \lambda} - \lambda \frac{\partial W}{\partial \lambda} - \lambda 1 \frac{\partial W1}{\partial \lambda} = 0; \\
\frac{\partial S}{\partial \lambda 1} = -\frac{\partial_{_{\Delta}} P_{_{3}}}{\partial \lambda 1} - \lambda \frac{\partial W}{\partial \lambda 1} - \lambda 1 \frac{\partial W1}{\partial \lambda 1} = 0.
\end{cases}$$

Решением системы уравнений (24) относительно числа ТД, участвующих в работе  $N_{\rm дp}$ , были получены аналитические зависимости оптимальных значений числа ТД  $N_{\rm дp\,onr}$  в зависимости от скорости движения V, силы тяги на ободе движущих колес электровоза  $F_{\rm k}$  и напряжения на зажимах ТД  $U_{\rm n}$ :

$$N_{\rm pp \, our} = \frac{-2\alpha^2 y\gamma - \alpha\beta y \sqrt{\alpha\gamma}}{4\alpha^2 \gamma^2 - \beta^2 \alpha\gamma},\tag{25}$$

где

$$\alpha = \frac{\Delta P_{\text{\tiny 3Л.H}}}{I_{\text{\tiny H}}^2} + z_2 \left( \frac{U_{\text{\tiny Д}} \cdot P_{\text{\tiny Д.H.C}}}{I_{\text{\tiny H}}^2 \cdot U_{\text{\tiny Л.H.C}}^2} \right) + (1 + k_{\text{\tiny Д}}) \frac{r_{\text{\tiny Д}}^2 \cdot \Delta P_{\text{\tiny Д.MAT.H}}}{V^2 \cdot c \Phi_{\text{\tiny H}}^2} \cdot \left( \frac{V}{V_{\text{\tiny H}}} \right)^{1.5}; \tag{26}$$

$$\beta = \frac{\Delta P_{\text{SHILH}}}{I_{\text{H}}} + z_{1} \left( \frac{U_{\text{A}} \cdot P_{\text{A.H.C}}}{I_{\text{H}} \cdot U_{\text{A.H.C}}} \right) - (1 + k_{\text{A}}) \frac{2r_{\text{A}} \cdot \Delta P_{\text{A.MAIT.H}} \cdot U_{\text{A}}}{V^{2} \cdot c \Phi_{\text{H}}^{2}} \cdot \left( \frac{V}{V_{\text{H}}} \right)^{1.5} - U_{\text{A}};$$
(27)

$$\gamma = z_0 \cdot P_{\text{\tiny J.H.c}} + (1 + k_{\text{\tiny L}}) \frac{U_{\text{\tiny A}}^2 \cdot \Delta P_{\text{\tiny J.MAI'.H}}}{V^2 \cdot c \Phi_{\text{\tiny L}}^2} \cdot (\frac{V}{V_{\text{\tiny L}}})^{1.5} - \frac{(a_1 + b_1 \cdot V + c_1 \cdot V^2) \cdot V \cdot d_1}{N} + (\frac{V}{V_{\text{\tiny L}}}) \cdot \Delta P_{\text{\tiny J.MEX.H}}; \quad (28)$$

$$y = \alpha \cdot F_{\kappa} \cdot V + (a_1 + b_1 \cdot V + c_1 \cdot V^2) \cdot V \cdot P \cdot d_1.$$
 (29)

Оптимальные значения тока  $I_{\rm д \, onr}$  и магнитного потока  $c\Phi_{\rm onr}$  работающих ТД в зависимости от силы тяги и скорости движения были получены из уравнений связи (19), (20)

$$I_{\text{д опт}} = \frac{-N_{\text{др опт}} \cdot \beta - \sqrt{(N_{\text{др опт}} \cdot \beta^2 - 4(N_{\text{др опт}} \cdot \gamma + y)}}{2N_{\text{др опт}} \cdot \alpha},$$
(30)

$$c\Phi_{\text{our}} = \frac{U_{\text{A}} - I_{\text{A ourr}} \cdot r_{\text{A}}}{V} = \frac{U_{\text{A}}}{V} - \frac{r_{\text{A}}}{V} \left( \frac{-N_{\text{Ap ourr}} \cdot \beta - \sqrt{(N_{\text{Ap ourr}} \cdot \beta^2 - 4(N_{\text{Ap ourr}} \cdot \gamma + y)}}{2N_{\text{Ap ourr}} \cdot \alpha} \right). \tag{31}$$

Найденные аналитические зависимости позволяют определить оптимальное число ТД при постоянном значении напряжения на зажимах ТД. При возможности реализовать заданные значения силы тяги и скорости движения (мощности) на нескольких соединениях ТД (с разными значениями напряжения ТД) с помощью полученных зависимостей необходимо определить оптимальное число ТД и значения КПД для каждого соединения, которые позволят оценить величину потерь мощности для каждого из режимов. Режим работы с наибольшим значением КПД (минимум потерь мощности) будет соответствовать режиму работы с оптимальным числом участвующих в работе ТД.

Таким образом, можно заключить, что данные аналитические выражения для определения оптимальных параметров регулирования мощности электровозов постоянного тока позволяют

получить оптимальные значения числа работающих ТД и их нагрузку в зависимости от заданных значений силы тяги и скорости движения во всем диапазоне нагрузочных режимов.

Полученные аналитические выражения могут быть использованы при выборе оптимальных режимов работы электровозов, составлении режимных карт и энергетических паспортов, а также в решающих автоматических устройствах регулирования мощности подвижного состава.

#### Список литературы

- 1. Филиппова, Т. А. Оптимизация режимов электростанций и энергосистем: Учебник [Текст] / Т. А. Филиппова, Ю. М. Сидоркин, А. Г. Русина / Новосибирский гос. техн. ун-т. Новосибирск, 2007. 356 с.
- 2. Розенфельд, В. Е. Теория электрической тяги: Учебник [Текст] / В. Е. Розенфельд, И. П. Исаев, Н. Н. Сидоров. М.: Транспорт, 1983. 328 с.
- 3. Курбасов, А. С. Проектирование тяговых электродвигателей: Учебное пособие [Текст] / А. С. Курбасов, В. И. Седов, Л. Н. Сорин. М.: Транспорт, 1987. 536 с.
- 4. Некрасов, О. А. Расчетное исследование отключения части тяговых двигателей электровоза постоянного тока с целью снижения расхода энергии на тягу [Текст] / О. А. Некрасов, В. И. Рахманинов // Параметры и технические особенности перспективных электровозов: Сб. науч. тр. ВНИИЖТа. М.: Транспорт, 1982. Вып. 641. С. 43 55.
- 5. Правила тяговых расчетов для поездной работы [Текст] / А. Н. Долганов, О. А. Некрасов и др. М.: Транспорт, 1985. 287 с.
- 6. Крыгин, А. Н. Математическая модель оптимального регулирования мощности электровоза в тяговом режиме [Текст] / А. Н. Крыгин // Моделирование. Теория, методы и средства: Материалы VI междунар. науч.-практ. конф. / Южно-Рос. политехн. ун-т. Новочеркасск, 2006. С. 52 54.
- 7. Выгодский, М. Я. Справочник по высшей математике [Текст] / М. Я. Выгодский. М.: Наука, 1975. 872 с.
- 8. Электрические системы. Электрические расчеты, программирование и оптимизация режимов [Текст] / В. А. Веников, В. И. Горушкин и др. М.: Высшая школа, 1973. 318 с.

#### References

- 1. Filippova T. A., Sidorkin M. Yu., Rusina A. G. *Optimizatsiia rezhimov elektrostantsii i energosistem* (Optimization of power plants and power systems). Novosibirsk: NSU, 2007, 356 p.
- 2. Rosenfeld V. E., Isaev I. P., Sidorov N. N. Teoriia elektricheskoi tiagi (Theory of electric traction). Moscow: Transport, 1983, 328 p.
- 3. Kurbasov A. S., Sedov I. V., Sorin L. N. *Proektirovanie tiagovykh elektrodvigatelei* (Design of traction motors). Moscow: Transport, 1987, 536 p.
- 4. Nekrasov O. A., Rachmaninoff, V. I. Numerical study off of the traction motors of the locomotive DC with the aim of reducing energy consumption for traction [Raschetnoe issledovanie otkliucheniia chasti tiagovykh dvigatelei elektrovoza postoiannogo toka s tsel'iu snizheniia raskhoda energii na tiagu]. *Parametry i tekhnicheskie osobennosti perspektivnykh elektrovozov Parameters and technical features of promising electric.* 1982, Vol. 641, pp. 43 55.
- 5. Pravila tiagovykh raschetov dlia poezdnoi raboty (Rules of traction calculations for train operation). Moscow: Transport, 1985, 287 p.
- 6. Krygin A. N. Mathematical model of optimal power control of an electric locomotive in traction mode [Matematicheskaia model' optimal'nogo regulirovaniia moshchnosti elek-trovoza v tiagovom rezhime]. *Modelirovanie. Teoriia, metody i sredstva Simulation. Theory, methods and tools.* 2006, pp. 52 54.
- 7. Vygotsky M. J. *Spravochnik po vysshei matematike* (Handbook of higher mathematics). Moscow: Nauka, 1975, 872 p.
- 8. Venikov V. A., Galushkin V. I. Markovych, I. M., Melnikov N. A., Fedorov D. A. *Elektricheskie raschety, programmirovanie i optimizatsiia rezhimov* (Electric system. Electrical calculations, programming and optimization). Moscow: Higher school, 1973, 318 p.

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

#### Крыгин Анатолий Николаевич

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

Кандидат технических наук, доцент, ОмГУПС.

Тел.: +7 (3812) 31-18-66. E-mail: krygin48@mail.ru

#### Плаксин Алексей Владимирович

Западно-Сибирская железная дорога — филиал ОАО «РЖД».

Вокзальная магистраль, д. 12, г. Новосибирск, 630004, Российская Федерация.

Ведущий инженер Западно-Сибирской железной дороги – филиала ОАО «РЖД».

E-mail: 111Marina@ngs.ru

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Крыгин, А. Н. Математическая модель оптимального регулирования мощности электровозов постоянного тока в тяговом режиме и способ ее решения [Текст] / А. Н. Крыгин, А. В. Плаксин // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. — Омск. — 2016. — 2(26).

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

#### Krygin Anatoly Nikolaevich

Omsk State Transport University (OSTU). 35, Marx st., Omsk, 644046, the Russion Federation.

Ph. D., senior lecturer, OSTU. Phone: +7 (3812) 31-18-66.

E-mail: krygin48@mail.ru

#### Plaksin Alexey Vladimirovich

The West Siberian railway – branch of JSC «RZD». 12, Vokzalnaya Magistral, Novosibirsk, 630004, the Russion Federation.

Leading engineer of the West Siberian railway – branch of JSC «RZD».

E-mail: 111Marina@ngs.ru

#### BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Krygin A. N., Plaksin A. V. Mathematical model of optimum power control of DC electric locomotive in traction mode and the method of its solution. Journal of Transsib Railway Studies, 2016, vol. 26, no. 2, pp. 41-50. (In Russian).

УДК 629.4

#### В. А. Нехаев

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

# ВЛИЯНИЕ ПРОДОЛЬНОЙ НЕРАВНОУПРУГОСТИ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ПУТИ НА ДИНАМИЧЕСКОЕ ПОВЕДЕНИЕ ПОДВИЖНОГО СОСТАВА. Ч. 3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОБЛАСТЕЙ КОМБИНАЦИОННЫХ ПАРАМЕТРИЧЕСКИХ РЕЗОНАНСОВ

Аннотация. В статье приведены результаты влияния продольного мультипликативного возмущения от железнодорожного пути на подвижной состав. Изложена методика нахождения областей комбинационных резонансов разностного типа, опирающаяся на теорему о разделении движения динамической системы на медленные и быстрые составляющие. Доказан факт, что резонансная скорость движения железнодорожного экипажа — это не конкретное числовое значение, а зона, ширина которой в основном зависит от коэффициента мультипликативного возбуждения.

**Ключевые слова:** подвижной состав, железнодорожный путь, продольная неравноупругость пути, простые и комбинационные параметрические резонансы, резонансная скорость движения.

#### Victor A. Nekhaev

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

# THE EFFECT OF LONGITUDINAL NON-EQUAL-ELASTICITY OF RAILWAY TO THE ROLLING STOCK DYNAMIC. PART 3. THE IDENTIFY AREAS OF RAMAN PARAMETRIC RESONANCE

**Abstract.** The article devoted to results of the longitudinal multiplicative perturbation effect from railway track in relation to rolling stock. There is the technique for finding of difference type Raman resonances areas, which based on the theory of division in slow and fast components for motion of dynamic system. It proves a fact that the RMS-velocity

for motion of the train is not a specific numerical value, but that is an area for which the width depends on the multiplicative factor driving.

**Keywords:** rolling stock, railroad, longitudinal non-equal-elasticity of railway, simple and Raman parametric resonances, RMS-velocity for motion.

Области простых параметрических резонансов достаточно легко отыскиваются с помощью либо обобщенных определителей Хилла [1], что показано в предшествующих статьях автора, либо тригонометрическим методом, а зоны параметрических комбинационных резонансов разностного типа найти достаточно сложно. И поэтому часто приходится прибегать к помощи интегродифференциальных уравнений (эта методика рекомендована немецким ученым Г. Шмидтом [2], ибо строить каждое последующее приближение проще, чем с помощью любого другого метода).

Поставим задачу нахождения этих областей при помощи приближенных способов, например, с помощью асимптотического метода разделения движения системы на медленные и быстрые составляющие [3]. Поэтому рассмотрим условную двухмассовую расчетную схему, в которой нижняя масса опирается на упругий элемент, жесткость которого меняется во времени. Физически это может быть условный двухмассовый одноосный железнодорожный экипаж (локомотив или вагон), движущийся по железнодорожному пути, жесткость которого зависит от пройденного вдоль оси пути расстояния x.

Воспользовавшись аппаратом уравнений Лагранжа второго рода, нетрудно записать математическую модель движения механической системы в виде (считая, что обобщенные координаты отсчитываются от положений статического равновесия):

$$\begin{cases} m_{1}\ddot{q}_{1} + b_{1,1}\dot{q}_{1} - b_{1,2}\dot{q}_{2} + c_{1,1}q_{1} - c_{1,2}q_{2} = 0; \\ m_{2}\ddot{q}_{2} - b_{2,1}\dot{q}_{1} + b_{2,2}\dot{q}_{2} - c_{2,1}q_{1} + c_{2,2}q_{2} - 2\mu\varkappa c_{0}\cos2\Omega tq_{2} = 0, \end{cases}$$
(1)

где  $c_{2,2}=\mathcal{M}_1+\mathcal{M}_0$ ;  $2\mu=\tilde{\mathcal{M}}_1/\mathcal{M}_0$  – коэффициент параметрического возбуждения;  $\mathcal{M}_0$  – средняя жесткость упругого элемента, на который опирается вторая масса.

Представим уравнения (1) в векторно-матричной форме записи:

$$A\ddot{\vec{q}} + B\dot{\vec{q}} + C\vec{q} - 2\mu\varkappa_0\cos 2\Omega t H\vec{q} = 0,$$
 (2)

здесь обозначено:

$$\begin{cases}
A = \begin{pmatrix} m_1 & 0 \\ 0 & m_2 \end{pmatrix}; B = \begin{pmatrix} \beta_1 & -\beta_1 \\ -\beta_1 & \beta_1 + \beta_2 \end{pmatrix}; \\
C = \begin{pmatrix} \mathcal{H}_1 & -\mathcal{H}_1 \\ -\mathcal{H}_1 & \mathcal{H}_1 + \mathcal{H}_0 \end{pmatrix}; H = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}; \\
\vec{q} = \begin{pmatrix} q_1 \\ q_2 \end{pmatrix}.
\end{cases}$$
(3)

Перейдем в уравнении (2) к нормальным координатам, что, можно полагать, упростит решение задачи:

$$\vec{q} = U \vec{\gamma},\tag{4}$$

следовательно, вместо (1) получим такую систему дифференциальных уравнений:

$$\ddot{\vec{\chi}} + \tilde{B}\dot{\vec{\chi}} + \tilde{C}\vec{\chi} - 2\mu\cos 2\Omega t \tilde{H}\vec{\chi} = 0, \tag{5}$$

где

$$\begin{cases}
U = \begin{pmatrix} -0.856 & 0.068 \\ -0.563 & -0.998 \end{pmatrix}; A^{-1}B = \begin{pmatrix} 0.3 & -0.3 \\ -3 & 5.5 \end{pmatrix}; A^{-1}C = \begin{pmatrix} 10 & -10 \\ -100 & 150 \end{pmatrix}; \\
A^{-1}H = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0.1 \end{pmatrix}; U^{-1}A^{-1}BU = \tilde{B} = \begin{pmatrix} 0.14 & 0.079 \\ 0.539 & 5.66 \end{pmatrix}; \\
U^{-1}A^{-1}CU = \tilde{C} = \begin{pmatrix} 3.189 & 0 \\ 0 & 156.811 \end{pmatrix}; \\
U^{-1}A^{-1}HU = \tilde{H} = \begin{pmatrix} 2.217 & 3.929 \\ 26.962 & 47.783 \end{pmatrix}; \\
\tilde{\chi} = \begin{pmatrix} \chi_1 \\ \chi_2 \end{pmatrix}; k_0 = \begin{pmatrix} 1.786 \\ 12.522 \end{pmatrix}.
\end{cases} (6)$$

Здесь заметим, что новые обобщенные координаты  $\chi_1$  и  $\chi_2$  в выражении (5) связаны между собой через коэффициенты матриц диссипации и параметрического возбуждения, причем значения коэффициентов параметрического возмущения, относящиеся ко второму дифференциальному уравнению системы (5) по крайней мере на порядок выше, чем они же, но в первом дифференциальном уравнении системы (5). В выражениях (6) последний вектор представляет собой собственные парциальные частоты механической системы. Более того, необходимо выяснить, является ли диссипация малой, воспользовавшись известным критерием:

$$\frac{\left\| \left( A^{-1} B \right)^{2} \right\|}{\left\| A^{-1} C \right\|} \ll 1. \tag{7}$$

Здесь скобки  $\|...\|$  означают вычисление какой-либо нормы матрицы (для случая N=1 критерий (7) превращается в соотношение  $n < k_0$ , где n – коэффициент демпфирования, а  $k_0$  – собственная частота консервативной механической системы). Для нашего примера (N=2), а этот критерий равен: 0,206 << 1, следовательно, в нашей механической системе можно считать диссипацию малой. Тогда можно в первом приближении пренебречь недиагональными элементами матрицы  $\tilde{B}$ .

Однако области комбинационных резонансов зависят от коэффициентов трения и чем они больше, тем шире отыскиваемые зоны, другими словами, трение оказывает негативное влияние на зоны комбинационных резонансов. Поэтому мы не будем пренебрегать недиагональными элементами указанной выше матрицы.

С учетом малости диссипации в системе перепишем (5) так:

$$\ddot{\vec{\gamma}} + \tilde{C}\vec{\gamma} = -\tilde{B}\dot{\vec{\gamma}} + 2\mu\cos 2\Omega t\tilde{H}\vec{\gamma}.$$
 (8)

Правая часть соотношения (8) является малой величиной, собственно для этих целей мы изучали критерий (7), указывающий на малость диссипативных сил, поэтому в дальнейшем считаем коэффициенты диссипативных сил порядка  $\mu$ . Отметим, что хотя по виду система дифференциальных уравнений напоминает линейную систему, но ведет она себя как некоторая нелинейная система. Поэтому чтобы ее приближенно проинтегрировать обратимся к асимптотическому методу разделения движений, суть которого состоит в том, что правые части дифференциальных уравнений усредняются по быстрым переменным (часто эти методы называются методами осреднения, или методами разделения движений). Они играют важную роль при изучении уравнений вида [3]:

$$\begin{cases} \dot{x} = \mu X (x, y, \mu); \\ \dot{y} = Y_0(x, y) + \mu Y (x, y, \mu), \end{cases}$$
(9)

здесь x и y — некоторые векторы, а  $\mu$  — малый параметр. Заметим, что подобные уравнения часто встречаются в различных задачах физики и механики, и, в частности, они типичны для

широкого класса задач теории колебаний. Их особенность состоит в том, что часть переменных (это компоненты вектора x) меняется медленно, а другая часть (это компоненты вектора y) — быстро. В дальнейшем мы будем называть эти переменные соответственно медленными и быстрыми.

Порождающее уравнение имеет вид:

$$\ddot{\overline{\chi}} + \tilde{C}\overline{\chi} = 0, \tag{10}$$

здесь  $\tilde{C} = diag\left(k_{01}^2 \ k_{02}^2\right)$ . Введем так называемые переменные Ван-дер-Поля:

$$\begin{cases} \chi_1 = x_1 \cos y_1; & \dot{\chi}_1 = -k_{01} x_2 \sin y_1; \\ \chi_2 = x_2 \cos y_2; & \dot{\chi}_2 = -k_{02} x_2 \sin y_2. \end{cases}$$
 (11)

Дальнейшие преобразования приводят нас к следующему:

$$\begin{cases} \dot{x}_{1}\cos y_{1} - x_{1}\dot{y}_{1}\sin y_{1} = -k_{01}x_{1}\sin y_{1}; \\ \dot{x}_{2}\cos y_{2} - x_{2}\dot{y}_{2}\sin y_{2} = -k_{02}x_{2}\sin y_{2}; \\ -k_{01}\left(\dot{x}_{1}\sin y_{1} + x_{1}\dot{y}_{1}\cos y_{1}\right) = -k_{01}^{2}x_{1}\cos y_{1} + b_{1,1}k_{01}x_{1}\sin y_{1} + \\ +b_{1,2}k_{02}x_{2}\sin y_{2} + 2\mu h_{1,1}x_{1}\cos 2\Omega t\cos y_{1} + 2\mu h_{1,2}x_{2}\cos 2\Omega t\cos y_{2}; \\ -k_{02}\left(\dot{x}_{2}\sin y_{2} + x_{2}\dot{y}_{2}\cos y_{2}\right) = -k_{02}^{2}x_{2}\cos y_{2} + b_{2,1}k_{01}x_{1}\sin y_{1} + \\ +b_{2,2}k_{02}x_{2}\sin y_{2} + 2\mu h_{2,1}x_{1}\cos 2\Omega t\cos y_{1} + 2\mu h_{2,2}x_{2}\cos 2\Omega t\cos y_{2}. \end{cases}$$

$$(12)$$

Эту систему уравнений необходимо разрешить относительно неизвестных производных первого порядка:

$$\begin{aligned}
\dot{x}_{1} &= -\frac{1}{2}b_{1,1}x_{1}(1-\cos2y_{1}) - \frac{1}{2}b_{1,2}\frac{k_{02}}{k_{01}}x_{2}\Big[\cos(y_{2}-y_{1})-\cos(y_{2}+y_{1})\Big] - \\
-\mu\frac{h_{1,1}}{k_{01}}x_{1}\cos z\sin2y_{1} - \mu\frac{h_{1,2}}{k_{01}}x_{2}\cos z\Big[\sin(y_{1}+y_{2})+\sin(y_{1}-y_{2})\Big]; \\
\dot{x}_{2} &= -\frac{1}{2}b_{2,1}\frac{k_{01}}{k_{02}}x_{1}\Big[\cos(y_{1}-y_{2})-\cos(y_{1}+y_{2})\Big] - \frac{1}{2}b_{2,2}(1-\cos2y_{2}) - \\
-\mu\frac{h_{2,1}}{k_{02}}x_{1}\Big[\sin(y_{1}+y_{2})+\sin(y_{1}-y_{2})\Big] - \mu\frac{h_{2,2}}{k_{02}}x_{2}\cos z\sin2y_{2}; \\
\dot{y}_{1} &= k_{01} - \frac{1}{2}b_{1,1}\sin2y_{1} - \frac{1}{2}b_{1,2}\frac{k_{02}}{k_{01}}\frac{x_{2}}{x_{1}}\Big[\sin(y_{2}+y_{1})+\sin(y_{2}-y_{1})\Big] - \\
-\mu\frac{h_{1,1}}{k_{01}}\cos z(1+\cos2y_{1}) - \mu\frac{h_{1,2}}{k_{01}}\frac{x_{2}}{x_{1}}\cos z\Big[\cos(y_{1}+y_{2})+\cos(y_{2}-y_{1})\Big]; \\
\dot{y}_{2} &= k_{02} - \frac{1}{2}b_{2,1}\frac{k_{01}}{k_{02}}\frac{x_{1}}{x_{2}}\Big[\sin(y_{1}+y_{2})+\sin(y_{1}-y_{2})\Big] - \frac{1}{2}b_{2,2}\sin2y_{2} - \\
-\mu\frac{h_{2,1}}{k_{02}}\frac{x_{1}}{x_{2}}\cos z\Big[\cos(y_{1}-y_{2})+\cos(y_{1}+y_{2})\Big] - \mu\frac{h_{2,2}}{k_{02}}\cos z(1+\cos2y_{2}); \\
\dot{z} &= 2\Omega.
\end{aligned}$$

Система дифференциальных уравнений (13) обладает двумя медленными переменными (это амплитуды  $x_1$  и  $x_2$ ) и тремя быстрыми переменными (это фазы  $y_1$ ,  $y_2$  и z). Последнюю переменную  $z=2\Omega t$  мы добавили, что обычно делается при исследовании таких систем дифференциальных уравнений. Сделаем последний шаг, состоящий в тригонометрических преобразованиях:

$$\begin{aligned}
\cos z \sin 2y_{1} &= \frac{1}{2} \left[ \sin \left( 2y_{1} + z \right) + \sin \left( 2y_{1} - z \right) \right]; \\
\cos z \left[ \sin \left( y_{1} + y_{2} \right) - \sin \left( y_{2} - y_{1} \right) \right] &= \frac{1}{2} \left[ \sin \left( y_{1} + y_{2} + z \right) + \sin \left( y_{2} + y_{1} - z \right) - \sin \left( y_{2} - y_{1} + z \right) - \sin \left( y_{2} - y_{1} - z \right) \right]; \\
\cos z \cos 2y_{1} &= \frac{1}{2} \left[ \cos \left( z - 2y_{1} \right) - \cos \left( z + 2y_{1} \right) \right]; \\
\cos z \left[ \cos \left( y_{1} + y_{2} \right) + \cos \left( y_{1} - y_{2} \right) \right] &= \frac{1}{2} \left[ \cos \left( y_{1} + y_{2} - z \right) - \cos \left( y_{1} + y_{2} + z \right) + \cos \left( z - y_{2} + y_{1} \right) - \cos \left( y_{2} - y_{1} + z \right) \right]; \\
\cos z \sin 2y_{2} &= \frac{1}{2} \left[ \sin \left( 2y_{2} + z \right) + \sin \left( 2y_{2} - z \right) \right]; \\
\cos z \cos 2y_{2} &= \frac{1}{2} \left[ \cos \left( 2y_{2} + z \right) + \cos \left( 2y_{2} - z \right) \right].
\end{aligned}$$
(14)

Следовательно, подстановка (14) в (13) приводит нас к такой системе дифференциальных уравнений:

$$\begin{split} & \left[ \dot{x}_{1} = -\frac{1}{2} b_{1,1} x_{1} (1 - \cos 2 y_{1}) - \frac{1}{2} b_{1,2} \frac{k_{02}}{k_{01}} x_{2} \Big[ \cos \left( y_{2} - y_{1} \right) - \cos \left( y_{1} + y_{2} \right) \Big] - \\ & - \frac{1}{2} \mu \frac{h_{1,1}}{k_{01}} x_{1} \Big[ \sin \left( 2 y_{1} + z \right) + \sin \left( 2 y_{1} - z \right) \Big] - \frac{1}{2} \mu \frac{h_{1,2}}{k_{01}} x_{2} \Big[ \sin \left( y_{1} + y_{2} + z \right) + \\ & + \sin \left( y_{1} + y_{2} - z \right) - \sin \left( y_{2} - y_{1} + z \right) - \sin \left( y_{2} - y_{1} - z \right) \Big]; \\ & \dot{x}_{2} = - \frac{1}{2} b_{2,1} \frac{k_{01}}{k_{02}} x_{1} \Big[ \cos \left( y_{1} - y_{2} \right) - \cos \left( y_{1} + y_{2} \right) \Big] - \frac{1}{2} b_{2,2} x_{2} \left( 1 - \cos 2 y_{2} \right) - \\ & - \frac{1}{2} \mu \frac{h_{2,1}}{k_{02}} x_{1} \Big[ \sin \left( y_{1} + y_{2} + z \right) + \sin \left( y_{1} + y_{2} - z \right) - \sin \left( y_{2} - y_{1} + z \right) - \\ & - \sin \left( y_{2} - y_{1} - z \right) \Big] - \frac{1}{2} \mu \frac{h_{2,2}}{k_{02}} x_{2} \Big[ \cos \left( z - 2 y_{2} \right) - \cos \left( z + 2 y_{2} \right) \Big]; \\ & \dot{y}_{1} = k_{01} - \frac{1}{2} b_{1,1} \sin 2 y_{1} - \frac{1}{2} b_{1,2} \frac{k_{02}}{k_{01}} \frac{x_{2}}{x_{1}} \Big[ \sin \left( y_{2} + y_{1} \right) + \sin \left( y_{2} - y_{1} \right) \Big] - \\ & - \mu \frac{h_{1,1}}{k_{01}} \cos z - \frac{1}{2} \mu \frac{h_{1,1}}{k_{01}} \Big[ \cos \left( z - 2 y_{1} \right) - \cos \left( z + 2 y_{1} \right) \Big] - \\ & - \frac{1}{2} \mu \frac{h_{1,2}}{k_{01}} \frac{x_{2}}{x_{1}} \Big[ \cos \left( y_{1} + y_{2} - z \right) - \cos \left( y_{1} + y_{2} + z \right) + \\ & + \cos \left( z - y_{2} + y_{1} \right) - \cos \left( y_{2} - y_{1} + z \right) \Big]; \\ & \dot{y}_{2} = k_{02} - \frac{1}{2} b_{2,1} \frac{k_{01}}{k_{02}} \frac{x_{1}}{x_{2}} \Big[ \sin \left( y_{1} + y_{2} \right) + \sin \left( y_{1} - y_{2} \right) \Big] - \frac{1}{2} b_{2,2} \sin 2 y_{2} - \\ & - \frac{1}{2} \mu \frac{h_{2,1}}{k_{02}} \frac{x_{1}}{x_{2}} \Big[ \cos \left( y_{1} - y_{2} + z \right) + \cos \left( y_{1} - y_{2} - z \right) + \cos \left( y_{1} + y_{2} + z \right) + \\ & + \cos \left( y_{1} + y_{2} - z \right) \Big] - \mu \frac{h_{2,2}}{k_{02}} \cos z - \frac{1}{2} \mu \frac{h_{2,2}}{k_{02}} \Big[ \cos \left( 2 y_{2} + z \right) + \cos \left( 2 y_{2} - z \right) \Big]; \\ & \dot{z} = 2 \Omega. \end{split}$$

Установим возможные резонансы в системе (15). Для этого достаточно обратиться к разностям переменных:

 $y_1 = y_2$  – это внутренний резонанс в систем, возникающий тогда, когда  $k_{01} = k_{02}$ ;

 $z = 2y_1$  – это главная область параметрического резонанса для первого груза;

 $z = y_1 + y_2 -$ это комбинационный параметрический резонанс суммарного типа (известно, что такие резонансы возможны только в канонических системах, к которым исследуемая система не относится, ибо обладает диссипативными силами);

 $z = y_2 - y_1 -$ это комбинационный параметрический резонанс разностного типа (главная цель наших исследований);

 $z = 2y_2$  – это главная область параметрического резонанса для второго груза.

Как уже было сказано ранее, главные области параметрических резонансов мы будем отыскивать с помощью обобщенных определителей Хилла, но тем не менее укажем путь их нахождения и рассматриваемым методом. Примем, что

$$\theta = z - 2y_1 \tag{16}$$

И

$$2(\Omega - k_{01}) = \mu h. \tag{17}$$

Составим дифференциальное уравнение для медленной переменной  $\theta$ :

$$\dot{\theta} = \dot{z} - 2\dot{y}_{1} = 2\Omega - 2k_{01} + b_{1,1}\sin 2y_{1} + b_{1,2}\frac{k_{02}}{k_{01}}\frac{x_{2}}{x_{1}}\Big[\sin(y_{2} + y_{1}) + \sin(y_{2} - y_{1})\Big] + \\
+2\mu\frac{h_{1,1}}{k_{01}}\cos z + \mu\frac{h_{1,1}}{k_{01}}\Big[\cos(z - 2y_{1}) - \cos(z + 2y_{1})\Big] + \mu\frac{h_{1,2}}{k_{01}}\frac{x_{2}}{x_{1}}\Big[\cos(y_{1} + y_{2} - z) - \\
-\cos(y_{1} + y_{2} + z) + \cos(z - y_{2} + y_{1}) - \cos(y_{2} - y_{1} + z)\Big] = \mu h + \\
+b_{1,1}\sin(z - \theta) + b_{1,2}\frac{k_{02}}{k_{01}}\frac{x_{2}}{x_{1}}\Big[\sin\left(y_{2} + \frac{z - \theta}{2}\right) + \sin\left(y_{2} - \frac{z - \theta}{2}\right)\Big] + 2\mu\frac{h_{1,1}}{k_{01}}\cos z + \\
+\mu\frac{h_{1,1}}{k_{01}}\Big[\cos\theta - \cos(2z - \theta)\Big] + \mu\frac{h_{1,2}}{k_{01}}\frac{x_{2}}{x_{1}}\Big[\cos\left(y_{2} - \frac{z + \theta}{2}\right) - \cos\left(y_{2} + \frac{3z - \theta}{2}\right) + \\
+\cos\left(\frac{3z - \theta}{2} - y_{2}\right) - \cos\left(y_{2} + \frac{z + \theta}{2}\right)\Big].$$
(18)

Осуществим соответствующие замены в системе (15) и напишем вместо третьего уравнения выражение (18), тогда после несложных преобразований получим:

$$\begin{vmatrix} \dot{x}_{1} = -\frac{1}{2}b_{1,1}x_{1} \Big[ 1 - \cos(z - \theta) \Big] - \frac{1}{2}b_{1,2}\frac{k_{02}}{k_{01}}x_{2} \Big[ \cos\left(y_{2} - \frac{z - \theta}{2}\right) - \\ -\cos\left(y_{2} + \frac{z - \theta}{2}\right) \Big] - \frac{1}{2}\mu\frac{h_{1,1}}{k_{01}}x_{1} \Big[ \sin(2z - \theta) - \sin\theta \Big] - \\ - \frac{1}{2}\mu\frac{h_{1,2}}{k_{01}}x_{2} \Big[ \sin\left(\frac{3z - \theta}{2} + y_{2}\right) + \sin\left(y_{2} - \frac{z + \theta}{2}\right) - \\ -\sin\left(y_{2} + \frac{z + \theta}{2}\right) - \sin\left(y_{2} - \frac{3z - \theta}{2}\right) \Big]; \\ \dot{x}_{2} = -\frac{1}{2}b_{2,1}\frac{k_{01}}{k_{02}}x_{1} \Big[ \cos\left(\frac{z - \theta}{2} - y_{2}\right) - \cos\left(\frac{z - \theta}{2} + y_{2}\right) \Big] - \\ -\frac{1}{2}b_{2,2}x_{2} (1 - \cos2y_{2}) - \frac{1}{2}\mu\frac{h_{2,1}}{k_{02}}x_{1} \Big[ \sin\left(\frac{3z - \theta}{2} + y_{2}\right) + \sin\left(y_{2} - \frac{z + \theta}{2}\right) - \\ -\sin\left(y_{2} + \frac{z + \theta}{2}\right) - \sin\left(y_{2} - \frac{3z - \theta}{2}\right) \Big] - \frac{1}{2}\mu\frac{h_{2,2}}{k_{02}}x_{2} \Big[ \cos(z - 2y_{2}) - \cos(z + 2y_{2}) \Big]; \\ \dot{\theta} = \mu h + b_{1,1}\sin(z - \theta) + b_{1,2}\frac{k_{02}}{k_{01}}\frac{x_{2}}{x_{1}} \Big[ \sin\left(y_{2} + \frac{z - \theta}{2}\right) + \sin\left(y_{2} - \frac{z - \theta}{2}\right) \Big] + \\ + 2\mu\frac{h_{1,1}}{k_{01}}\cos z + \mu\frac{h_{1,1}}{k_{01}} \Big[ \cos\theta - \cos(2z - \theta) \Big] + \mu\frac{h_{1,2}}{k_{01}}\frac{x_{2}}{x_{1}} \Big[ \cos\left(y_{2} - \frac{z + \theta}{2}\right) - \\ -\cos\left(y_{2} + \frac{3z - \theta}{2}\right) + \cos\left(\frac{3z - \theta}{2} - y_{2}\right) - \cos\left(y_{2} + \frac{z + \theta}{2}\right) \Big]; \\ \dot{y}_{2} = k_{02} - \frac{1}{2}b_{2,1}\frac{k_{01}}{k_{02}}\frac{x_{1}}{x_{2}} \Big[ \sin\left(\frac{z - \theta}{2} + y_{2}\right) + \sin\left(\frac{z - \theta}{2} - y_{2}\right) \Big] - \frac{1}{2}b_{2,2}\sin2y_{2} - \\ -\frac{1}{2}\mu\frac{h_{2,1}}{k_{02}}\frac{x_{1}}{x_{2}} \Big[ \cos\left(\frac{3z - \theta}{2} - y_{2}\right) + \cos\left(\frac{z + \theta}{2} + y_{2}\right) + \cos\left(\frac{3z - \theta}{2} + y_{2}\right) + \\ + \cos\left(y_{2} - \frac{z + \theta}{2}\right) \Big] - \mu\frac{h_{2,2}}{k_{02}}\cos z - \frac{1}{2}\mu\frac{h_{2,2}}{k_{02}}\Big[\cos(2y_{2} + z) + \cos(2y_{2} - z)\Big]; \\ \dot{z} = 2\Omega. \end{aligned}$$

Усредняя систему (19) по быстрым переменным z и  $y_2$  на бесконечном интервале времени, найдем:

$$\begin{cases} \dot{x}_{1} = -\frac{1}{2}b_{1,1}x_{1} + \frac{1}{2}\mu\frac{h_{1,1}}{k_{01}}x_{1}\sin\theta; \\ \dot{x}_{2} = -\frac{1}{2}b_{2,2}x_{2}; \\ \dot{\theta} = \mu h + \mu\frac{h_{1,1}}{k_{01}}\cos\theta. \end{cases}$$
(20)

Так как на границе зоны неустойчивости решение должно носить стационарный характер, то, отбрасывая второе уравнение этой системы (оно дает нам тривиальное решение  $x_2 = 0$ ), имеем:

$$\begin{cases}
0 = \frac{1}{2} \left( -b_{1,1} + \mu \frac{h_{1,1}}{k_{01}} \sin \overline{\theta} \right) \overline{x}; \\
0 = \mu h + \mu \frac{h_{1,1}}{k_{01}} \cos \overline{\theta}.
\end{cases}$$
(21)

Нетрудно из выражений (21) получить формулу для вычисления границ главной области параметрического резонанса для первого груза (рисунок 1):

$$\left(\frac{\Omega}{k_{01}}\right)_{1,2} = 1 \pm \frac{\sqrt{\mu^2 h_{1,1}^2 - b_{1,1}^2 k_{01}^2}}{2k_{01}^2}.$$
(22)

Критическое значение коэффициента параметрического возбуждения для главной области неустойчивости первого груза равно 0,113.

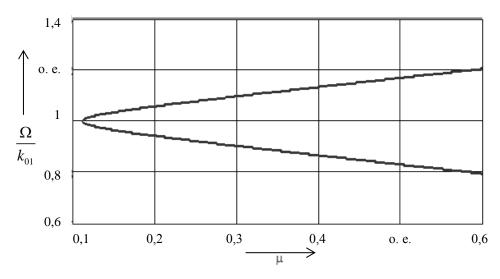


Рисунок 1 – Главная зона неустойчивости для первого груза, полученная асимптотическим методом разделения движений на «быстрые» и «медленные» составляющие

Обратимся к главной цели нашего исследования – поиску границ параметрического комбинационного резонанса разностного типа. Пусть выполняются следующие соотношения:

$$\begin{cases} \theta = z - y_2 + y_1; \\ 2\Omega - k_{02} + k_{01} = \mu h. \end{cases}$$
 (23)

Продифференцируем первое соотношение системы (23) по времени и определим дифференциальное уравнение для медленной переменной θ:

$$\begin{split} \dot{\theta} &= \dot{z} - \dot{y}_2 + \dot{y}_1 = 2\Omega - k_{02} + k_{01} + \frac{1}{2}b_{2,1}\frac{k_{01}}{k_{02}}\frac{x_1}{x_2} \Big[ \sin \big( y_2 - z + \theta \big) - \sin \big( z - \theta \big) \Big] + \frac{1}{2}b_{2,2}\sin 2y_2 + \\ &+ \frac{1}{2}\mu \frac{h_{2,1}}{k_{02}}\frac{x_1}{x_2} \Big[ \cos \theta + \cos \big( 2z - \theta \big) + \cos \big( 2y_2 - \theta \big) + \cos \big( 2z - 2y_2 - \theta \big) \Big] + \mu \frac{h_{2,2}}{k_{02}}\cos z + \frac{1}{2}\mu \frac{h_{2,2}}{k_{02}} \times \\ &\times \Big[ \cos \big( 2y_2 + z \big) + \cos \big( 2y_2 - z \big) \Big] - \frac{1}{2}b_{1,1}\sin \big( 2\theta - 2z + 2y_2 \big) - \frac{1}{2}b_{1,2}\frac{k_{02}}{k_{01}}\frac{x_2}{x_1} \Big[ \sin \big( y_2 - z + \theta \big) + \sin \big( z - \theta \big) \Big] - \mu \frac{h_{1,1}}{k_{01}}\cos z - \frac{1}{2}\mu \frac{h_{1,1}}{k_{01}} \Big[ \cos \big( 3z - 2y_2 - 2\theta \big) - \cos \big( 2y_2 - z + 2\theta \big) \Big] - \frac{1}{2}\mu \frac{h_{1,2}}{k_{01}}\frac{x_2}{x_1} \Big[ \cos \big( 2y_2 - 2z + \theta \big) - \cos \big( 2y_2 - \theta \big) + \cos \theta - \cos \big( 2z - \theta \big) \Big]. \end{split}$$

Теперь в системе (15) заменим производную  $dy_1/dt$  выражением (24), а в остальных уравнениях выполним необходимые тригонометрические преобразования. Тогда получим вместо (15) следующую систему дифференциальных уравнений, в которой уже будет только две быстрые переменные – z и  $y_2$  – и три медленные переменные –  $x_1$ ,  $x_2$  и  $\theta$ :

$$\begin{split} & \left[ \dot{x}_{1} = -\frac{1}{2} b_{1,1} x_{1} \left[ 1 - \cos 2 \left( y_{2} - z + \theta \right) \right] - \frac{1}{2} b_{1,2} \frac{k_{02}}{k_{01}} x_{2} \left[ \cos \left( z - \theta \right) - \cos \left( y_{2} - z + \theta \right) \right] - \right. \\ & \left. - \frac{1}{2} \mu \frac{h_{1,1}}{k_{01}} x_{1} \left[ \sin \left( 2 y_{2} - z + 2 \theta \right) + \sin \left( 2 y_{2} - 3 z + 2 \theta \right) \right] - \frac{1}{2} \mu \frac{h_{1,2}}{k_{01}} x_{2} \left[ \sin \left( \theta - 2 y_{2} \right) + \right. \\ & \left. + \sin \left( 2 y_{2} - 2 z + \theta \right) - \sin \left( 2 z - \theta \right) + \sin \theta \right]; \\ & \dot{x}_{2} = - \frac{1}{2} b_{2,1} \frac{k_{01}}{k_{02}} x_{1} \left[ \cos \left( z - \theta \right) - \cos \left( y_{2} - z + \theta \right) \right] - \frac{1}{2} b_{2,2} x_{2} \left[ 1 - \cos 2 y_{2} \right] - \\ & \left. - \frac{1}{2} \mu \frac{h_{2,1}}{k_{02}} x_{1} \left[ \sin \left( \theta - 2 y_{2} \right) + \sin \left( 2 y_{2} - 2 z + \theta \right) - \sin \left( 2 z - \theta \right) + \sin \theta \right] - \frac{1}{2} \mu \frac{h_{2,2}}{k_{02}} x_{2} \cdot \\ & \left. \cdot \left[ \cos \left( z - 2 y_{2} \right) - \cos \left( z + 2 y_{2} \right) \right]; \right] \\ & \dot{\theta} = \mu h + \frac{1}{2} b_{2,1} \frac{k_{01}}{k_{02}} \frac{x_{1}}{k_{02}} \left[ \sin \left( y_{2} - z + \theta \right) - \sin \left( z - \theta \right) \right] + \frac{1}{2} b_{2,2} \sin 2 y_{2} + \frac{1}{2} \mu \frac{h_{2,2}}{k_{02}} x_{2} \cdot \\ & \left. \cdot \left[ \cos \left( 2 y_{2} + z \right) + \cos \left( 2 y_{2} - \theta \right) + \cos \left( 2 z - 2 y_{2} - \theta \right) \right] + \mu \frac{h_{2,2}}{k_{02}} \cos z + \frac{1}{2} \mu \frac{h_{2,2}}{k_{02}} \cdot \\ & \left. \cdot \left[ \cos \left( 2 y_{2} + z \right) + \cos \left( 2 y_{2} - z \right) \right] - \frac{1}{2} b_{1,1} \sin 2 \left( y_{2} - z + \theta \right) - \frac{1}{2} b_{1,2} \frac{k_{02}}{k_{01}} \frac{x_{1}}{x_{1}} \left[ \sin \left( y_{2} - z + \theta \right) + \right. \\ & \left. + \sin \left( z - \theta \right) \right] - \mu \frac{h_{1,1}}{k_{01}} \cos z - \frac{1}{2} \mu \frac{h_{1,1}}{k_{01}} \left[ \cos \left( 3 z - 2 y_{2} - 2 \theta \right) - \cos \left( 2 y_{2} - z + 2 \theta \right) \right] - \\ & \left. - \frac{1}{2} \mu \frac{h_{1,2}}{k_{01}} \frac{x_{1}}{x_{1}} \left[ \cos \left( 2 y_{2} - 2 z + \theta \right) + \sin \left( z - \theta \right) \right] - \frac{1}{2} b_{2,2} \sin 2 y_{2} - \frac{1}{2} \mu \frac{h_{2,1}}{k_{02}} \frac{x_{1}}{x_{2}} \cdot \\ & \left. \cdot \left[ \cos \left( 2 y_{2} - z \right) + \cos \left( 2 y_{2} - \theta \right) + \cos \left( 2 y_{2} - 2 z + \theta \right) \right] - \mu \frac{h_{2,2}}{k_{02}} \cos z - \frac{1}{2} \mu \frac{h_{2,2}}{k_{02}} \cdot \\ & \left. \cdot \left[ \cos \left( 2 y_{2} + z \right) + \cos \left( 2 y_{2} - z \right) \right]; \right. \\ & \dot{z} = 2 \Omega. \end{split}$$

Усредняя правые части системы (25) на бесконечном интервале времени по быстрым переменным z и  $y_2$ , получим вырожденную систему трех дифференциальных уравнений для медленных переменных  $x_1$ ,  $x_2$  и  $\theta$ :

$$\begin{cases} \dot{\bar{x}} = -\frac{1}{2}b_{1,1}\bar{x}_1 - \frac{1}{2}\mu \frac{h_{1,2}}{k_{01}}\bar{x}_2 \sin \bar{\theta}; \\ \dot{\bar{x}}_2 = -\frac{1}{2}b_{2,2}\bar{x}_2 - \frac{1}{2}\mu \frac{h_{2,1}}{k_{02}}\bar{x}_1 \sin \bar{\theta}; \\ \dot{\bar{\theta}} = \mu h - \frac{1}{2}\mu \frac{h_{1,2}}{k_{01}}\frac{\bar{x}_2}{\bar{x}_1} \cos \bar{\theta} + \frac{1}{2}\mu \frac{h_{2,1}}{k_{02}}\frac{\bar{x}_1}{\bar{x}_2} \cos \bar{\theta}. \end{cases}$$
(26)

Сравнение систем дифференциальных уравнений (25) и (26) указывает на то, что усредненная на бесконечном интервале времени математическая модель поведения параметрической системы значительно проще исходной. Определим стационарный режим, ибо нас интересуют границы параметрического комбинационного резонанса разностного типа, т. е. положим производные равными нулю:

$$\begin{cases} b_{1,1}\overline{x}_{1} + \mu \frac{h_{1,2}}{k_{01}} \overline{x}_{2} \sin \overline{\theta} = 0; \\ b_{2,2}\overline{x}_{2} + \mu \frac{h_{2,1}}{k_{02}} \overline{x}_{1} \sin \overline{\theta} = 0; \\ \mu h - \frac{1}{2} \mu \frac{h_{1,2}}{k_{01}} \frac{\overline{x}_{2}}{\overline{x}_{1}} \cos \overline{\theta} + \frac{1}{2} \mu \frac{h_{2,1}}{k_{02}} \frac{\overline{x}_{1}}{\overline{x}_{2}} \cos \overline{\theta} = 0. \end{cases}$$
(27)

Для того чтобы амплитуды колебаний не обращались в нули (т. е. решение не было бы тривиальным) должно выполняться следующее условие:

$$\begin{vmatrix} b_{1,1} & \mu \frac{h_{1,2}}{k_{01}} \sin \overline{\theta} \\ \mu \frac{h_{2,1}}{k_{02}} \sin \overline{\theta} & b_{2,2} \end{vmatrix} = 0, \tag{28}$$

следовательно, нетрудно найти

$$\sin \bar{\theta} = \frac{1}{\mu} \sqrt{\frac{b_{1,1} b_{2,2} k_{01} k_{02}}{h_{1,2} h_{2,1}}}.$$
 (29)

Вычислим теперь косинус этого же угла:

$$\cos \bar{\theta} = \pm \frac{1}{\mu} \sqrt{\mu^2 - \frac{b_{1,1} b_{2,2} k_{01} k_{02}}{h_{1,2} h_{2,1}}}.$$
(30)

Определяя расстройку по частоте, после несложных преобразований находим формулу для вычисления границы параметрического комбинационного разностного типа:

$$\left(\frac{2\Omega}{k_{02} - k_{01}}\right)_{1,2} = 1 \pm \frac{1}{2} \frac{b_{2,2} - b_{1,1}}{k_{02} - k_{01}} \sqrt{\mu^2 \frac{h_{1,2} h_{2,1}}{b_{1,1} b_{2,2} k_{01} k_{02}}} - 1.$$
(31)

Отсюда нетрудно видеть, что **границы определяются собственными парциальными** частота системы, диагональными коэффициентами матрицы диссипативных сил и недиагональными коэффициентами матрицы мультипликативных сил (рисунок 2). Критическое значение коэффициента параметрического возбуждения (0,409)

$$\mu_{\rm kp} = \sqrt{\frac{b_{1,1}b_{2,2}k_{01}k_{02}}{h_{1,2}h_{2,1}}}.$$
(32)

Утверждение, аналогичное высказанному выше относительно формулы (31), может быть повторено и для выражения (32). Если коэффициенты  $h_{1,2}$  и  $h_{2,1}$  имеют разные знаки, то в системе не возбуждается параметрический комбинационный резонанс разностного типа, по крайней мере в первом приближении, а может возбудиться, видимо, комбинационный параметрический резонанс суммарного типа.

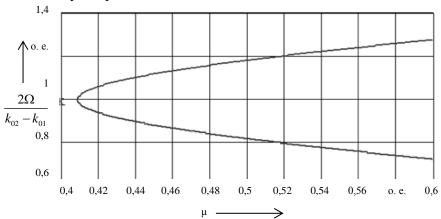


Рисунок 2. Область параметрического комбинационного резонанса разностного типа, найденная при помощи асимптотического метода разделения движений на «быстрые» и «медленные» составляющие

Таким образом, методика вычисления области параметрического резонанса разностного типа может использоваться для анализа поведения реального железнодорожного экипажа, движущегося по неравноупругому в продольном направлении железнодорожному пути [4]. Исходя из выражения (31) можно установить область резонансных скоростей движения железнодорожного экипажа, которую нужно добавить к тем областям, которые получаются из условий простых параметрических резонансов:

$$V_{1,2} = \frac{1,8l_{um}}{\pi} \left(k_{02} - k_{01}\right) \left(1 \pm \frac{b_{2,2} - b_{1,1}}{k_{02} - k_{01}} \sqrt{\mu^2 \frac{h_{1,2}h_{2,1}}{b_{1,1}b_{2,2}k_{01}k_{02}} - 1}\right),\tag{33}$$

здесь  $l_{\text{шп}}$  = 0,54 м — междушпальное расстояние;  $l_{\text{шп}}$  зависит от эпюры шпал; указанная величина соответствует соотношению 1840 шпал на 1 км.

И, наконец-то, следует напомнить, что согласно выводам работы [2] вязкое трение играет положительную роль для простых параметрических резонансов, сужая их области, и негативную роль для комбинационных параметрических резонансов, расширяя зоны последних. Кроме того, хорошо известно [1], что параметрическое возбуждение может взаимодействовать с кинематическим внешним возмущением, действующим на железнодорожные экипажи, либо усиливая, либо ослабляя последние, что зависит от фазового соотношения между ними.

К сожалению, практически во всех монографиях, посвященных динамическому поведению подвижного состава, данный факт не учитывается должным образом, т.е. как мультипликативное и аддитивное возмущение одновременно, чтобы упростить математический аппарат исследования. Обычно говорят о конкретной скорости движения экипажа как о резонансной, что в действительности не так, ибо это зоны в окрестности данной скорости, а ее ширина определяется в основном коэффициентом параметрического возмущения.

#### Список литературы

- 1. Болотин, В. В. Динамическая устойчивость упругих систем / В. В. Болотин. М.: Гостехиздат, 1956.-600 с.
  - 2. Шмидт, Г. Параметрические колебания / Г. Шмидт. М.: Мир, 1978. 336 с.

- 3. Моисеев, Н. Н. Асимптотические методы нелинейной механики / Н. Н. Моисеев. М.: Наука, 1969. 380 с.
- 4. Нехаев, В. А. Особенности составления математической модели условной двухосной тележки, движущейся по неравноупругому железнодорожному пути в продольном направлении / В. А. Нехаев, Р. Д. Сабиров // Материалы 2-й всерос. конф. с междунар. участием «Технологическое обеспечение ремонта и повышение качества подвижного состава» / Омский гос. ун-т путей сообщения. Омск. 2013. С. 185 191.

#### References

- 1. Bolotin V. V. *Dinamicheskaia ustoichivost' uprugikh system* (Dynamic stability of elastic systems). Moscow: Gostekhizdat, 1956, 600 p.
- 2. Shmidt G. *Parametricheskie kolebaniia* (Parametric oscillations). Moscow: Mir, 1978, 336 p.
- 3. Moiseev N. N. *Asimptoticheskie metody nelineinoi mekhaniki* (Asymptotic methods of non-linear mechanics). Moscow: Nauka, 1969, 380 p.
- 4. Nekhaev V. A., Sabirov R. D. Features of drawing up a mathematical model of the conventional biaxial trolley moving along neravnouprugomu railway track in the longitudinal direction [Osobennosti sostavleniia matematicheskoi modeli uslov-noi dvukhosnoi telezhki, dvizhushcheisia po neravnouprugomu zheleznodorozhnomu puti v pro-dol'nom napravlenii]. *Materialy 2 vserossiiskoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem «Tekhnologicheskoe obespechenie remonta i povyshenie kachestva podvizhnogo sostava» Proceedings of the 2nd All-Russian conference with international participation «Engineering support repair and improvement of the quality of rolling stock»*, 2013, pp. 185 191.

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

#### 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, +7 (3812) 31-16-88.

E-mail: NehaevVA@rambler.ru

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Нехаев, В. А. Влияние продольной неравноупругости железнодорожного пути на динамическое поведение подвижного состава. Ч. 3. Определение областей комбинационных параметрических резонансов [Текст] / В. А. Нехаев // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. — Омск. — 2016. — № 2 (26). — С. 50-61.

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

#### **Nekhaev Victor Alekseevich**

Omsk State Transport University (OSTU). 35, Marx st., Omsk, 644046, the Russion Federation.

Doctor of Technical Sciences, Professor of the department « Theoretical Mechanics» Omsk State Transport University.

Phone: +7 (3812) 37-60-82, +7 (3812) 31-16-88.

E-mail: NehaevVA@rambler.ru

#### BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Nekhaev V. A. The effect of longitudinal non-equalelasticity of railway to the rolling stock dynamic. Part 3. The identify areas of raman parametric resonance. Journal of Transsib Railway Studies, 2016, vol. 26, no. 2, pp. 50-61. (In Russian).

УДК 621.373.826

### В. И. Шастин<sup>1</sup>, С. К. Каргапольцев<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Сибирская академия права, экономики и управления (САПЭУ), г. Иркутск, Российская Федерация, <sup>2</sup>Иркутский государственный университет путей сообщения (ИрГУПС), г. Иркутск, Российская Федерация

#### ЛАЗЕРНОЕ ТЕРМОУПРОЧНЕНИЕ ПАРЫ ТРЕНИЯ ДВС «КОЛЬЦО – ГИЛЬЗА ЦИЛИНДРА»

**Аннотация.** Статья посвящена актуальным вопросам исследования микроструктуры, физикомеханических и трибологических показателей поверхностных слоев пары трения «кольцо – гильза цилиндра»,

подвергнутых лазерной обработке. Проведен анализ основных дефектов элементов цилиндропоршневой группы двигателя внутреннего сгорания, методов их восстановления и повышения триботехнических характеристик. Отмечается, что наиболее эффектвными средствами повышения износостойкости пары трения «кольцо — гильза цилиндра» являются различные виды термической и химико-термической обработки рабочей поверхности звена. В статье с этой целью предлагается использование перспективной технологии лазерного термоупрочнения. Предлагаемые технологии находят все более широкое применение в автомобильной технике и технике сельскохозяйственного назначения. Однако в авиационной отрасли ввиду специфических эксплуатационных и конструктивных особенностей ДВС их применение ограничено.

В работе оцениваются и анализируются различные варианты лазерного модифицирования поверхностей сопряжения применительно к ЦПГ авиационного двигателя АШ-62ИР.

Приводятся данные микроструктурного анализа поверхностного слоя, показателей микротвердости и износостойкости. Дано краткое описание триботехнической лабораторной установки и методики проведения эксперимента на основе сравнительного анализа полученных данных. При этом триботехнические показатели сопоставлялись с результатами металлографических исследований и физико-механическими свойствами модифицированного слоя, в частности, с показателем микротвердости.

В результате проведенных трибологических исследований установлено, что рост показателя износостойкости пары трения «кольцо — гильза цилиндра» отмечается на всех исследованных режимах лазерного воздействия с учетом выявленных граничных условий обработки для того и другого элементов сопряжения. Максимальное значение износоустойчивости наблюдается при лазерном термоупрочнении обеих поверхностей сопряжения, на критических уровнях плотности энергии лазера, не вызывающих оплавления и появления микротрещин в поверхностном слое. При этом износоустойчивость модифицированной поверхности гильзы цилиндра может увеличиться в 4,5 — 5 раз, а пориневых колец — более чем в три раза.

Предложены теоретические основы механизма изнашивания термоупрочненных поверхностей, поясняющие кинетику повышения их износостойкости в результате фрмирования микроструктуры особого поверхностного слоя, обладающего повышенной несущей способностью, микротвердостью и улучшенными условиями изнашивания модифицированного слоя. Экспериментально подтверждено, что наибольшая износоустойчивость наблюдается в элементах трения при взаимном модифицировании их поверхностей.

**Ключевые слова:** «кольцо – гильза цилиндра», поверхностный слой, микроанализ, износостойкость, лазерное излучение, микротвердость, механизм изнашивания, сопрягаемая поверхность, триботехнические показатели.

### Vladimir I. Shastin<sup>1</sup>, Sergey K. Kargapol'tsev<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Siberian Academy of law, economic and management (SALEM), Irkutsk, the Russian Federation, <sup>2</sup>Irkutsk State Transport University (ISTU), Irkutsk, the Russian Federation

# LASER THERMOHARDENING OF FRICTION COUPLE «RING – SLEEVE OF CYLINDER»

Abstract. Article is devoted to actual questions of research of microstructure, physic-mechanical and tribological indicators blankets of friction couple «ring-sleeve of cylinder» under laser processing. Analysis of base defects of elements of cylinder-piston group of internal combustion engines, methods their reduction and rise of tribotechnical characteristics are conducted. Notes that different kinds of thermos and chemical thermal processing of working surface of link are most effective means of rise of wear resistance of couple «ring-sleeve of cylinder». Using of perspective technology of laser thermostrengthening is offered with this target. Offering technologies find greater application in automobile and technics of agricultural purpose.

But purpose of ICE in aviation industry due to their specific exploitative and specific design features is limited. At the same time, they may have important practical meaning.

Different variants of laser modification of surfaces of coupling in the context of CPG of aviation engine of ASH-62IR are offered and analyzed in article.

Data of microstructural analysis of blanket, indicators of microhardness and wear resistance are adduced. Short description of tribotechnical laboratory-scale plant and methodic of conduct an experiment on base of comparative analysis of findings is given. Wherein tribotechnical indicators are compared with results of metallographical researches and physic-mechanical properties of modification layer, in particular with indicator of microhardness.

Conduct of tribological researches determines that rise of indicator of wear resistance of friction couple «ring-sleeve of cylinder» observed at all researching regimes of laser effect with according of identified border conditions of processing for both elements of coupling. Maximum value of wear resistance is observed at laser thermostrengthening of both surfaces of couple on critical levels of density of laser energy. These levels do not case of appearance of microcracks in blanket. Wherein wearing qualities of modification surface of cylinder sleeve may increase by 4,5-5 times and wearing qualities of piston rings more than 3 times.

Theoretical bases of mechanism of wear of thermos thermostrengthening surfaces which illustrate kinetics of increase their wear resistance in result of formation of microstructure of special blanket with increased bearing capacity, microhardness and improved conditions of wear of modification layer. Experimentally validated that the greatest wear resistance is observed in the friction elements at their mutual modifying their surfaces.

**Keywords:** «ring-sleeve of cylinder», blanket, micro-analysis, wear resistance, laser emitting, micro hardness, mechanism of wear, matched surface, tribotechnical indicators.

Одним из основных конструктивных элементов двигателя внутреннего сгорания (ДВС), определяющих показатели надежности его работы и тактико-технические характеристики, являются детали цилиндропоршневой группы (ЦПГ), а именно гильзы цилиндров, поршни и кольца, образующие объем, в котором тепловая энергия в процессе сгорания топлива превращается в механическую [1].

Основными дефектами этих элементов являются износ сопрягаемых поверхностей, увеличение шероховатости, изменение макрогеометрии (овальность, конусность, седлообразность), нагар, раковины, трещины и сколы, во многом определяющие работоспособность двигателя [2, 3]. Поэтому данные элементы должны иметь, во-первых, высокую износостой-кость и низкий коэффициент трения, во-вторых, они должны сохранять в процессе работы стабильные размеры и при этом выдерживать высокие давления, механические и тепловые нагрузки, а также должны обладать хорошей теплопроводностью и коррозионной стой-костью в активных средах.

Для обеспечения перечисленных технических требований к качеству при формировании поверхностей трения необходимо обеспечивать получение оптимальных триботехнических характеристик сопрягаемых поверхностей и высокие физико-механические свойства [2, 4].

При дефектации и ремонте элементов ЦПГ особое внимание уделяют рабочей поверхности гильзы цилиндров, определяют ее геометрические размеры и форму изношенной поверхности, а также параметры шероховатости. Наличие трещин, сколов, раковин и других дефектов приводит к отбраковке гильзы [1, 3].

Восстанавливают рабочую поверхность гильзы цилиндров в основном механической обработкой под ремонтный размер, но может применяться восстановление первоначального размера нанесением слоя металла или изменением геометрии гильзы за счет пластического деформирования. Для восстановления гильз цилиндров до номинального размера применяются такие способы, как металлизация, гальванические покрытия, запрессовка износостойких пластин, наплавка на внутреннюю поверхность износостойких материалов и т. д. Однако гильзы цилиндров не нашли широкого применения из-за того, что не соответствуют требованиям стандарта по качеству и имеют высокую себестоимость [2].

Механическая обработка рабочей поверхности гильз цилиндров под ремонтный размер осуществляется растачиванием, хонингованием, шлифованием или комбинацией этих обработок. Этот способ восстановления является наиболее предпочтительным в ремонтной практике, а для авиационных ДВС едва ли не единственным. Растачивание и хонингование гильз цилиндров в основном применяется при износе внутренней поверхности до диаметра, превышающего предельное значение, при овальности и конусности на рабочем участке более допустимых размеров. По величине износа внутренней поверхности гильзы сортируют на несколько ремонтных групп. Поршневые кольца, как правило, подлежат замене.

Расточка под ремонтный размер влечет за собой снижение твердости внутренней поверхности и необходимость организации производства поршней и поршневых колец ремонтного размера, а также приводит к сокращению ресурса двигателей на 30-50% [3]. Поэтому разработка и совершенствование способов восстановления и повышения износостойкости пары трения «кольцо – гильза цилиндра», отвечающих современным требованиям, являются актуальными и практически значимыми для производства и эксплуатации ДВС.

В предлагаемой статье рассматриваются вопросы повышения физико-механических свойств и триботехнических показателей основных элементов ЦПГ ДВС авиационного при-

менения с учетом их конструктивных и эксплуатационных особенностей. На основе полученных экспериментальных данных и описания теоретической модели изнашивания модифицированных поверхностей предлагаются технологические рекомендации по оптимизации режимов лазерной обработки поверхностей сопряжения исследуемого звена.

Эффективным способом повышения износостойкости деталей сопряжения ЦПГ являются различные виды упрочнения рабочих поверхностей трения. Для этого в большинстве случаев внутреннюю поверхность гильзы цилиндров подвергают термической или химикотермической обработке. Преимущества этих технологий заключаются в том, что данный вид обработки приводит к образованию на рабочей поверхности трения износоустойчивого модифицированного слоя с низким коэффициентом трения. Наряду с традиционными способами модифицирования в последнее время широко рассматриваются и находят практическое применение технологии лазерного упрочнения, особенно в автотракторной отрасли [5 – 7]. В авиационной отрасли их изученность ограничена, но имеет важное практическое значение. Специфическими условиями работы и конструктивными особенностями этой пары трения для ДВС авиационного применения являются материалы деталей сопряжения, а также их покрытия, экстремальные температурные условия при больших удельных нагрузках, иногда при дефиците смазки на некоторых режимах работы двигателя и т. д. Особую актуальность представляет перспектива лазерного упрочнения обеих поверхностей сопряжения. С учетом того, что данное звено в такой комбинации лазерного модифицирования практически не изучено.

Авторами проведены экспериментальные исследования по оценке износостойкости пары трения «кольцо – гильза цилиндра», подвергнутой лазерной термообработке, в том числе при обработке того и другого элементов сопряжения и установлении механизма их изнашивания.

Исследованию влияния лазерной обработки подвергались фрагменты реальных деталей авиационного двигателя АШ-62ИР. Образцы гильзы цилиндра (сталь 38ХМЮА) вырезались в виде ее фрагмента размерами  $30 \times 50$  мм после ремонта хонингованием. Образцы (фрагменты) компрессионных колец (материалы — сталь X12-М и чугун XTB) вырезались электроискровым методом, во избежание структурных изменений, из колец заводской поставки в виде сегмента шириной 10 мм.

Исследования проводились на базе испытания  $10^4$  циклов, при частоте 100 циклов в минуту на лабораторной установке (рисунок 1).

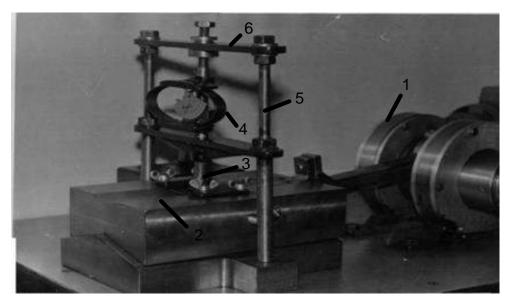


Рисунок 1 – Общий вид лабораторной испытательной установки пары трения «кольцо – гильза цилиндра»

При разработке лабораторной установки учитывались принцип моделирования, условия испытания с наибольшей идентичностью и соответствием реальным условиям работы сопряжения, температурный фактор не учитывался. По понятным причинам технически трудно

достичь полного соответствия условиям работы реального изделия. Однако принятая нами методика сравнительного анализа полученных данных и доступная идентификация механизма износа при обеспечении устойчивых режимов и процессов изнашивания могут обеспечить получение вполне достоверных и сопоставимых данных эксперимента. Кроме этого в ходе эксперимента использовались фрагменты реальных деталей сопряжения, поэтому такой подход можно считать вполне удовлетворительным для оценки эффективности лазерных процессов упрочнения.

В качестве объекта исследования использовались детали (ЦПГ) авиационного двигателя АШ-62ИР. Кинематическая схема испытательной машины представляет собой замкнутый силовой контур, состоящий из двух ветвей. Ветви контура соединены в месте контакта исследуемых деталей. Конструктивно машина (см. рисунок 1) представляет собой кривошипно-шатунный механизм 1, обеспечивающий возвратно-поступательное движение образца «гильзы цилиндра», который крепится на подвижной платформе, перемещаемой по направляющей с помощью электродвигателя. Опорная поверхность платформы, куда устанавливается фрагмент гильзы 2, имеет проточку, соответствующую радиусу наружной поверхности образца. Это обеспечивает жесткую ориентацию изнашиваемой поверхности относительно неподвижного образца (фрагмента поршневого кольца). Образец устанавливается в проточке штока 3, обеспечивающей его самоориентацию по поверхности сопряжения. Уровень давления на фрагмент кольца регулируется вращением регулировочного болта и контролируется с помощью пружинного динамометра 4, который дополнительно выполняет функцию демпфера вынужденных колебаний.

Жесткая кинематическая связь элементов трения обеспечивается двумя шпильками 5 и перемычками 6 между ними. Перемычки одновременно являются направляющими штока нагружения и элементами для регулировки и контроля уровня нагрузки.

Испытания могут осуществляться как при сухом трении, так и в условиях смазки капельным способом. При подаче масляно-абразивной смеси в зону контакта можно осуществлять ускоренный режим испытания и имитировать абразивный вид изнашивания. Поверхность скольжения платформы и направляющей смазываются консистентной смазкой при каждой замене испытываемых образцов.

Контроль параметров износа осуществлялся весовым методом для фрагмента поршневого кольца с использованием аналитических весов; для гильзы цилиндра — путем записи и анализа профилограмм, а также микрометрическими замерами контролируемой зоны до и после испытания.

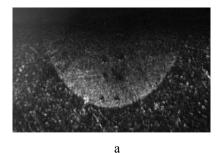
Лазерная обработка велась на критических режимах плотности энергии лазера без оплавления поверхностного слоя с сохранением шероховатости, соответствующей процессу хонингования. Режим «оплавления» с практической точки зрения нецелесообразен для данного вида сопряжения ввиду возникающей необходимости восстановления состояния поверхности путем хонингования и снятия при этом значительной части азотированного слоя, так как одновременно с этим снижается количество допустимых ремонтов цилиндра.

При лазерном упрочнении поршневых колец режим «оплавления» также не применялся, так как кроме нарушения однородности поверхностного слоя наблюдается образование микротрещин, что недопустимо. Лазерная обработка стального компрессионного кольца с хромовым покрытием также оказалась неэффективной вследствие возникновения микротрещин и последующего отслоения покрытия при испытании.

Испытания образцов на износостойкость проводились в ускоренном режиме абразивного износа. Анализ результатов исследования осуществлялся путем сравнения количественных характеристик износа упрочненных и образцов в исходном состоянии при неоднократном их испытании и обработке статистических данных эксперимента. При этом триботехнические показатели сопоставлялись с результатами металлографических исследований и физикомеханическими свойствами модифицированного слоя, в частности, с показателем микротвердости.

На рисунке 2 представлена микроструктура зоны термического влияния (ЗТВ) материала гильзы цилиндра при его обработке на двух характерных режимах лазерного воздействия: первый из них – режим «упрочнения», характеризуемый изменением микроструктуры (рисунок 2, а) и второй – «критический» – непосредственно перед оплавлением поверхности рисунок 2, б). При этом глубина закаленного слоя составляла 0,3 – 0,5 мм. Режимы лазерной обработки варьировались путем изменения положения фокуса линзы относительно обрабатываемой поверхности. Плотность энергии лазерного излучения W при этом изменялась в интервале 2,4 – 4,2 Дж/мм² при длительности импульса 0,4 мс. Обработка осуществлялась на лазерной технологической установке «Квант-15». Микроструктура при втором режиме обработки характеризуется образованием ЗТВ, состоящей из двух слоев. Непосредственно у поверхности образуется мелкодисперсный светлый слой с повышенной микротвердостью, более чем в три раза превышающей этот показатель по отношению к исходному (необработанному) материалу и почти в два раза выше, чем микротвердость ЗТВ, образованной при первом режиме лазерной обработки. При этом микротвердость второго слоя практически мало отличается от ЗТВ первого режима – «упрочнения».

Известно, что при уменьшении величины зерна и повышении уровня дисперсности (аморфизации) для большинства железоуглеродистых сплавов снижается коэффициент трения, увеличивается несущая способность модифицированного слоя и сокращается период приработки [8-10].



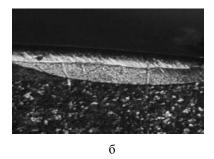


Рисунок 2 — Микроструктура ЗТВ стали 38XM(OA) : a - x120 ; б - x50

Аналогичное структурное строение ЗТВ имеет чугунное кольцо при его обработке на критическом режиме лазерного воздействия (рисунок 3). Различие заключается лишь в соотношении толщины слоев и особенностях структурного строения.

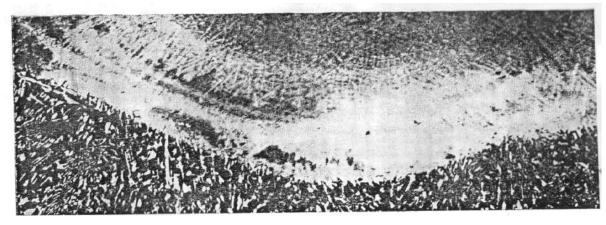


Рисунок 3 – Микроструктура 3TB чугуна XTB. x180

Для оценки влияния уровня нагрузки в контактной зоне сопряжения были проведены сравнительные испытания партии образцов как в исходном состоянии, так и на приемлемых режимах лазерного упрочнения. В ходе изменения нагрузки, измеренной с помощью динамометра для каждой партии испытанных образцов, была установлена сопоставимая пропор-

циональная зависимость контролируемого параметра износа от величины нагрузки. В качестве основной была принята нагрузка в 8 кг.

Учитывая незначительные отклонения весового показателя износа (не превышающие 12 %) на предварительном этапе испытаний, для каждого из возможных вариантов исследуемого сопряжения в зависимости от уровня лазерного воздействия испытывалось по пять образцов.

Результаты сравнительного анализа полученных триботехнических данных показали следующее.

- 1. Износостойкость поверхности фрагмента цилиндра на режиме лазерного термоупрочнения увеличилась в 1,5 раза по отношению к исходной (не упрочненной) поверхности. При этом износ чугунного фрагмента кольца снизился на 35-40%, а стального (сталь X12-M) на 28-37%, износ стального с хромовым покрытием остался на том же уровне.
- 2. При лазерной обработке такого же образца на критическом режиме, т. е. непосредственно перед оплавлением, его износостойкость увеличивается в 2,6 раза; чугунного кольца в 1,5 раза, стального без покрытия на 15-20 %, с хромовым покрытием в 1,3-1,4 раза.
- 3. При лазерной обработке только чугунного образца на упрочняющем режиме его износ уменьшился в 1,6 раза при одновременном увеличении износостойкости образца гильзы цилиндра на 35-40 %.
- 4. Максимальное повышение износостойкости достигнуто при взаимном лазерном модифицировании поверхностей чугунного и стального без хромового покрытия колец и гильзы цилиндра на максимально возможном уровне лазерного упрочнения этих пар трения. Предельными граничными условиями при этом являются недопустимость оплавления и возникновения микротрещин обрабатываемых поверхностей. При этом износоустойчивость модифицированной поверхности цилиндра может увеличиться в 4,5 5 раз, а исследованных поршневых колец более чем в три раза.

Таким образом, рост показателя износостойкости пары трения «кольцо – гильза цилиндра» отмечается на всех исследованных режимах лазерного воздействия с учетом выявленных граничных условий обработки для того и другого элементов сопряжения. Максимальное значение износоустойчивости наблюдается при лазерном термоупрочнении обеих поверхностей сопряжения на критических уровнях плотности энергии лазера, не вызывающих оплавления и возникновения трещин в поверхностном слое.

В процессе эксплуатации при трении изнашивания рабочие поверхности исследуемой пары трения испытывают действие силовых и температурных факторов. При этом совершенно очевидно, что на начальном этапе эксплуатации будет изменяться шероховатость термоупрочненного слоя, т. е. поверхность будет адаптироваться к стационарным условиям изнашивания. Этот этап работы пары трения характеризуется этапом приработки. Известно, что по окончании приработки на поверхности трения формируется шероховатость, мало зависящая от исходной, полученной при механической обработке. Эта шероховатость зависит от условий изнашивания, физико-механических и трибологических свойств материалов сопряжения. При некотором оптимальном значении шероховатости для данной пары и условий трения обеспечивается минимальное изнашивание [11, 12].

Очевидно, что по мере износа, после этапа приработки в работу вступают поверхностные слои, имеющие повышенные по сравнению с традиционными методами упрочнения физико-механические свойства и специфическое микроструктурное строение, характеризуемое низким коэффициентом трения. Кроме того, в процессе изнашивания происходит постепенное увеличение площади контакта и снижение величины удельных напряжений на контактную поверхность. Это влечет за собой постепенное и медленное уменьшение интенсивности изнашивания в пределах толщины модифицированного слоя.

Учитывая, что лазерное упрочнение инициирует гомогенизацию особого поверхностного слоя с повышенными несущими способностями и высоким показателем микротвердости по

сравнению с традиционными видами термоупрочнения, это ускоряет процесс приработки за счет более раннего создания опорной поверхности изнашивания при меньшей суммарной площади контакта [9 – 11]. В то же время более длительное время сохраняется объем впадин, образованных при хонинговании в зоне контакта, увеличивающий аккумуляцию смазки во всех участках контактной поверхности, одновременно снижая вероятность схватывания и интенсивного изнашивания поверхностей трения [12]. По мере износа модифицированной поверхности несущая способность сопряжения неизбежно уменьшается, однако при этом равновесное состояние поверхности сохраняется на более длительный период работы пары трения. Этому способствует также снижение коэффициента трения термоупрочненной поверхности сопряжения. Данные особенности и преимущества характерны и для сопрягаемой поверхности износа, а если пара трения подвергнута взаимному лазерному модифицированию, то это практически удваивает эффект повышения трибомеханических параметров сопряжения.

Как показали сравнительные трибологические испытания образцов ЦПГ в режиме трения скольжения, показатель износостойкости на всех характерных режимах лазерной обработки по сравнению с традиционными методами упрочнения увеличивается, а при обработке поверхностей сопрягаемых пар трения практически может удвоиться.

Таким образом, можно утверждать, что верхний высокодисперсный (аморфизированный) слой имеет более высокие триботехнические характеристики, обусловленные увеличением несущей способности, повышением микротвердости и улучшением условий изнашивания модифицированного слоя. Основываясь на этих положениях, можно сформулировать ряд важных конструктивно-технологических рекомендаций как при производстве, так и при ремонте, рассмотренных элементов ЦПГ.

#### Список литературы

- 1. Двигатели внутреннего сгорания: Устройство и работа поршневых и комбинированных двигателей [Текст] / Под ред. М. Г. Круглова. М.: Машиностроение, 1990. 289 с.
- 2. Мишин, И. А. Долговечность двигателей [Текст] / И. А. Мишин. Л.: Машиностроение, 1976.-288 с.
- 3. Орлин, А. С. Расчет рабочих процессов в двигателях внутреннего сгорания [Текст] / А. С. Орлин. М.: Машиностроение, 2008. 157 с.
- 4. Минаков, А. П. Упрочняющая пневмоцентробежная обработка гильз ДВС, альтернативная финишному хонингованию [Текст] / А. П. Минаков, М. Е. Лустенков, Е. В. Ильюшина // Вестник машиностроения. -2016. -№ 2. -C. 16-21.
- 5. Григорьянц, А. Г. Технологические процессы лазерной обработки [Текст] / А. Г. Григорьянц, И. Н. Шиганов, А. И. Мисюров / МГТУ им. Н. Э Баумана. М., 2006. 246 с.
- 6. Лазерное и электоэрозионное упрочнение материалов [Текст] / В. Г. Коваленко, А. Д. Верхотуров и др. М.: Наука, 1986. 276 с.
- 7. Рыкалин, Н. Н. Лазерная обработка материалов [Текст] / Н. Н. Рыкалин, А. А. Углов, А. Н. Кокора. М.: Машиностроение, 1975. 295 с.
- 8. Shastin, V. I. Lazer surfacing and hardening for sliding friction constructions// Fundamental Problems of Opto- and Microelectronics [Text] / V. I. Shastin, A. N. Malov. Khabarovsk, 2004. P. 263 267.
- 9. Костромин, С. В. Влияние исходной структуры стали на несущую способность поверхностных слоев после лазерной обработки [Текст] / С. В. Костромин // Материалы междунар. конф. «НПК»: Сборник научных трудов «SWorld». − 2013. − Т. 6. № 1. С. 37 40.
- 10. Борозинец, В. Э. Исследование структуры и свойств инструментальных сталей после лазерного упрочнения [Текст] / В. Э. Борозинец, С. В. Костромин // Современные инновации в науке и технике: Материалы 3-й междунар. науч.-практ. конф. Курск, 2013. С. 28 31.
- 11. Суслов, А. Г. Качество поверхностного слоя деталей машин [Текст] / А. Г. Суслов. М.: Машиностроение, 2000. 320 с.

- 12. Крагельский, И. В. Трение и износ [Текст] / И. В. Крагельский. М.: Машиностроение, 1968. 480 с.
- 13. Суслов, А. Г. Научные основы технологии машиностроения [Текст] / А. Г. Суслов, А. М. Дальский. М.: Машиностроение, 2002. 684 с.

#### References

- 1. Kruglov M. G. *Dvigateli vnutrennego sgoraniia: Ustroistvo i rabota porshnevykh i kombinirovan-nykh dvigatelei* (Internal combustion engines: Conformation and functioning of piston and combination engines). Moscow: Mechanical engineering, 1990, 289 p.
- 2. Mishin I. A. *Dolgovechnost' dvigatelei* (Durability engines). Leningrad: Mechanical engineering, 1976, 288 p.
- 3. Orlin A. S. *Raschet rabochikh protsessov v dvigateliakh vnutrennego sgoraniia* (Accounting of functioning processes in internal combustion engines). Moscow: Mechanical engineering, 2008, 157 p.
- 4. Minakov A. P., Lustenkov M. E., Il'yushina E. V. Hardening pneumocentrifugal processing sleeves ICE which is alternative of finish honing [Uprochniaiushchaia pnevmotsentrobezhnaia obrabotka gil'z DVS, al'terna-tivnaia finishnomu khoningovaniiu]. *Vestnik mashinostroeniia Vestnik of Mechanical engineering*, 2016, no. 2, pp. 16 21.
- 5. Grigor'yants A. G., Shiganova I. N., Misyurov A. I. *Tekhnologicheskie protsessy lazernoi obrabotki* (Technological processes of laser processing). Moscow: MGSU, 2006, 246 p.
- 6. Kovalenko V. G., Verkhoturov A. D., Golovko L. F. *Lazernoe i elektoerozionnoe uprochnenie materialov* (Laser and electricalerosion hardening of materials). Moscow: Science, 1986, 276 p.
- 7. Rykalin N. N., Uglov A. A., Kokora A. N. *Lazernaia obrabotka materialov* (Laser materials processing). Moscow: Mechanical engineering, 1975, 295 p.
- 8. Shastin V. I., Malov A. N. Lazer surfacing and hardening for sliding friction constructions [Lazer surfacing and hardening for sliding friction constructions]. *Fundamental Problems of Optoand Microelectronics Fundamental Problems of Opto- and Microelectronics*. 2004, pp. 263–267.
- 9. Kostromin S. V. Influence of initial structure of steel on load bearing capacity of blanket after laser processing [Vliianie iskhodnoi struktury stali na nesushchuiu sposobnost' poverkhnostnykh sloev posle lazernoi obrabotki]. *Materialy mezhdunarodnoi konfe-rentsii «NPK»:* Sbornik nauchnykh trudov «SWorld» Materials of International conference «SIC»: Collection of science article «SWorld». 2013, V. 6, no. 1, pp. 37–40.
- 10. Borozinets V. E., Kostromin S. V. Research of structure and properties of instrumental steels after laser hardening [Issledovanie struktury i svoistv instrumental'nykh stalei posle lazernogo uprochneniia]. *Sovremennye innovatsii v nauke i tekhnike Modern innovations in science and technics*. 2013, pp. 28 31.
- 11. Suslov A. G. *Kachestvo poverkhnostnogo sloia detalei mashin* (The quality of the surface layer of machine parts). Moscow: Mechanical engineering, 2000, 320 p.
- 12. Kragel'skiy I. V. *Trenie i iznos* (Friction and Wear). Moscow: Mechanical engineering, 1968, 480 p.
- 13. Suslov A. G., Dal'skiy A. M. *Nauchnye osnovy tekhnologii mashinostroeniia* (Scientific fundamentals of engineering technology). Moscow: Mechanical engineering, 2002, 684 p.

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

#### Шастин Владимир Иванович

Сибирская академия права, экономики и управления (САПЭУ).

Сурикова ул., д. 21, г. Иркутск, 664025, Российская Федерация.

Кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Технологии деревообработки, экологии и землеустройства», САПЭУ.

E-mail: rio221@mail.ru

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

#### **Shastin Vladimir Ivanovich**

Siberian Academy of law, economic and management (SALEM).

- 21, Surikova st., Irkutsk, 664025, the Russion Federation.
- Ph. D., Associate Professor, Head of the Department «Wood technology, ecology and land management», SALEM.

E-mail: rio221@mail.ru

### Транспортная энергетика

#### Каргапольцев Сергей Константинович

Иркутский государственный университет путей сообщения (ИрГУПС).

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

Доктор технических наук, профессор, проректор по научной работе, ИрГУПС.

Тел.: +7 (3952) 638-399. E-mail: kck@irgups.ru

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Шастин, В. И. Лазерное термоупрочнение пары трения ДВС «кольцо — гильза цилиндра» [Текст] / В. И. Шастин, С. К. Каргапольцев // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. — Омск. — 2016. —

#### Kargapol'tsev Sergey Konstantinovich

Irkutsk State Transport University (ISTU).

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

Doctor of Technical Sciences, the professor, Vice-rector scientific work, ISTU

Phone: +7 (3952) 638-399. E-mail: kck@irgups.ru

#### BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Shastin V. I., Kargapoltsev S. K. Laser thermohardening of friction couple «ring – sleeve of cylinder». Journal of Transsib Railway Studies, 2016, vol. 26, no. 2, pp. 61 – 70. (In Russian).

УДК 621.331

### В. П. Закарюкин<sup>1</sup>, А. В. Крюков<sup>1, 2</sup>, И. М. Авдиенко<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Иркутский государственный университет путей сообщения (ИрГУПС), г. Иркутск, Российская Федерация, <sup>2</sup>Иркутский национальный исследовательский технический университет (ИрНИТУ), г. Иркутск, Российская Федерация

## МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ 2×25 кВ С КОАКСИАЛЬНЫМИ КАБЕЛЯМИ И ТРАНСФОРМАТОРАМИ ВУДБРИДЖА

Аннотация. Перевод электрифицированных железнодорожных линий на высокоскоростное движение требует усиления системы тягового электроснабжения, которое может осуществляться на основе применения симметрирующих трансформаторов и коаксиальных кабелей. Для решения вопросов практического применения тяговых сетей с симметрирующими трансформаторами и коаксиальными кабелями необходимы средства компьютерного моделирования таких сетей, которые могут быть реализованы на базе методов, разработанных в ИрГУПСе. Кроме того, представляет интерес рассмотрение комплексного технического решения, включающего в себя оба из обозначенных способов усиления системы тягового электроснабжения.

Усиление обеспечивает дополнительные эффекты, состоящие в улучшении качества электроэнергии в питающих высоковольтных сетях и районах электроснабжения нетяговых потребителей, а также в снижении потерь электроэнергии и повышение энергоэффективности.

Приведены результаты компьютерного моделирования систем тягового электроснабжения 2×25 кВ с симметрирующими трансформаторами Вудбриджа и коаксиальными кабелями. Моделирование осуществлялось для трех вариантов: традиционная схема тяговой сети 2×25 кВ; система тягового электроснабжения, оснащенная модифицированными трансформаторами Вудбриджа; комплексное техническое решение, включающее в себя симметрирующие трансформаторы и коаксиальные кабели.

Результаты моделирования позволили сделать следующие выводы: применение коаксиальных кабелей способствует повышению уровня напряжения на токоприемниках электроподвижного состава; за счет использования модифицированных трансформаторов Вудбриджа удается существенно снизить коэффициент несимметрии по обратной последовательности на шинах высокого напряжения тяговых подстанций; наибольший эффект имеет место при комплексном применении симметрирующих трансформаторов и коаксиальных кабелей.

**Ключевые слова:** системы тягового электроснабжения, симметрирующие трансформаторы, коаксиальные кабели.

### Vasiliy P. Zakaryukin<sup>1</sup>, Andrey V. Kryukov<sup>1, 2</sup>, Ilia M. Avdienko<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Irkutsk State Transport University (ISTU), Irkutsk, the Russian Federation, <sup>2</sup>Irkutsk National Research Technical University (INRTU), Irkutsk, the Russian Federation

## SYSTEMS OF TRACTION POWER SUPPLY OF 2×25 kV WITH COAXIAL CABLES AND TRANSFORMERS OF WOODBRIDGE

**Abstract.** Transfer of railway lines on the high-speed movement demands strengthening of traction power supply system. Such strengthening can be carried out on the basis of symmetrizing transformers and coaxial cables use. Means

### Транспортная энергетика

of computer modeling of such networks which can be realized on the basis of the methods developed at Irkutsk state transport university are necessary for the solution of practical application of traction networks with the symmetrizing transformers and coaxial cables. Complex technical solution including both from the designated ways of traction power supply strengthening is of interest.

Strengthening provides the additional effects consisting in improvement of electric power quality in the feeding high-voltage networks and not traction consumers' power supply, and also in decrease in losses of the electric power and energy efficiency increase.

Results of computer modeling of 2x25 kV traction power supply systems with Woodbridge symmetrizing transformers and coaxial cables are given. Modeling was carried out for three options: traditional scheme of 2x25 kV traction network; traction power supply system equipped with the modified Woodbridge transformers; the complex technical solution which is included the symmetrizing transformers and coaxial cables.

Modeling results have allowed the following conclusions: application of coaxial cables promotes increase of contact net voltage; due to use of Woodbridge modified transformers it is possible to lower significantly negative sequence asymmetry factor on high voltage buses of traction substations; the greatest effect takes place at complex use of the symmetrizing transformers and coaxial cables.

*Keywords:* traction power supply systems, symmetrizing transformers, coaxial cables.

В настоящее время эксплуатируются и строятся железнодорожные магистрали со скоростью движения свыше 160 км/ч, которые электрифицируются преимущественно на переменном токе [1]. Для обеспечения эффективного электроснабжения при переводе электрифицированных линий на скоростное движение часто выполняют усиление системы тягового электроснабжения (СТЭ), цель которого состоит в том, чтобы уровни напряжений на токоприемниках подвижного состава (ЭПС) в нормальном режиме лежали в диапазоне 24-29 кB. В частности, к способам усиления относятся следующие [1-3]:

применение автотрансформаторной СТЭ 2×25 кВ (рисунок 1);

замена однофазных трансформаторов СТЭ 2×25 кВ на симметрирующие трансформаторы (СТ) Вудбриджа (рисунок 2);

использование СТЭ с коаксиальным кабелем (рисунок 3).

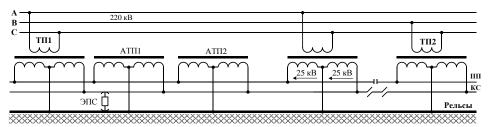
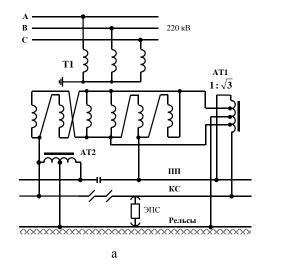
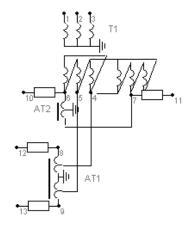


Рисунок 1 – Фрагмент схемы СТЭ 2×25 кВ: КС – контактная сеть; ПП – питающий провод; АТП – автотрансформаторные пункты; ЭПС – электроподвижной состав





б

Рисунок 2 — СТЭ 2×25 кВ с модифицированными трансформаторами Вудбриджа: а — фрагмент схемы СТЭ; б — расчетная схема; AT — автотрансформаторы

Кроме того, усиление обеспечивает дополнительные эффекты, состоящие в улучшении качества электроэнергии в питающих высоковольтных сетях и районах электроснабжения нетяговых потребителей, а также в снижении потерь электроэнергии и повышении энергоэффективности [1-3].

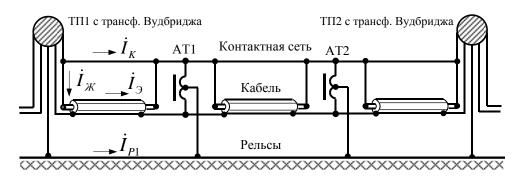


Рисунок 3 – Тяговая сеть СТЭ 2×25 кВ с модифицированными трансформаторами Вудбриджа и коаксиальными кабелями

Применение трансформаторов Вудбриджа связано с некоторым увеличением трансформаторной мощности тяговой подстанции по сравнению с классической схемой в связи с пониженным (порядка 83 %) использованием трансформаторной мощности трехфазным трансформатором и наличием двух дополнительных автотрансформаторов на подстанции. Кроме того, замена питающего провода дорогостоящим кабелем большого сечения с номинальным напряжением 55 кВ приводит к дополнительным расходам на модернизацию тяговой сети.

Для решения вопросов практического применения СТЭ с симметрирующими трансформаторами и коаксиальными кабелями необходимы средства компьютерного моделирования таких СТЭ, которые могут быть реализованы на основе методов, разработанных в ИрГУПСе [4]. Кроме того, представляет интерес рассмотрение комплексного технического решения, включающего в себя СТ и коаксиальные кабели.

В работе [6] описана модифицированная схема Вудбриджа, предназначенная для питания СТЭ  $2 \times 25$  кВ (см. рисунок 2). В этой схеме номинальное напряжение между вершинами вторичных треугольников равно 55 кВ при линейном напряжении 31.8 кВ. Автотрансформатор АТ1 повышает линейное напряжение до 55 кВ, а АТ2 обеспечивает одинаковость напряжений контактной сети и питающего провода левой межподстанционной зоны.

Использование одножильного экранированного кабеля вместо обратного провода (см. рисунок 3) одновременно со снижением влияния на смежные линии является эффективным средством стабилизации напряжения в контактной сети из-за малого активно-индуктивного сопротивления кабеля. Жила кабеля используется для усиления контактной сети, экран заменяет обратный провод системы  $2 \times 25$  кВ, поэтому требуется специализированный кабель с большим сечением жилы и экрана. В дальнейшем рассматривается кабель с сечением 300 мм $^2$  для жилы и экрана.

Система электроснабжения магистральной железной дороги (СЭЖД) переменного тока формируется на основе трехфазно-однофазных электрических сетей, для моделирования которых целесообразно использовать фазные координаты [4]. В ИрГУПСе разработаны методы моделирования СЭЖД в фазных координатах, базирующиеся на применении решетчатых схем замещения (РСЗ), которые представляют собой *RLC*-элементы, соединенные в схемы полных графов. Для РСЗ можно записать следующее формализованное определение:  $TEC:hub\bigcup con, \forall i,j \subset hub \rightarrow con_{i,j} \subset con$ , где TEC – обозначение РСЗ; hub – множество узлов РСЗ; con – множество ветвей РСЗ.

С помощью объединения РСЗ отдельных элементов трехфазно-однофазной сети в единую расчетную схему может быть реализована модель для расчета режимов. Такая методика моделирования режимов СЭЖД реализована в комплексе программ Fazonord [4]. На рисунке 2, б

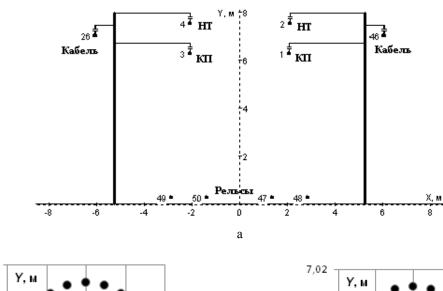
представлена расчетная схема ПК Fazonord, отвечающая модели модифицированного трансформатора Вудбриджа. Линейные напряжения трехфазного трансформатора равны 31,8 кВ, АТ1 имеет напряжения отдельных секций, равные 11,6, 15,9, 15,9, 11,6 кВ. Для остальных параметров приняты значения, аналогичные параметрам автотрансформатора АОМНЖ-16000/55.

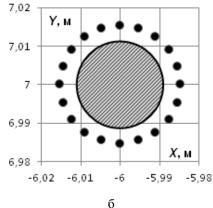
Моделирование коаксиального кабеля осуществлялось с применением методики, предложенной в работах [7, 8] и позволяющей учитывать поверхностный эффект, а также эффект близости. Основная идея методики состоит в дискретизации тока, протекающего по сечению массивного проводника (МП) и определяющего его сопротивление и магнитное поле. Дискретизация осуществляется путем представления массивной токоведущей части в виде набора элементарных проводников небольшого сечения. На основе рационального выбора шага дискретизации погрешности от замены тока МП суммой токов элементарных проводников могут быть сделаны несущественными.

Модель многопроводной системы предполагает относительную диэлектрическую проницаемость среды, равную единице, поэтому для получения необходимой эквивалентной генерации реактивной мощности можно уменьшить расстояние между жилой и проводниками экрана. При этом незначительно уменьшается индуктивность петли «жила — экран». Рассчитать требуемое расстояние D можно по формуле для емкости цилиндрического конденсатора:

$$D = d \exp\left(\frac{2\pi\varepsilon_0}{C}\right),\,$$

где d – диаметр жилы, мм; C – погонная емкость, мкФ/км.





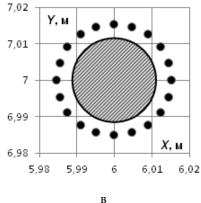
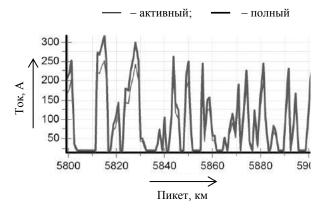


Рисунок 4 — Координаты проводов модели: а — сечение проводов тяговой сети; б — сечение проводников левого кабеля, в — правого кабеля; КП — контактный провод; НТ — несущий трос

Для анализа эффективности применения упомянутых схемных решений проведено моделирование типичной схемы СТЭ 2 × 25 кВ, включающей в себя две межподстанционные зоны протяженностью 51 км каждая. Сечение тяговой сети показано на рисунке 4, а, расположение проводов моделей коаксиальных кабелей – на рисунке 4, б. Моделировалось движение пяти нечетных поездов массой 3200 т и пяти четных поездов массой 6000 т с интервалами 25 мин. Токовые профили поездов представлены на рисунках 5, 6. Расчетные схемы моделирования, сформированные средствами комплекса Fazonord, приведены на рисунках 7 – 9.



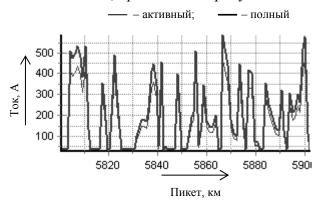


Рисунок 5 – Токовый профиль нечетного поезда

Рисунок 6 – Токовый профиль четного поезда

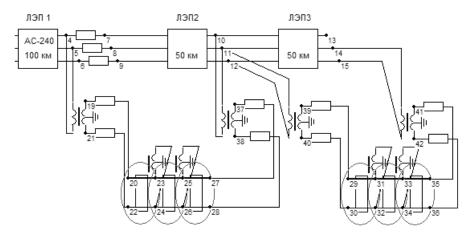


Рисунок 7 – Расчетная схема традиционной СТЭ 2 × 25 кВ

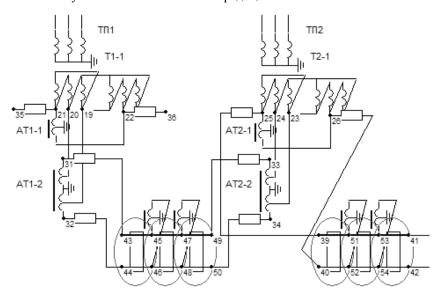


Рисунок 8 – Фрагмент расчетной схемы СТЭ с модифицированными трансформаторами Вудбриджа

Результаты моделирования в виде максимальных и средних значений напряжений на токоприемнике ЭПС, а также аналогичных показателей для коэффициента несимметрии по обратной последовательности  $k_{2U}$  сведены в таблицах 1 и 2. Временные зависимости напряжений и коэффициента несимметрии приведены на рисунках 10 и 11.

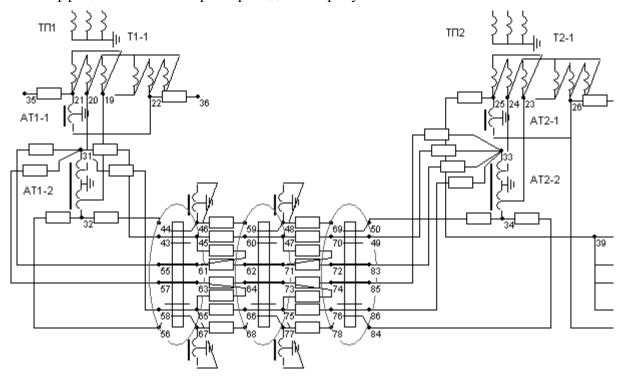


Рисунок 9 — Фрагмент расчетной схемы СТЭ 2 × 25 кВ с модифицированными трансформаторами Вудбриджа и коаксиальными кабелями

Таблица 1 – Напряжение на токоприемнике первого поезда

		Различие, %			
Параметр	ВК	В	T	Газли	чие, 70
	1	2	3	1 и 2	1 и 3
Среднее	27,5	25,0	25,0	9,3	9,3
Максимум	28,9	26,4	26,4	8,6	8,6
Минимум	24,6	20,8	21,6	15,5	12,2

Примечание: ВК – СТЭ с трансформаторами Вудбриджа и коаксиальными кабелями; В – СТЭ с трансформаторами Вудбриджа; Т – традиционная СТЭ 2  $\times$  25 кВ

Таблица 2 – Коэффициент несимметрии по обратной последовательности

			$k_{2U}$ , %	Различие, %				
ТΠ	Параметр	етр ВК В Т		T	газличие, 70			
		1	2	3	1 и 2	1 и 3		
ТП1	Среднее	0,82	0,89	1,54	-8,7	-88,1		
1111	Максимум	2,21	2,43	2,72	-10,0	-23,1		
ТП2	Среднее	1,12	1,16	2,11	-3,9	-88,8		
1112	Максимум	3,12	3,73	4,16	-19,5	-33,3		
ТП3	Среднее	1,30	1,29	2,32	0,1	-79,2		
1113	Максимум	3,51	4,41	4,87	-25,6	-38,8		

На основе полученных результатов можно сделать следующие выводы:

применение коаксиальных кабелей способствует повышению уровня напряжения на то-коприемниках ЭПС, что особенно актуально для высокоскоростных линий;

за счет использования модифицированных трансформаторов Вудбриджа в СТЭ 2 × 25 кВ удается существенно снизить коэффициент несимметрии по обратной последовательности на шинах высокого напряжения тяговых подстанций;

наибольший эффект имеет место при комплексном применении СТ и коаксиальных кабелей.

Эффекты применения отдельных технических решений по усилению системы тягового электроснабжения проявляется по-разному:

коаксиальный кабель способствует повышению уровня напряжения на токоприемниках, но весьма незначительно улучшает показатели по несимметрии;

симметрирующие трансформаторы существенно уменьшают коэффициент  $k_{2U}$ , но всего на  $0.5~\mathrm{kB}$  повышают напряжение на токоприемниках ЭПС.

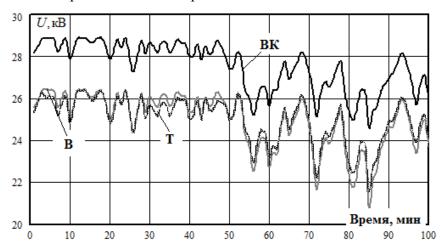


Рисунок 10 – Зависимость напряжения на токоприемнике первого поезда от времени

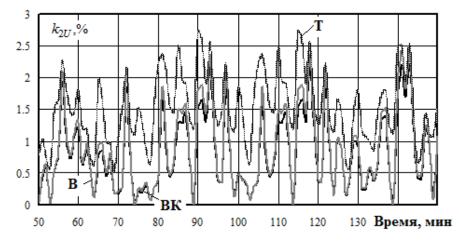


Рисунок 11 – Зависимость коэффициента несимметрии по обратной последовательности от времени

На основании изложенного можно сделать выводы.

- 1. На основе применения решетчатых схем замещения предложена методика моделирования систем тягового электроснабжения  $2 \times 25$  кВ, оснащенных модифицированными трансформаторами Вудбриджа и коаксиальными кабелями.
- 2. Применение коаксиальных кабелей способствует повышению уровня напряжения на токоприемниках электроподвижного состава. За счет использования модифицированных трансформаторов Вудбриджа удается существенно снизить коэффициент несимметрии по обратной последовательности на шинах высокого напряжения тяговых подстанций. Наибольший эффект имеет место при комплексном применении симметрирующих трансформаторов и коаксиальных кабелей.

## Список литературы

- 1. Высокоскоростной железнодорожный транспорт: общий курс [Текст] / И. П. Кисилев, Л. С. Бражко и др. / УМЦ ЖДТ. М., 2014. 308 с.
- 2. Марквардт, К. Г. Электроснабжение электрифицированных железных дорог [Текст] / К. Г. Марквардт. М.: Транспорт, 1982. 528 с.
- 3. Шалимов, М. Г. Современное состояние и пути совершенствования систем электроснабжения электрических железных дорог [Текст] / М. Г. Шалимов, Г. П. Маслов, Г. С. Магай / Омский гос. ун-т путей сообщения. Омск, 2002.-49 с.
- 4. Закарюкин, В. П. Сложнонесимметричные режимы электрических систем [Текст] / В. П. Закарюкин, А. В. Крюков / Иркутский гос. ун-т путей сообщения. Иркутск, 2005. 273 с.
- 5. Закарюкин, В. П. Устранение несимметрии в электрических сетях, питающих тяговые подстанции железных дорог [Текст] / В. П. Закарюкин, А. В. Крюков, И. М. Авдиенко // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование / Иркутский гос. ун-т путей сообщения. Иркутск. 2016. № 1(49). С. 189 195.
- 6. Трансформаторы тяговых подстанций с повышенным симметрирующим эффектом [Текст] / Р. Р. Мамошин, Б. М. Бородулин и др. // Вестник ВНИИЖТа. -1989. -№ 4. C. 22 -25.
- 7. Крюков, А. В. Моделирование систем электроснабжения с мощными токопроводами [Текст] / А. В. Крюков, В. П. Закарюкин, В. Ю. Соколов / Иркутский гос. ун-т путей сообщения. Иркутск, 2010. 80 с.
- 8. Закарюкин, В. П. Моделирование шинопроводов с массивными шинами [Текст] / В. П. Закарюкин, А. В. Крюков // Проблемы энергетики / Иркутский гос. ун-т путей сообщения. Иркутск. 2014. N2 3 (4). С. 45 53.

## References

- 1. Kisilev I. P., Brazhko L. S., Burkov A. T. *Vysokoskorostnoi zheleznodorozhnyi transport: obshchii kurs* (High-speed railway transport: general course). Moscow: UMTs ZhDT, 2014, T.1, 308 p.
- 2. Markvardt K. G. *Elektrosnabzhenie elektrifitsirovannykh zheleznykh dorog* (Power supply of the electrified railroads). Moscow: Transport, 1982, 528 p.
- 3. Shalimov M. G., Maslov G. P., Magay G. S. Sovremennoe sostoianie i puti sovershenstvovaniia sistem elektro-snabzheniia elektricheskikh zheleznykh dorog (Modern state and ways of improvement of railroad power supply system). Omsk, 2002, 49 p.
- 4. Zakaryukin V. P., Kryukov A. V. *Slozhnonesimmetrichnye rezhimy elektricheskikh sistem* (Asymmetrical modes of electric systems). Irkutsk, 2005, 273 p.
- 5. Zakaryukin V. P., Kryukov A. V., Avdiyenko I. M. Elimination of asymmetry in the electric networks feeding traction substations [Ustranenie nesimmetrii v `elektricheskih setyah, pitayuschih tyagovye podstancii zheleznyh dorog]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie Modern technologies. System analysis. Modeling*, 2016, no. 1 (49), pp. 189 195.
- 6. Mamoshin R. R., Borodulin B. M., Zelvyansky A. Ya., Titov A. F. Transformers of traction substations with the increased symmetrizing effect [Transformatory tyagovyh podstancij s povyshennym simmetriruyuschim `effektom]. *Vestnik VNIIZhTa Railway Research Institute Bulletin*, 1989, no. 4, pp. 22 25.
- 7. Kryukov A. V., Zakaryukin V. P., Sokolov V. Yu. *Modelirovanie sistem elektrosnabzheniia s moshchnymi tokoprovodami* (Modeling of power supply systems with powerful current distributors). Irkutsk, 2010, 80 p.
- 8. Zakaryukin V. P., Kryukov A. V. Modeling of buslines with massive tires [Modelirovanie shinoprovodov s massivnymi shinami]. Irkutsk, 2014, no. 3 4, 2014, pp. 45 53.

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

#### Закарюкин Василий Пантелеймонович

Иркутский государственный университет путей сообщения (ИрГУПС).

**Zakaryukin Vasiliy Panteleymonovich** Irkutsk State Transport University (ISTU). 15, Chernishvsky st., Irkutsk, 664074, the Russion

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

Доктор технических наук, профессор кафедры «Моделирования», ИрГУПС.

Тел.: +7 (3952) 63-83-45. E-mail: zakar49@mail.ru

#### Крюков Андрей Васильевич

Иркутский государственный университет путей сообщения (ИрГУПС).

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

Иркутский национальный исследовательский технический университет (ИрНИТУ).

Лермонтова ул., д. 83, г. Иркутск, 64074, Российская Федерация.

Доктор технических наук, академик Российской академии транспорта, профессор ИрГУПСа и ИрНИТУ.

Тел.: +7 (3952) 63-83-45. E-mail: and\_kryukov@mail.ru

#### Авдиенко Илья Михайлович

Иркутский государственный университет путей сообщения (ИрГУПС).

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

Аспирант, ИрГУПС. Тел.: +7 (3952) 63-83-45. E-mail: av.ila@mail.ru

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Закарюкин, В. П. Моделирование систем тягового электроснабжения  $2 \times 25$  кВ с коаксиальными кабелями и трансформаторами Вудбриджа [Текст] / В. П. Закарюкин, А. В. Крюков, И. М. Авдиенко // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. — Омск. — 2016. — 2(26).

Federation.

Doctor of Technical Sciences, Professor of Irkutsk State Transport University (ISTU).

Phone: +7 (3952) 63-83-45. E-mail: zakar49@mail.ru

#### Kryukov Andrey Vasilievich

Irkutsk State Transport University (ISTU).

15, Chernishvsky st., Irkutsk, 664074, the Russion Federation.

Irkutsk National Research Technical University (INRTU).

83, Lermontov st., Irkutsk, 664074, the Russion Federation.

Doctor of Technical Sciences, academician of the Russian Academy of Transport, professor of ISTU and INRTU.

Phone: +7 (3952) 63-83-45. E-mail: and\_kryukov@mail.ru

#### Avdienko Ilia Mihailovich

Irkutsk State Transport University (ISTU).

15, Chernishvsky st., Irkutsk, 664074, the Russion Federation.

Post-graduate student of Irkutsk State Transport University.

Phone: +7 (3952) 63-83-45. E-mail: av.ila@mail.ru

## BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Zakaryukin V. P., Kryukov A. V., Avdienko I. M. Systems of traction power supply of 2x25~kV with coaxial cables and transformers of Woodbridge. Journal of Transsib Railway Studies, 2016, vol. 26, no. 2, pp. 70-78. (In Russian).

УДК 621.316.99:621.331

В. А. Кандаев, К. В. Авдеева, А. В. Уткина, А. А. Медведева Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС), г. Омск, Российская Федерация

# РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ТОКОВ И ПОТЕНЦИАЛОВ В СИСТЕМЕ ПОДЗЕМНЫХ СООРУЖЕНИЙ В ПОЛЕ БЛУЖДАЮЩИХ ТОКОВ

Аннотация. Приведен расчет распределения электрических величин в системе, состоящей из трех проводников: первый расположен на поверхности однородной среды, два других расположены на глубине  $h_1$  и  $h_2$  соответственно. В реальных условиях проводник, расположенный на поверхности среды, соответствует рельсовому пути, а сооружения — двум трубопроводам. В качестве примера был рассмотрен участок рельсовой сети с двумя сосредоточенными нагрузками. Получены выражения для тока, потенциала и плотности тока утечки первого и второго сооружений. При выведении выражений для расчетов был использован метод преобразования Фурье. Полученые аналитические выражения показали, что присутствие второго сооружения увеличивает в первом значения электрических величин. Проведен анализ влияния тока утечки и сопротивления изоляции второго сооружения на распределение электрических величин в первом.

**Ключевые слова:** ток утечки, блуждающий ток, потенциал, подземное сооружение, преобразование Фурье.

Vasilii A. Kandaev, Ksenia V. Avdeeva, Anastasia V. Utkina, Anna A. Medvedeva Omsk State Transport University (OSTU), Omsk, the Russian Federation

# CURRENT AND POTENTIAL DISTRIBUTIONS IN A SYSTEM OF UNDERGROUND CONSTRUCTIONS UNDER THE STRAY CURRENTS INFLUENCE

**Abstract.** The paper is devoted to the calculation of the electrical quantities distribution in the system of three conductors. The first conductor is located on the surface of a uniform soil and the other two conductors are located at depths of  $h_1$  and  $h_2$ . As result, analytic expressions of current, potential and leakage current density in the first underground construction with considering the influence of the second construction was obtained. The influence of second construction increases the value of electrical quantities in the underground construction. The analytic expressions were obtained using Fourier transform method. The analysis showed the influence of the leakage current and insulation resistance of the second construction on the electric quantities distribution in the first construction.

Keywords: leakage current, stray current, potential, underground construction, Fourier transforms.

Объем перевозок электрифицированными железными дорогами в РФ составляет порядка 85 % от общего объема, что указывает на эффективность и экономическую целесообразность использования электротяги на железнодорожном транспорте. Однако несмотря на явные преимущества электрификации возникает опасность коррозионного разрушения подземных транспортных сооружений, таких как нефте- и газопроводы. Коррозия возникает в результате действия токов, стекающих с рельсов электрифицированных железных дорог постоянного тока, так называемая коррозия блуждающими токами. Блуждающие токи могут выводить из строя незащищенные своевременно сооружения в течение короткого промежутка времени [1].

При определении опасности коррозии и выборе средств защиты следует изучить характер распределения блуждающих токов. Таким образом, задача сводится к изучению распределения потенциалов и токов в системе «рельс – земля – подземное сооружение».

Вопросы, связанные с распределением блуждающих токов, отражены в работе Стрижевского И. В. [2], где приведены основные зависимости для распределения токов и потенциалов в одиночном подземном сооружении, расположенном в поле блуждающих токов. В настоящее время повсеместно используются многониточные трубопроводы, состоящие из нескольких сооружений различного диаметра. В такой системе необходимо производить расчет распределения токов и потенциалов с учетом их взаимных влияний.

Проводник длиной l (км) с радиусом  $a_p$  (км) и продольным сопротивлением  $R_p$  (Ом/км) наполовину погружен в однородную среду (землю) с удельным сопротивлением  $\rho$  (Ом·км). Между проводником и средой имеется изолирующий слой с сопротивлением  $R_u^p$  (Ом·км). Параллельно проводнику на глубине  $h_1$  (км) и  $h_2$  (км) расположены два сооружения, представляющие собой проводники бесконечной длины. Расстояние от оси проводника до сооружений соответственно равно  $y_1$  (км) и  $y_2$  (км). Радиусы проводников –  $a_{c1}$  (км) и  $a_{c2}$  (км), продольное сопротивление –  $R_{c1}$  (Ом/км) и  $R_{c2}$  (Ом/км). Проводники имеют изолирующее покрытие с сопротивлением  $R_u^{c1}$  (Ом·км) и  $R_u^{c2}$  (Ом·км). В проводнике, расположенном на поверхности среды, протекает ток  $I_p(x)$ . При этом плотность тока утечки с проводника равна  $j_p(x)$ . Ток утечки создает потенциальное поле в среде, а в сооружениях – токи  $I_{c1}(x)$  и  $I_{c2}(x)$  соответственно, при этом плотность токов утечки –  $j_{c1}(x)$  и  $j_{c2}(x)$ .

Необходимо определить распределение токов  $I_{c1}(x)$  и  $I_{c2}(x)$  при известных значениях плотности тока утечки  $j_n(x)$ .

В реальных условиях проводник, расположенный на поверхности среды, соответствует рельсовому пути, а сооружения – двум трубопроводам.

Потенциал точки среды M(x,y,z), представленной на рисунке 1, относительно бесконечно удаленной точки можно определить как суперпозицию потенциалов, создаваемых токами, стекающими с проводников, B:

$$\varphi_M(x) = \varphi_p(x) + \varphi_{c1}(x) + \varphi_{c2}(x), \tag{1}$$

где  $\varphi_p(x)$  – потенциал, обусловленный током утечки с проводника, расположенного на поверхности среды, B;

 $\phi_{c1}(x)$ ,  $\phi_{c2}(x)$  – потенциалы, обусловленные токами утечки с сооружений, В.

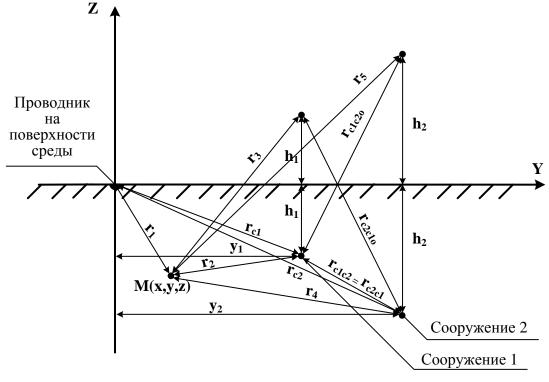


Рисунок 1 – Взаимное расположение проводников

Потенциал точки среды М относительно бесконечно удаленной точки, обусловленный током утечки с проводника, расположенного на поверхности среды [2], В,

$$\varphi_p(x) = \frac{\rho}{2\pi} \int_{-l}^{l} j_p(\xi) \frac{d\xi}{\sqrt{(x-\xi)^2 + r_1^2}},$$
(2)

а потенциалы, обусловленные токами утечки с сооружений, В, определяются по формулам:

$$\varphi_{c1}(x) = \frac{\rho}{4\pi} \left\{ \int_{-\infty}^{\infty} j_{c1}(\xi) \frac{d\xi}{\sqrt{(x-\xi)^2 + r_2^2}} + \int_{-\infty}^{\infty} j_{c1}(\xi) \frac{d\xi}{\sqrt{(x-\xi)^2 + r_3^2}} \right\}; \tag{3}$$

$$\varphi_{c2}(x) = \frac{\rho}{4\pi} \left\{ \int_{-\infty}^{\infty} j_{c2}(\xi) \frac{d\xi}{\sqrt{(x-\xi)^2 + r_4^2}} + \int_{-\infty}^{\infty} j_{c2}(\xi) \frac{d\xi}{\sqrt{(x-\xi)^2 + r_5^2}} \right\},\tag{4}$$

где  $r_1$  – расстояние от проводника на поверхности среды до точки M, км,

$$r_1 = \sqrt{y^2 + z^2}; (5)$$

 $r_2$  – расстояние от первого сооружения до точки M, км,

$$r_2 = \sqrt{(y_1 - y)^2 + (z - h_1)^2}; (6)$$

 $r_3$  – расстояние от отраженного первого сооружения до точки M, км,

$$r_3 = \sqrt{(y_1 - y)^2 + (z + h_1)^2};$$
 (7)

 $r_4$  – расстояние от второго сооружения до точки M, км,

$$r_4 = \sqrt{(y_2 - y)^2 + (z - h_2)^2};$$
 (8)

 $r_5$  – расстояние от отраженного второго сооружения до точки M, км,

$$r_5 = \sqrt{(y_2 - y)^2 + (z + h_2)^2}. (9)$$

Потенциал изолированного проводника отличается от потенциала в точке среды, прилегающей к проводнику, на падение напряжения на сопротивлении изоляции. Тогда потенциалы изолированных проводников относительно бесконечно удаленной точки запишем следующим образом:

$$\begin{cases} \phi_{p}(x) = \phi_{3-p}(x) + R_{\text{H}}^{p} j_{p}(\xi) = \frac{\rho}{2\pi} \begin{cases} \int_{-l}^{l} j_{p}(\xi) \frac{d\xi}{\sqrt{(x-\xi)^{2} + a_{p}^{2}}} + \\ + \int_{-\infty}^{\infty} j_{c1}(\xi) \frac{d\xi}{\sqrt{(x-\xi)^{2} + r_{c1}^{2}}} + \int_{-\infty}^{\infty} j_{c2}(\xi) \frac{d\xi}{\sqrt{(x-\xi)^{2} + r_{c2}^{2}}} + R_{\text{H}}^{p} j_{p}(\xi); \end{cases} \\ \phi_{c1}(x) = \phi_{3-c1}(x) + R_{\text{H}}^{c1} j_{c1}(\xi) = \frac{\rho}{4\pi} \begin{cases} 2 \int_{-l}^{l} j_{p}(\xi) \frac{d\xi}{\sqrt{(x-\xi)^{2} + r_{c1}^{2}}} + \\ + \int_{-\infty}^{\infty} j_{c1}(\xi) \frac{d\xi}{\sqrt{(x-\xi)^{2} + a_{c1}^{2}}} + \int_{-\infty}^{\infty} j_{c1}(\xi) \frac{d\xi}{\sqrt{(x-\xi)^{2} + r_{c1}^{2} c_{o2}}} \end{cases} + R_{\text{H}}^{c1} j_{c1}(\xi); \end{cases} \\ + \int_{-\infty}^{\infty} j_{c2}(\xi) \frac{d\xi}{\sqrt{(x-\xi)^{2} + r_{c1}^{2} c_{o2}}} + \int_{-\infty}^{\infty} j_{c2}(\xi) \frac{d\xi}{\sqrt{(x-\xi)^{2} + r_{c1}^{2} c_{o2}}} + R_{\text{H}}^{c1} j_{c1}(\xi); \end{cases} \\ \phi_{c2}(x) = \phi_{3-c2}(x) + R_{\text{H}}^{c2} j_{c2}(\xi) = \frac{\rho}{4\pi} \begin{cases} 2 \int_{-l}^{l} j_{p}(\xi) \frac{d\xi}{\sqrt{(x-\xi)^{2} + r_{c2}^{2}}} + \int_{-\infty}^{\infty} j_{c2}(\xi) \frac{d\xi}{\sqrt{(x-\xi)^{2} + (2h_{2})^{2}}} + I_{c2}^{\infty} \frac{d\xi}{\sqrt{(x-\xi)^{2} + (2h_{2})^{2}}} + I_{c2}^{\infty} \frac{d\xi}{\sqrt{(x-\xi)^{2} + r_{c2}^{2} c_{o2}}} + R_{\text{H}}^{c2} j_{c2}(\xi), \end{cases}$$

где  $\phi_{3-p}(x)$ ,  $\phi_{3-c1}(x)$ ,  $\phi_{3-c2}(x)$  — потенциал земли в точке, прилегающей к проводнику на поверхности среды, первому и второму сооружениям соответственно, B;

 $r_{\rm c1}$  – расстояние от проводника на поверхности среды до изолирующего покрытия первого сооружения, км,

$$r_{\rm c1} = \sqrt{y_1^2 + {h_1}^2};\tag{11}$$

 $r_{c2}$  — расстояние от проводника на поверхности среды до изолирующего покрытия второго сооружения, км,

$$r_{\rm c2} = \sqrt{y_2^2 + {h_2}^2};\tag{12}$$

 $r_{c1c2}$ ,  $r_{c2c1}$  — расстояния между сооружениями, км,

$$r_{c1c2} = r_{c2c1} = \sqrt{(y_2 - y_1)^2 + (h_2 - h_1)^2};$$
 (13)

 $r_{c1c2o}$ ,  $r_{c2c1o}$  — расстояние от отраженного второго сооружения до изолирующего покрытия первого сооружения и расстояние от отраженного первого сооружения до изолирующего покрытия второго сооружения, км,

$$r_{c1c2o} = r_{c2c1o} = \sqrt{(y_2 - y_1)^2 + (h_1 + h_2)^2}.$$
 (14)

Для линейных систем справедливы следующие выражения:

$$\begin{cases} \frac{d\varphi_{p}(x)}{dx} = -R_{p}I_{p}(x); \\ \frac{d\varphi_{c1}(x)}{dx} = -R_{c1}I_{c1}(x); \\ \frac{d\varphi_{c2}(x)}{dx} = -R_{c2}I_{c2}(x). \end{cases}$$
(15)

Обратное влияние сооружения на проводник, расположенный на поверхности среды, очень мало, поэтому им можно пренебречь [2]. Подставим выражение (15) в (10) с учетом j(x) = -I'(x). Ток в первом сооружении подчиняется следующему интегродифференциальному уравнению:

$$R_{\text{H}}^{c1}I_{c1}''(x) - R_{c1}I_{c1}(x) + \frac{\rho}{4\pi} \cdot \frac{d}{dx} \left\{ -2 \int_{-l}^{l} j_{p}(\xi) \frac{d\xi}{\sqrt{(x-\xi)^{2} + r_{c1}^{2}}} + \int_{-\infty}^{\infty} I_{c1}'(\xi) \frac{d\xi}{\sqrt{(x-\xi)^{2} + a_{c1}^{2}}} + \int_{-\infty}^{\infty} I_{c1}'(\xi) \frac{d\xi}{\sqrt{(x-\xi)^{2} + (2h_{1})^{2}}} + \int_{-\infty}^{\infty} I_{c2}'(\xi) \frac{d\xi}{\sqrt{(x-\xi)^{2} + r_{c1c2}^{2}}} + \int_{-\infty}^{\infty} I_{c2}'(\xi) \frac{d\xi}{\sqrt{(x-\xi)^{2} + r_{c1c2o}^{2}}} \right\} = 0.$$
(16)

Решим данное уравнение методом преобразования Фурье, обозначив образ функции I(x):

$$I(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} I(x)e^{i\omega x}dx.$$
 (17)

Тогда выражение (16) примет вид:

$$-\omega^{2}R_{H}^{c1} \int_{-\infty}^{\infty} I_{c1}(x)e^{i\omega x}dx - R_{c1} \int_{-\infty}^{\infty} I_{c1}(x)e^{i\omega x}dx - \frac{\rho}{4\pi} \times \frac{d}{dx} \left\{ 2 \int_{-\infty}^{\infty} e^{i\omega x}dx \int_{-l}^{l} j_{p}(\xi) \frac{d\xi}{\sqrt{(x-\xi)^{2} + r_{c1}^{2}}} + \right.$$
(18)

$$+ i\omega \int_{-\infty}^{\infty} e^{i\omega x} dx \int_{-\infty}^{\infty} I_{c1}(\xi) \frac{d\xi}{\sqrt{(x-\xi)^{2} + a_{c1}^{2}}} + i\omega \int_{-\infty}^{\infty} e^{i\omega x} dx \int_{-\infty}^{\infty} I_{c1}(\xi) \frac{d\xi}{\sqrt{(x-\xi)^{2} + (2h_{1})^{2}}} + i\omega \int_{-\infty}^{\infty} e^{i\omega x} dx \int_{-\infty}^{\infty} I_{c2}(\xi) \frac{d\xi}{\sqrt{(x-\xi)^{2} + r_{c1c2}^{2}}} + i\omega \int_{-\infty}^{\infty} e^{i\omega x} dx \int_{-\infty}^{\infty} I_{c2}(\xi) \frac{d\xi}{\sqrt{(x-\xi)^{2} + r_{c1c2o}^{2}}} = 0.$$

С учетом свойства преобразования Фурье в случае бесконечных пределов [2]

$$\int_{-\infty}^{\infty} e^{i\omega x} dx \int_{-l}^{l} F(\xi) \frac{d\xi}{\sqrt{(x-\xi)^2 + a^2}} = 2K_0[a|\omega|] f(\omega), \tag{19}$$

где  $F(\xi)$  – подынтегральная функция;

 $f(\omega)$  – образ функции  $F(\xi)$ ;

 $K_0$  — функция Макдональда нулевого порядка.

Обозначив

$$I_{c1}(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} I_{c1}(\xi) e^{i\omega\xi} d\xi, \tag{20}$$

получаем:

$$-\omega^{2} R_{\text{H}}^{c1} I_{c1}(\omega) - R_{c1} I_{c1}(\omega) - \frac{i\omega\rho}{2\pi} \left\{ 2K_{0}[r_{c1}|\omega|] \int_{-l}^{l} j_{p}(\xi) e^{i\omega\xi} d\xi + i\omega K_{0}[a_{c1}|\omega|] I_{c1}(\omega) + i\omega K_{0}[2h_{1}|\omega|] I_{c1}(\omega) + i\omega K_{0}[r_{c1c2}|\omega|] I_{c2}(\omega) + i\omega K_{0}[r_{c1c2o}|\omega|] I_{c2}(\omega) \right\} = 0.$$
(21)

Из уравнения (21) выразим  $I_{c1}(\omega)$ :

$$I_{c1}(\omega) = \frac{-\rho i \omega}{2\pi} \times \frac{2K_0[r_{c1}|\omega|] \int_{-l}^{l} j_p(\xi) e^{i\omega\xi} d\xi + i\omega (K_0[r_{c1c2}|\omega|] + K_0[r_{c1c2o}|\omega|]) I_{c2}(\omega)}{R_{c1} + \omega^2 \left[ R_{\text{H}}^{c1} + \frac{\rho}{2\pi} (K_0[a_{c1}|\omega|] + K_0[2h_1|\omega|]) \right]}.$$
(22)

Аналогично найдем образ функции тока для второго сооружения:

$$I_{c2}(\omega) = \frac{-\rho i \omega}{2\pi} \times \frac{2K_0[r_{c2}|\omega|] \int_{-l}^{l} j_p(\xi) e^{i\omega\xi} d\xi + i\omega(K_0[r_{c2c1}|\omega|] + K_0[r_{c2c1o}|\omega|])I_{c1}(\omega)}{R_{c2} + \omega^2 \left[R_{\text{H}}^{c2} + \frac{\rho}{2\pi}(K_0[a_{c2}|\omega|] + K_0[2h_2|\omega|])\right]}.$$
(23)

Обозначим переходное сопротивление сооружений, Ом·км, приняв  $|\omega|$  за константу, при которой будет наилучшее приближение:

$$R_{\Pi}^{c1} = R_{\Pi}^{c1} + \frac{\rho}{2\pi} (K_0[a_{c1}\alpha_{c1}] + K_0[2h_1\alpha_{c1}]); \tag{24}$$

$$R_{\Pi}^{c2} = R_{\Pi}^{c2} + \frac{\rho}{2\pi} (K_0[a_{c2}\alpha_{c2}] + K_0[2h_2\alpha_{c2}]); \tag{25}$$

$$R_{\pi}^{p} = R_{\mu}^{p} + \frac{\rho}{\pi} K_{0} \left[ a_{p} \alpha_{p} \right], \tag{26}$$

взаимные сопротивления между сооружениями, Ом км:

$$R_{\pi}^{c1c2} = \frac{\rho}{2\pi} \left( K_0 \left[ r_{c1c2} \sqrt{\alpha_{c1} \alpha_{c2}} \right] + K_0 \left[ r_{c1c2o} \sqrt{\alpha_{c1} \alpha_{c2}} \right] \right); \tag{27}$$

$$R_{\pi}^{c2c1} = \frac{\rho}{2\pi} \left( K_0 \left[ r_{c2c1} \sqrt{\alpha_{c1} \alpha_{c2}} \right] + K_0 \left[ r_{c2c1o} \sqrt{\alpha_{c1} \alpha_{c2}} \right] \right), \tag{28}$$

взаимные сопротивления между сооружением и проводником на поверхности, Ом км:

$$R_{\pi}^{c1p} = \frac{\rho}{\pi} K_0 \left[ r_{c1} \sqrt{\alpha_{c1} \alpha_p} \right]; \tag{29}$$

$$R_{\pi}^{c2p} = \frac{\rho}{\pi} K_0 \left[ r_{c2} \sqrt{\alpha_{c2} \alpha_p} \right], \tag{30}$$

где  $\alpha_{c1}$ ,  $\alpha_{c2}$ ,  $\alpha_p$  — коэффициенты утечки токов с изолированных проводников,  $1/\kappa$ м,

$$\alpha_{c1} = \sqrt{\frac{R_{c1}}{R_{\pi}^{c1}}}; \tag{31}$$

$$\alpha_{c2} = \sqrt{\frac{R_{c2}}{R_{n}^{c2}}}; (32)$$

$$\alpha_p = \sqrt{\frac{R_p}{R_{\pi}^p}}.$$
 (33)

Подставив выражение (23) в уравнение (22), с учетом (24) – (33) получим:

$$I_{c1}(\omega) = \frac{1}{R_{\Pi}^{c1}} \frac{\left[ i\omega R_{\Pi}^{c1p} + \frac{i\omega^{3}}{R_{\Pi}^{c2}} \cdot \frac{R_{\Pi}^{c2p} R_{\Pi}^{c1c2}}{\alpha_{c2}^{2} + \omega^{2}} \right] f(\omega)}{R_{\Pi}^{c1} R_{\Pi}^{c2}} \cdot \frac{R_{\Pi}^{c1c2} R_{\Pi}^{c2c1}}{\alpha_{c2}^{2} + \omega^{2}} - (\alpha_{c1}^{2} + \omega^{2})},$$
(34)

где

$$f(\omega) = \int_{-l}^{l} j_p(\xi) e^{i\omega\xi} d\xi.$$
 (35)

Аналогично запишем образ тока во втором сооружении, подставив выражение (22) в (23):

$$I_{c2}(\omega) = \frac{1}{R_{\pi}^{c2}} \frac{\left[ i\omega R_{\pi}^{c2p} + \frac{i\omega^{3}}{R_{\pi}^{c1}} \cdot \frac{R_{\pi}^{c1p} R_{\pi}^{c2c1}}{\alpha_{c1}^{c2} + \omega^{2}} \right] f(\omega)}{\frac{\omega^{4}}{R_{\pi}^{c1} R_{\pi}^{c2}} \cdot \frac{R_{\pi}^{c1c2} R_{\pi}^{c2c1}}{\alpha_{c1}^{c2} + \omega^{2}} - (\alpha_{c2}^{2} + \omega^{2})}.$$
 (36)

Расчет показал, что для любых значений аргументов погрешность при замене в уравнениях (34) и (36) первого слагаемого знаменателя нулем составляет менее 1 %, поэтому данным слагаемым в последующих расчетах можно пренебречь.

Из формул (34) и (36) видно, что токи в сооружениях зависят от тока в рельсовой сети, который в свою очередь зависит от количества подстанций, локомотивов на участке от -l до l и переходного сопротивления рельсовой сети [2].

Рассмотрим участок рельсовой сети длиной l с двумя сосредоточенными нагрузками, представленный на рисунке 2. Ток утечки с рельсовой сети рассчитывается по выражению [2]:

$$-j_p(x) = I_p'(x) = \frac{-I_H \alpha_p}{\operatorname{sh}(\alpha_p l)} \left( \operatorname{ch}(\alpha_p x) - \operatorname{ch}(\alpha_p (l - x)) \right), \tag{37}$$

где  $I_{\rm H}$  — ток нагрузки, А.

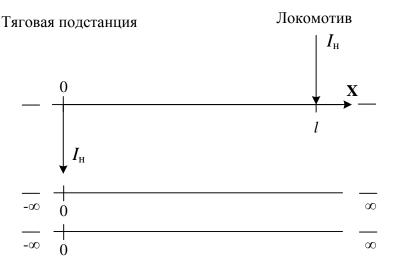


Рисунок 2 – Участок рельсовой сети с двумя сосредоточенными нагрузками

Найдем функцию  $f(\omega)$  на участке 0 < x < 1:

$$f(\omega) = \frac{-I_{\rm H}\alpha_p}{\sinh(\alpha_p l)} \int_0^l \left( \cosh(\alpha_p x) - \cosh(\alpha_p (l-x)) \right) e^{i\omega\xi} d\xi = \frac{-I_{\rm H}\alpha_p}{\sinh(\alpha_p l)(\alpha_p^2 + \omega^2)} \times \left\{ \alpha_p \sinh(\alpha_p l) e^{i\omega l} - i\omega \cosh(\alpha_p l) e^{i\omega l} + i\omega + \alpha_p \sinh(\alpha_p l) + i\omega \cosh(\alpha_p l) - i\omega e^{i\omega l} \right\}.$$
(38)

Взяв обратное преобразование Фурье

$$I_{c1}(x) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} I_{c1}(\omega) e^{-i\omega x} d\omega, \tag{39}$$

получим распределение токов в первом сооружении с учетом влияния второго сооружения:

$$I_{c1}(x) = I_{c1}^{1}(x) + I_{c1}^{2}(x) = \frac{-I_{H}\alpha_{p}}{2\pi R_{\Pi}^{c1} sh(\alpha_{p}l)} \times$$
(40)

$$\times \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\omega i R_{\Pi}^{c1p} (\alpha_{p} \operatorname{sh}(\alpha_{p} l) e^{i\omega l} - i\omega \operatorname{ch}(\alpha_{p} l) e^{i\omega l} + i\omega + \alpha_{p} \operatorname{sh}(\alpha_{p} l) +}{(\alpha_{c1}^{2} + \omega^{2}) (\alpha_{p}^{2} + \omega^{2})} \rightarrow \frac{+i\omega \operatorname{ch}(\alpha_{p} l) - i\omega e^{i\omega l}) e^{-i\omega x} d\omega}{(\alpha_{c1}^{2} + \omega^{2}) (\alpha_{p}^{2} + \omega^{2})} + \frac{-I_{H}\alpha_{p}}{2\pi R_{\Pi}^{c1} R_{\Pi}^{c2} \operatorname{sh}(\alpha_{p} l)} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\omega^{3} i R_{\Pi}^{c2p} R_{\Pi}^{c1c2} (\alpha_{p} \operatorname{sh}(\alpha_{p} l) e^{i\omega l} - i\omega \operatorname{ch}(\alpha_{p} l) e^{i\omega l} + i\omega +}{(\alpha_{c1}^{2} + \omega^{2}) (\alpha_{c2}^{2} + \omega^{2}) (\alpha_{p}^{2} + \omega^{2})} \rightarrow \frac{+\alpha_{p} \operatorname{sh}(\alpha_{p} l) + i\omega \operatorname{ch}(\alpha_{p} l) - i\omega e^{i\omega l}) e^{-i\omega x} d\omega}{(\alpha_{c1}^{2} + \omega^{2}) (\alpha_{c2}^{2} + \omega^{2}) (\alpha_{p}^{2} + \omega^{2})},$$

где  $I_{c1}^{1}(x)$  – ток в первом сооружении, обусловленный влиянием рельсовой сети, А;

 $I_{c1}^{2}(x)$  – ток в первом сооружении, обусловленный влиянием второго сооружения, А. Если второе сооружение отсутствует, то формула (40) совпадает с выражением, приведенным в работе [2].

Подставим выражение для расчета  $I_{c1}(x)$  в уравнение (15) и найдем распределение потенциалов первого сооружения  $\phi_{c1}(x)$  относительно бесконечно удаленной точки:

$$\varphi_{c1}(x) = \varphi_{c1}^{1}(x) + \varphi_{c1}^{2}(x) = \frac{I_{H}\alpha_{p}R_{c1}}{2\pi R_{\Pi}^{c1} \operatorname{sh}(\alpha_{p}l)} \times \\
\times \int_{-\infty}^{\infty} \frac{R_{\Pi}^{c1p}(\alpha_{p} \operatorname{sh}(\alpha_{p}l)e^{i\omega l} - i\omega \operatorname{ch}(\alpha_{p}l)e^{i\omega l} + i\omega + \alpha_{p} \operatorname{sh}(\alpha_{p}l) +}{(\alpha_{c1}^{2} + \omega^{2})(\alpha_{p}^{2} + \omega^{2})} \to \\
+ \frac{i\omega \operatorname{ch}(\alpha_{p}l) - i\omega e^{i\omega l})e^{-i\omega x}d\omega}{(\alpha_{c1}^{2} + \omega^{2})(\alpha_{p}^{2} + \omega^{2})} + \\
+ \frac{I_{H}\alpha_{p}R_{c1}}{2\pi R_{\Pi}^{c1}R_{\Pi}^{c2} \operatorname{sh}(\alpha_{p}l)} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\omega^{2}R_{\Pi}^{c2p}R_{\Pi}^{c1c2}(\alpha_{p} \operatorname{sh}(\alpha_{p}l)e^{i\omega l} - i\omega \operatorname{ch}(\alpha_{p}l)e^{i\omega l} + i\omega +}{(\alpha_{c1}^{2} + \omega^{2})(\alpha_{c2}^{2} + \omega^{2})(\alpha_{p}^{2} + \omega^{2})} \to \\
+ \frac{+\alpha_{p} \operatorname{sh}(\alpha_{p}l) + i\omega \operatorname{ch}(\alpha_{p}l) - i\omega e^{i\omega l})e^{-i\omega x}d\omega}{(\alpha_{c1}^{2} + \omega^{2})(\alpha_{c2}^{2} + \omega^{2})}, \tag{41}$$

где  $\varphi_{c1}^1(x)$  – потенциал первого сооружения, обусловленный током утечки с рельсовой

 $\varphi_{c1}^2(x)$  – потенциал первого сооружения, обусловленный током утечки со второго сооружения, В

Аналогичным образом определим ток  $I_{c2}(x)$  и потенциал  $\varphi_{c2}(x)$  относительно бесконечно удаленной точки во втором сооружении с учетом влияния первого:

$$I_{c2}(x) = I_{c2}^{1}(x) + I_{c2}^{2}(x) = \frac{-I_{H}\alpha_{p}}{2\pi R_{\Pi}^{c2} \operatorname{sh}(\alpha_{p}l)} \times$$

$$\times \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\omega i R_{\Pi}^{c2p}(\alpha_{p} \operatorname{sh}(\alpha_{p}l) e^{i\omega l} - i\omega \operatorname{ch}(\alpha_{p}l) e^{i\omega l} + i\omega + \alpha_{p} \operatorname{sh}(\alpha_{p}l) +}{(\alpha_{c2}^{2} + \omega^{2})(\alpha_{p}^{2} + \omega^{2})} \rightarrow$$

$$\to \frac{+i\omega \operatorname{ch}(\alpha_{p}l) - i\omega e^{i\omega l}) e^{-i\omega x} d\omega}{(\alpha_{c2}^{2} + \omega^{2})(\alpha_{p}^{2} + \omega^{2})} +$$

$$+ \frac{-I_{H}\alpha_{p}}{2\pi R_{\Pi}^{c1} R_{\Pi}^{c2} \operatorname{sh}(\alpha_{p}l)} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\omega^{3} i R_{\Pi}^{c1p} R_{\Pi}^{c2c1}(\alpha_{p} \operatorname{sh}(\alpha_{p}l) e^{i\omega l} - i\omega \operatorname{ch}(\alpha_{p}l) e^{i\omega l} + i\omega +}{(\alpha_{c1}^{2} + \omega^{2})(\alpha_{c2}^{2} + \omega^{2})(\alpha_{p}^{2} + \omega^{2})} \rightarrow$$

$$(42)$$

$$\frac{+\alpha_{p}\operatorname{sh}(\alpha_{p}l) + i\omega\operatorname{ch}(\alpha_{p}l) - i\omega e^{i\omega l})e^{-i\omega x}d\omega}{(\alpha_{c1}^{2} + \omega^{2})(\alpha_{c2}^{2} + \omega^{2})(\alpha_{p}^{2} + \omega^{2})};$$

$$\varphi_{c2}(x) = \varphi_{c2}^{1}(x) + \varphi_{c2}^{2}(x) = \frac{I_{H}\alpha_{p}R_{c2}}{2\pi R_{\Pi}^{c2}\operatorname{sh}(\alpha_{p}l)} \times$$

$$\times \int_{-\infty}^{\infty} \frac{R_{\Pi}^{c2p}(\alpha_{p}\operatorname{sh}(\alpha_{p}l)e^{i\omega l} - i\omega\operatorname{ch}(\alpha_{p}l)e^{i\omega l} + i\omega + \alpha_{p}\operatorname{sh}(\alpha_{p}l) + (\alpha_{c2}^{2} + \omega^{2})(\alpha_{p}^{2} + \omega^{2})}{(\alpha_{c2}^{2} + \omega^{2})(\alpha_{p}^{2} + \omega^{2})} + \frac{i\omega\operatorname{ch}(\alpha_{p}l) - i\omega e^{i\omega l}e^{-i\omega x}d\omega}{(\alpha_{c2}^{2} + \omega^{2})(\alpha_{p}^{2} + \omega^{2})} + \frac{I_{H}\alpha_{p}R_{c2}}{2\pi R_{\Pi}^{c1}R_{\Pi}^{c2}\operatorname{sh}(\alpha_{p}l)} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\omega^{2}R_{\Pi}^{c1p}R_{\Pi}^{c2c1}(\alpha_{p}\operatorname{sh}(\alpha_{p}l)e^{i\omega l} - i\omega\operatorname{ch}(\alpha_{p}l)e^{i\omega l} + i\omega + (\alpha_{p}l)e^{i\omega l}e^{i\omega l}e^{i\omega$$

где  $I_{c2}^1(x)$ ,  $\varphi_{c2}^1(x)$  – ток, A, и потенциал, B, во втором сооружении, обусловленные влиянием рельсовой сети;

 $I_{c2}^2(x)$ ,  $\varphi_{c2}^2(x)$  — ток, A, и потенциал, B, во втором сооружении, обусловленные влиянием первого сооружения.

Из выражений (40) и (42) можно определить плотности токов утечки в сооружениях  $j_{c1}(x)$  и  $j_{c2}(x)$ , А/км:

$$j_{c1}(x) = -l'_{c1}(x) = \frac{l_{\text{H}}\alpha_{\text{p}}}{2\pi R_{\text{n}}^{c_1} \text{sh}(\alpha_{\text{p}} l)} \times \\ \times \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\omega^2 i R_{\text{n}}^{c_1 p}(\alpha_{\text{p}} \text{sh}(\alpha_{\text{p}} l) e^{i\omega l} - i\omega \text{ch}(\alpha_{\text{p}} l) e^{i\omega l} + i\omega + \alpha_{\text{p}} \text{sh}(\alpha_{\text{p}} l) +}{(\alpha_{c1}^2 + \omega^2)(\alpha_{\text{p}}^2 + \omega^2)} \rightarrow \\ \frac{+i\omega \text{ch}(\alpha_{\text{p}} l) - i\omega e^{i\omega l}) e^{-i\omega x} d\omega}{(\alpha_{c1}^2 + \omega^2)(\alpha_{\text{p}}^2 + \omega^2)} + \\ + \frac{l_{\text{H}}\alpha_{\text{p}}}{2\pi R_{\text{n}}^{c_1} R_{\text{n}}^{c_2} \text{sh}(\alpha_{\text{p}} l)} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\omega^4 i R_{\text{n}}^{c_2 p} R_{\text{n}}^{c_1 c_2}(\alpha_{\text{p}} \text{sh}(\alpha_{\text{p}} l) e^{i\omega l} - i\omega \text{ch}(\alpha_{\text{p}} l) e^{i\omega l} + i\omega +}{(\alpha_{c1}^2 + \omega^2)(\alpha_{c2}^2 + \omega^2)(\alpha_{\text{p}}^2 + \omega^2)} \rightarrow \\ \frac{+\alpha_{\text{p}} \text{sh}(\alpha_{\text{p}} l) + i\omega \text{ch}(\alpha_{\text{p}} l) - i\omega e^{i\omega l}) e^{-i\omega x} d\omega}{(\alpha_{c1}^2 + \omega^2)(\alpha_{c2}^2 + \omega^2)(\alpha_{\text{p}}^2 + \omega^2)};$$

$$\chi \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\omega^2 i R_{\text{n}}^{c_2 p}(\alpha_{\text{p}} \text{sh}(\alpha_{\text{p}} l) e^{i\omega l} - i\omega \text{ch}(\alpha_{\text{p}} l) e^{i\omega l} + i\omega + \alpha_{\text{p}} \text{sh}(\alpha_{\text{p}} l) +}{(\alpha_{c2}^2 + \omega^2)(\alpha_{\text{p}}^2 + \omega^2)} \rightarrow \\ \frac{+i\omega \text{ch}(\alpha_{\text{p}} l) - i\omega e^{i\omega l}) e^{-i\omega x} d\omega}{(\alpha_{c2}^2 + \omega^2)(\alpha_{\text{p}}^2 + \omega^2)} + \\ \frac{+i\omega \text{ch}(\alpha_{\text{p}} l) - i\omega e^{i\omega l}) e^{-i\omega x} d\omega}{(\alpha_{c2}^2 + \omega^2)(\alpha_{\text{p}}^2 + \omega^2)} + \\ \frac{+i\omega \text{ch}(\alpha_{\text{p}} l) - i\omega e^{i\omega l}) e^{-i\omega x} d\omega}{(\alpha_{c1}^2 + \omega^2)(\alpha_{\text{p}}^2 + \omega^2)} + \\ \frac{+i\omega \text{ch}(\alpha_{\text{p}} l) + i\omega \text{ch}(\alpha_{\text{p}} l) e^{i\omega l} - i\omega \text{ch}(\alpha_{\text{p}} l) e^{i\omega l} + i\omega +}{(\alpha_{\text{p}} l)^2 e^{i\omega l} + i\omega +} \rightarrow \\ \frac{+i\omega \text{ch}(\alpha_{\text{p}} l) + i\omega \text{ch}(\alpha_{\text{p}} l) - i\omega e^{i\omega l}) e^{-i\omega x} d\omega}{(\alpha_{c1}^2 + \omega^2)(\alpha_{\text{c2}}^2 + \omega^2)(\alpha_{\text{p}}^2 + \omega^2)} -} \rightarrow \\ \frac{+\alpha_{\text{p}} \text{sh}(\alpha_{\text{p}} l) + i\omega \text{ch}(\alpha_{\text{p}} l) - i\omega e^{i\omega l}) e^{-i\omega x} d\omega}{(\alpha_{c1}^2 + \omega^2)(\alpha_{c2}^2 + \omega^2)(\alpha_{\text{p}}^2 + \omega^2)} -} \rightarrow \\ \frac{+\alpha_{\text{p}} \text{sh}(\alpha_{\text{p}} l) + i\omega \text{ch}(\alpha_{\text{p}} l) - i\omega e^{i\omega l}) e^{-i\omega x} d\omega}{(\alpha_{\text{c}}^2 + \omega^2)(\alpha_{\text{p}}^2 + \omega^2)} -} \rightarrow \\ \frac{+\alpha_{\text{p}} \text{sh}(\alpha_{\text{p}} l) + i\omega \text{ch}(\alpha_{\text{p}} l) - i\omega e^{i\omega l}) e^{-i\omega x} d\omega}{(\alpha_{\text{c}}^2 + \omega^2)(\alpha_{\text{p}}^2 + \omega^2)} -} \rightarrow \\ \frac{+\alpha_{\text{p}} \text{sh}(\alpha_{\text{p}} l) + i\omega \text{ch}(\alpha_{\text{p}} l) - i\omega e^{i\omega l}} e^{-i\omega x} d\omega}{(\alpha_{\text{c}}^2 + \omega^2)(\alpha_{\text{p}}^2 + \omega^2)} -} \rightarrow \\ \frac{+\alpha_{\text{p}} \text{sh}(\alpha_{\text{p}} l$$

На рисунках 3 и 4 показаны кривые распределения токов и потенциалов в первом и втором сооружениях для случая, когда l=20 км,  $a_p=1,16$  м (для двухпутного участка железной дороги),  $R_p=0,0077$  Ом/км,  $\rho=50$  Ом·м,  $R_\mu^p=2,16$  Ом·км,  $\alpha_p=0,058$  1/км,  $h_1=0,7$  м,  $h_2=0,8$  м,  $y_1=75$  м,  $y_2=95$  м,  $a_{c1}=a_{c2}=0,41$  м,  $R_{c1}=R_{c2}=0,012$  Ом/км,  $I_{\rm H}=1000$  A,  $R_\mu^{c1}=711$  Ом·м,  $R_\mu^{c2}=319$  Ом·м,  $\alpha_{c1}=0,12$  1/км,  $\alpha_{c2}=0,16$  1/км.

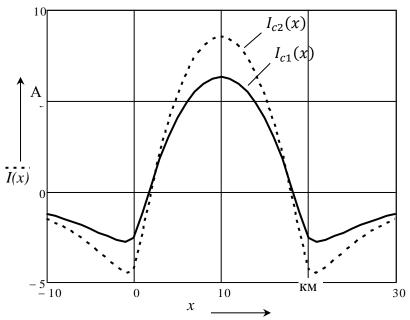


Рисунок 3 – Графики распределения токов в сооружениях

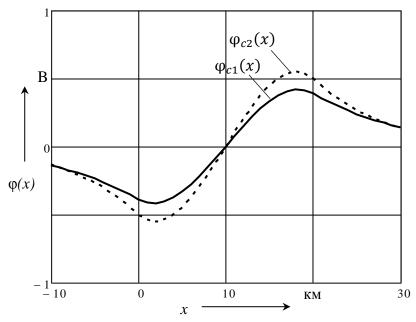


Рисунок 4 – Графики распределения потенциалов сооружений

Максимальное значение тока в сооружениях наблюдается в середине участка длиной *l*. Ток во втором сооружении больше тока в первом, так как сопротивление его изоляции почти в два раза меньше, чем у первого сооружения. Если параметры трубопроводов одинаковы, ток в первом сооружении будет больше, поскольку расстояние до рельсовой сети меньше. Максимальное по модулю значение потенциала относительно бесконечно удаленной точки наблюдается в районе подключения сосредоточенных нагрузок.

При значении сопротивления изоляции  $R_{\rm u} > 215~{\rm Om}\cdot{\rm m}$  влияние второго сооружения составляет менее 10 %. Однако, длительно находясь в эксплуатации, параметры изоляции

ухудшаются, а величина токов утечки растет, таким образом, влияние соседних сооружений друг на друга возрастает. На рисунках 5 и 6 представлен случай, когда значение сопротивления изоляции второго сооружения  $R_{\rm u}^{c2}=144~{\rm Om\cdot m}$ . Расчет показал, что наличие второго сооружения увеличивает значение тока в первом на 15 %, а значение потенциала – на 10 %.

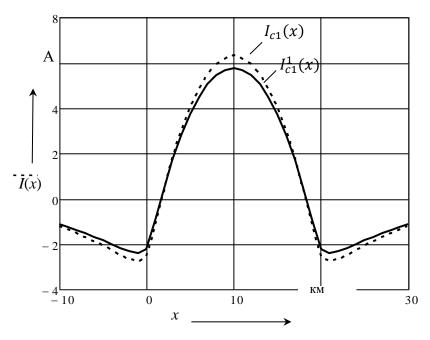


Рисунок 5 – Графики распределения токов в первом сооружении при  $R_{\rm H}^{c2}=144~{\rm Om\cdot m}$ 

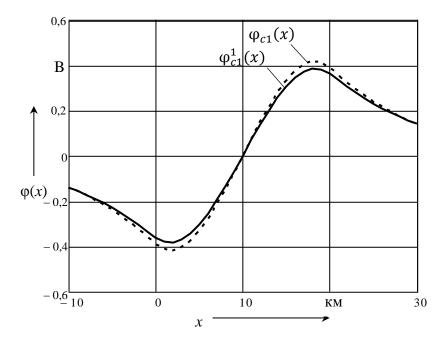


Рисунок 6 – Графики распределения потенциалов первого сооружения при  $R_{\rm u}^{c2}=144~{\rm Om\cdot m}$ 

На рисунке 7 представлены графики распределения плотности токов в первом и втором сооружениях. Максимальное по модулю значение плотности тока наблюдается в районе подключения сосредоточенных нагрузок.

На основании изложенного можно сделать вывод: получены аналитические выражения для расчета токов, потенциалов и плотности токов в системе из двух подземных сооружений, расположенных в поле блуждающих токов рельсовой сети электрифицированного железнодорожного транспорта. Из полученных выражений следует, что присутствие второго сооружения увеличивает в первом значение потенциалов, токов и плотности токов, величина ко-

торых в свою очередь зависит от количества подземных сооружений и их параметров, а также от расстояния между ними и расстояния до рельсовой сети.

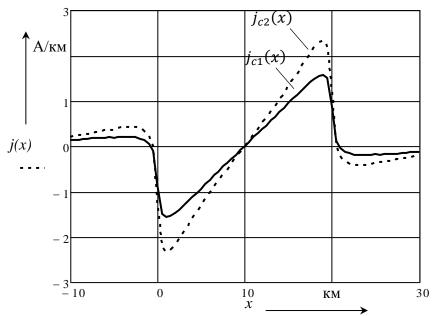


Рисунок 7 – Графики распределения плотности токов в сооружениях

## Список литературы

- 1. Котельников, А. В. Блуждающие токи и эксплуатационный контроль коррозионного состояния подземных сооружений систем электроснабжения железнодорожного транспорта: Монография [Текст] / А. В. Котельников, В. А. Кандаев / УМЦ ЖДТ РФ. М., 2013. 552 с.
- 2. Стрижевский, И. В. Теория и расчет дренажной и катодной защиты магистральных трубопроводов от коррозии блуждающими токами [Текст] / И. В. Стрижевский. М.: Государственное науч.-техн. изд-во нефтяной и горно-топливной литературы, 1963. 240 с.

#### References

- 1. Kotelnikov A. V., Kandaev V. A. *Bluzhdayuschie toki i ekspluatatsionnyiy kontrol korrozionnogo sostoyaniya podzemnyih sooruzheniy sistem elektrosnabzheniya zheleznodorozhnogo transporta* (Stray currents and corrosion monitoring of underground facilities of railway supply systems). Moscow, 2013, 552 p.
- 2. Strizhevskij I. V., *Teoriya i raschet drenazhnoj i katodnoj zashchity magistralnyh trubo-provodov ot korrozii bluzhdayushchimi tokami* (Theory and design of drainage and cathode protection of pipelines from stray currents corrosion). Moscow, 1963, 240 p.

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

## Кандаев Василий Андреевич

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

Доктор технических наук, профессор кафедры «Инфокоммуникационные системы и информационная безопасность», ОмГУПС.

Тел.: +7 (3812) 31-06-94.

## Авдеева Ксения Васильевна

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

#### Kandaev Vasilii Andreevich

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Doctor of Technical Sciences, Professor of the department «Information and communication systems and information security», OSTU.

Phone: +7 (3812) 31-06-94.

#### Avdeeva Ksenia Vasilyevna

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Ph. D., senior lecturer of the department «Information and communication systems and information security», OSTU.

Phone: +7 (3812) 31-06-94.

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Инфокоммуникационные системы и информационная безопасность», ОмГУПС.

Тел.: +7 (3812) 31-06-94.

#### Уткина Анастасия Владимировна

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

Аспирант кафедры «Инфокоммуникационные системы и информационная безопасность», ОмГУПС.

E-mail: a.utkina.e@gmail.com

#### Медведева Анна Александровна

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

Аспирант кафедры «Инфокоммуникационные системы и информационная безопасность», ОмГУПС.

E-mail: maa1024@yandex.ru

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Кандаев, В. А. Распределение токов и потенциалов в системе подземных сооружений в поле блуждающих токов [Текст] / В. А. Кандаев, К. В. Авдеева, А. В. Уткина, А. А. Медведева // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. — Омск. — 2016. — N 2 (26). — С. 78 — 91.

#### Utkina Anastasia Vladimirovna

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Post-graduate student of the department «Information and communication systems and information security», OSTU.

E-mail: a.utkina.e@gmail.com

#### Medvedeva Anna Alexandrovna

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx st., Omsk, 644046, the Russion Federation. Post-graduate student of the department «Infor-

mation and communication systems and information security», OSTU.

E-mail: maa1024@yandex.ru

## BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Kandaev V. A., Avdeeva K. V., Utkina A. V., Medvedeva A. A. Current and potential distributions in a system of underground constructions under the stray currents influence. Journal of Transsib Railway Studies, 2016, vol. 26, no. 2, pp. 78 – 91. (In Russian).

УДК 629.423.1:629.423.31:621.316.727

#### Ю. М. Кулинич, С. А. Шухарев

Дальневосточный государственный университет путей сообщения (ДВГУПС), г. Хабаровск, Российская Федерация

# ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЭКСТРЕМАЛЬНОГО РЕГУЛЯТОРА КАК СРЕДСТВА ПОВЫШЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА МОЩНОСТИ ТИРИСТОРНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

Аннотация. Рассмотрено устройство для компенсации реактивной мощности электровоза, выполненного на базе регулируемого пассивного компенсатора. Такая конфигурация компенсатора позволяет повысить коэффициент мощности электровоза во всех режимах его работы за счет приближения значения коэффициента мощности к его максимально возможным значениям. Управление компенсатором осуществляется методом экстремального регулирования напряжения на выходе автономного инвертора напряжения. Математическое моделирование работы электровоза с таким компенсатором, выполненное в пакете Matlab, показало возможность повышения коэффициента мощности до значения 0,98.

**Ключевые слова:** электровоз, компенсатор реактивной мощности, коэффициент мощности, система экстремального регулирования, модель тягового трансформатора, модель тягового электродвигателя.

#### Yuri M. Kulinich, Sergey A. Shuharev

Far Eastern State Transport University (FESTU), Khabarovsk, the Russian Federation

## USE EXTREMUM CONTROL SYSTEM FOR THE INCREASE POWER FACTOR IN THYRISTOR CONVERTER

**Abstract.** In the paper the device for reactive power compensation for the electric locomotives based on passive adjustable compensator was described. This configuration of the compensator improve the power factor of the electric

locomotive in all operational modes and raise value of the power factor to its maximum possible value. The management of the compensator unit is based on the extremum seeking control autonomous voltage inverter. Mathematical modeling of electric locomotive showed increase the power factor to a value of 0,98.

**Keywords:** electric locomotive, compensator of reactive power, power factor, extremum control system, model traction transformer, model traction motor.

Одним из приоритетных направлений принятой в ОАО «РЖД» энергетической стратегии развития железнодорожного транспорта до 2030 года является рациональное использование топливно-энергетических ресурсов за счет повышения энергетических показателей эксплуатируемого и перспективного подвижного состава. В области научных исследований предусматривается повышение коэффициента мощности и коэффициента полезного действия электровозов за счет применения компенсаторов реактивной мощности (КРМ).

В настоящее время основную часть эксплуатируемого парка составляют электровозы переменного тока с выпрямительно-инверторными преобразователями, имеющими низкий коэффициент мощности, достигающий значения 0,84 лишь в конце четвертой зоны регулирования. Эксплуатация таких электровозов приводит к значительному увеличению реактивной мощности тяговой сети. Согласно расчетам [1] протекание в тяговой сети 1 А реактивного тока вызывает в пять — семь раз большие потери напряжения, чем передача 1 А активного тока. Таким образом, повышение энергетических показателей электровозов с зонно-фазовым регулированием напряжения остается актуальной задачей.

В настоящее время имеется опыт применения на электровозах переменного тока различных типов пассивных компенсаторов реактивной мощности, состоящих из последовательно соединенных конденсатора C и индуктивности L. Компенсатор подключается к вторичной обмотке тягового трансформатора через электронный ключ, состоящий из двух встречнопараллельно соединенных тиристоров. Параметры LC-цепи рассчитываются из условия компенсации реактивной мощности электровоза в номинальном режиме его работы.

Известно, что коэффициент мощности электровоза  $K_{_{\mathrm{M}}}$  определяется отношением потребленной активной мощности P к полной мощности S:

$$K_{\rm M} = \frac{P}{S} = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}} = \cos\phi \cdot \nu. \tag{1}$$

Из соотношения (1) следует, что максимальное значение коэффициента мощности можно достичь за счет уменьшения потребления реактивной мощности Q. Так как электровоз представляет собой активно-индуктивную нагрузку, в качестве компенсатора используется конденсатор. Если через конденсатор компенсатора протекает емкостный ток, равный и противоположный по фазе индуктивному току нагрузки, то достигается полная компенсации реактивной мощности. При этом электровоз потребляет из сети только активную мощность, реализуемую в тяговых электродвигателях. Для полной компенсации реактивной мощности электровоза должно выполняться соотношение  $Q_{\rm эл} = Q_{\rm KPM}$ , т. е. реактивная мощность компенсатора  $Q_{\rm KPM}$  определяется реактивной мощностью электровоза  $Q_{\rm эл}$ .

В свою очередь реактивная мощность  $Q_{\text{крм}}$  определяется емкостью конденсатора C компенсатора и напряжением  $U_C$  на его обкладках:

$$Q_{\rm KPM} = \omega C U_C^2. \tag{2}$$

Нерегулируемый КРМ для отечественного электроподвижного состава предложен сотрудниками ВНИИЖТа [2]. Принцип работы устройства заключается в сокращении отставания фазы  $\varphi$  первой гармоники потребляемого электровозом тока и повышения коэффициента мощности за счет увеличения  $\cos\varphi$ .

Реактивная мощность неуправляемого КРМ выбирается из условия компенсации реактивной мощности в номинальном режиме работы электровоза. В отличных от номинального режимах работы происходит либо перекомпенсация, либо недокомпенсация реактивной мощности, что является существенным недостатком такого компенсатора.

Для устранения недостатка нерегулируемого КРМ предложена схема переключаемого пассивного КРМ [3], изменяющая мощность компенсатора в зависимости от реактивной мощности электровоза. Согласно выражению (2) реактивную мощность пассивного компенсатора  $Q_{\rm KPM}$  можно изменить за счет изменения напряжения на конденсаторе компенсатора. На практике это реализуется путем подключения КРМ к различным секциям вторичной обмотки тягового трансформатора с разными напряжениями. Испытания переключаемого КРМ на электровозе 3ЭС5К показали [4], что среднее значение  $K_{\rm M}$  во всем диапазоне токовых нагрузок сохраняется на уровне 0,9. Таким образом, переключаемый КРМ позволяет повысить коэффициент мощности в нескольких фиксированных режимах работы электровоза.

Однако полная компенсация реактивной мощности электровоза может быть достигнута только в случае изменения реактивной мощности компенсатора одновременно с изменением реактивной мощности электровоза. Структурная схема регулируемого пассивно компенсатора, реализующая такой подход, разработана в ДВГУПСе [5] (рисунок 1).

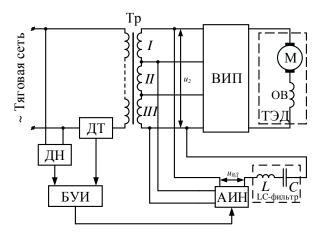


Рисунок 1 – Структурная блок-схема регулируемого пассивного КРМ

Трансформатор (Тр), выпрямительно-инверторный преобразователь (ВИП) и тяговый двигатель (ТЭД) представляют собой штатную схему электровоза. Силовую часть регулируемого компенсатора составляют пассивный LC-фильтр с последовательно подключенным автономным инвертором напряжения (АИНом).

В замкнутом контуре электрической цепи, состоящем из вторичной обмотки трансформатора Тр, емкости C, индуктивности L и АИНа, в соответствии со вторым законом Кирхгофа выполняется соотношение:

$$u_2 + u_{\text{BJI}} = U_L + U_C,$$
 (3)

где  $u_2$  – напряжение на вторичной обмотке тягового трансформатора, B;

 $u_{\rm BJ}$  – вольтодобавочное напряжение, В;

 $U_{\scriptscriptstyle L}$  – напряжение на индуктивности компенсатора, В;

 $U_{\it c}$  – напряжение на конденсаторе компенсатора, В.

Изменение реактивной мощности компенсатора, в соответствии с выражением (2), происходит за счет изменения напряжения  $U_C$  на конденсаторе компенсатора. В этой связи при постоянном напряжении  $u_2$  вторичной обмотки трансформатора регулирование напряжения  $U_C$  осуществляется за счет изменения напряжения  $u_{\rm BJ}$  на выходе АИНа. В этом случае

напряжение на конденсаторе  $U_C$  (при малом значении  $U_L$ ) определяется суммарным напряжением вторичной обмотки трансформатора  $u_2$  и добавочным напряжением  $u_{\rm BJ}$ , формируемым АИНом.

Блок управления инвертором (БУИ) формирует управляющие воздействия для автономного инвертора напряжения в соответствии с вычисленной с помощью датчиков напряжения (ДН) и тока (ДТ) реактивной мощностью электровоза. АИН формирует на своем выходе такое добавочное напряжение  $u_{\rm BД}$ , которое изменяет реактивную мощность компенсатора  $Q_{\rm KPM}$ , при котором выполняется равенство  $Q_{\rm эл} = Q_{\rm KPM}$  во всех режимах работы электровоза. Таким образом, благодаря плавному изменению реактивной мощности компенсатора  $Q_{\rm KPM}$  достигается полная компенсация реактивной мощности электровоза во всех режимах его работы.

При анализе структуры управления компенсатором (см. рисунок 1) реактивной мощности было установлено, что она может быть существенно упрощена в случае применения системы экстремального регулирования [6], которая для компенсатора реактивной мощности не предусматривает непосредственного вычисления реактивной мощности электровоза. В этом случае управление компенсатором сводится к достижению и поддержанию экстремально высоких значений коэффициента мощности за счет пошагового изменения напряжения вольтодобавки  $u_{\rm BД}$ . При этом значение коэффициента мощности находится в диапазоне, определяемом зоной нечувствительности регулятора. Таким образом, в случае применения экстремального регулятора все изменения в структуре компенсатора сводятся только к изменению способа регулирования напряжения  $u_{\rm BД}$  инвертора [7]. Система экстремального регулирования может быть применена для компенсатора, имеющего параболическую зависимость регулируемой величины с одним экстремумом. Назначение системы управления компенсатором сводится к регулированию напряжения  $u_{\rm BД}$ , при котором коэффициент мощности будет максимален и поддерживается в заданном диапазоне. Структурная схема экстремального регулятора представлена на рисунке 2.

Экстремальный регулятор работает следующим образом: сигнал x с выхода объекта регулирования поступает на узел задержки  $Z^{-1}$ , реализующий задержку координаты x на время одного шага работы регулятора. Элемент сравнения (ЭС) вычитает из текущего  $x_i$  предыдущее значения  $x_{i-1}$ , а полученная разность  $\Delta x$  поступает на вход сигнум-реле (СР), осуществляющего выбор направления следующего шага поиска. Исполнительный элемент (ИЭ) изменяет управляющее воздействие  $g_{\rm BД}$  (напряжение вольтодобавки) на входе объекта регулирования.

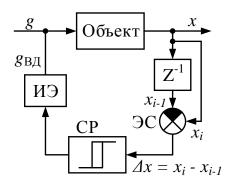


Рисунок 2 – Структурная схема экстремального регулятора

Таким образом, принцип работы системы управления сводится к сравнению показателя качества (коэффициента мощности) на текущем  $Q(x_i)$  и предыдущем  $Q(x_{i-1})$  шагах поиска и выработке управляющего воздействия в соответствии с выражением:

$$\Delta g_{\text{BJI}i} = \Delta g \cdot sign \left[ Q(x_{i-1}) - Q(x_i) \right], \tag{4}$$

где  $\Delta g_{\mathrm{BJ}i}$  – приращение напряжения вольтодобавки на i-м шаге, B;

 $\Delta g$  — шаг приращения напряжения вольтодобавки, В;

 $Q(x_{i-1})$  и  $Q(x_i)$  – значение коэффициента мощности на i-l и i-м шагах.

При  $sign[Q(x_{i-1})-Q(x_i)]=+1$  направление приращения напряжения  $\Delta g_{\rm BJ}$  (направление поиска) выбирается таким же, как на i-1-м шаге, а при  $sign[Q(x_{i-1})-Q(x_i)]=-1$  приращение  $\Delta g_{\mathrm{B}\mathrm{J}}$  выбирается в противоположном направлении. Исполнительный элемент, выполненный на базе АИНа, изменяет напряжение на компенсаторе на величину  $\Delta g$ . Благодаря этому можно изменять реактивную мощность КРМ в сторону либо увеличения, либо уменьшения, при этом коэффициент мощности электровоза поддерживается на экстремально высоком уровне. При регулировании реактивной мощности значение  $K_{_{\mathrm{M}}}$  находится в области зоны нечувствительности  $\delta$ , которой соответствуют экстремально высокие значения коэффициента мощности. На рисунке 3 приведен пример работы экстремального регулятора, осуществляющего поиск максимального значения функции Q = f(g). В качестве целевой функции может быть использован коэффициент мощности. Система управления в каждый период времени T изменяет управляющее воздействие на величину  $\Delta g$ , постепенно приближаясь к экстремуму, находящемуся в зоне нечувствительности δ (заштрихованная на рисунке 3 область). От начальной точки 1 (см. рисунок 3) экстремальный регулятор начинает поиск максимального значения функции Q = f(g) и на следующем шаге (точка 2) вычисляется разность значений коэффициентов мощности  $\Delta Q_{2-1}$ . Из рисунка 3 следует, что в процессе поиска уменьшается значение  $\Delta Q$ , а при входе в зону нечувствительности (начиная с точки 5) становится меньше  $\delta$  ( $\Delta Q_{6-5} < \delta$ ).

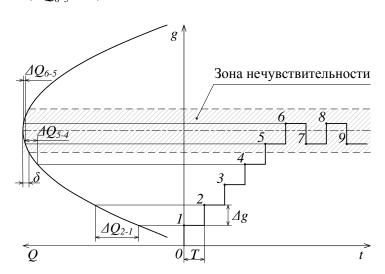


Рисунок 3 – Пример схемы работы поиска

При неизменных параметрах объекта управления экстремальный регулятор будет совершать циклические поисковые действия, поддерживая показатель качества на экстремально высоком уровне.

Для проверки работоспособности преобразователя электровоза, оборудованного экстремальным регулятором, выполнено математическое моделирование работы отдельных узлов системы «тяговая подстанция — электровоз» в системе *Matlab*. В разработанной модели использовался двенадцатиосный электровоз ВЛ85, получающий питание от тяговой подстанции с напряжением 25 кВ. Тяговый трансформатор электровоза ОНДЦЭ-10000/25-82УХЛ2 моделировался нелинейным трансформатором *Saturable Transformer*, позволяющим реализо-

вать нелинейную характеристику намагничивания его сердечника. Кривая намагничивания задается в виде кусочно-линейной характеристики зависимости магнитного потока сердечника  $\Phi$  от тока намагничивания i. В качестве материала магнитопровода трансформатора используется листовая холоднокатаная электротехническая сталь марки 3411, имеющая лучшие магнитные свойства по сравнению с горячекатаной. Значения  $\Phi$  и i кривой намагничивания этой стали, определяющие параметры индуктивности намагничивания  $L_m$ , попарно вносятся в окно параметров модели нелинейного трансформатора Saturable Transformer, изображенного на рисунке 4.

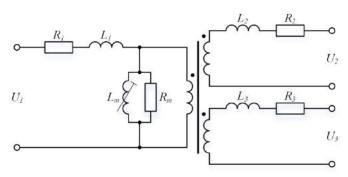


Рисунок 4 – Схема модели нелинейного трансформатора:

 $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$  — соответственно активные сопротивления первичной и вторичных обмоток трансформатора;  $L_1$ ,  $L_2$ ,  $L_3$  — индуктивности рассеяния соответственно первичной и вторичных обмоток трансформатора;  $R_m$  — активное сопротивление цепи намагничивания;  $L_m$  — нелинейная индуктивность цепи намагничивания

Активное сопротивление цепи намагничивания  $R_m$  рассчитывается по паспортным данным мощности потерь холостого хода трансформатора [8] и номинального напряжения первичной обмотки.

В результате моделирования установлено, что действующее значение тока холостого хода  $i_o$  составило 1,66 A, форма тока показана на рисунке 5.

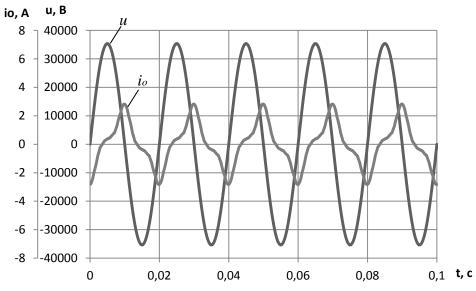


Рисунок 5 – Напряжение и ток холостого хода модели трансформатора

Из графика тока  $i_0$  видно, что в его форме присутствуют высшие гармонические составляющие. В результате анализа, выполненного методом быстрого преобразования Фурье, установлено, что наибольшей по величине является третья гармоника тока, амплитуда которой составила 33,3 % от амплитуды первой гармоники. Это соотношение соответствует классическому представлению о работе трансформатора, изложенному в работе [9].

За основу модели тягового электродвигателя выбран двигатель НБ-514 электровоза ВЛ85. Для полноты описания электромагнитных процессов, протекающих в электродвигателе, в модели учтено действие вихревых токов, проявляющих себя в переходных режимах работы. Расчетная схема включения двигателя показана на рисунке 6. С помощью индуктивного элемента  $L_{\rm BX}$  и сопротивления  $r_{\rm BX}$  учитываются потери от вихревых токов. Шунтирующее сопротивление  $r_{\rm III}$  постоянно подключено к обмотке возбуждения и служит для снижения пульсаций тока  $i_{\rm B}$  в этой обмотке.

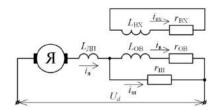


Рисунок 6 – Схема модели тягового электродвигателя

Дифференциальные уравнения, описывающие работу двигателя [10], для удобства решения приведены к каноническому виду:

$$\frac{di_{s}}{dt} = \frac{1}{L_{s+\pi}} \left( U_{d} - C_{e} \nu \Phi - r_{s+\pi} i_{s} - r_{b} i_{b} - L_{b} \frac{di_{b}}{dt} \right); \tag{5}$$

$$i_{a} = i_{p} + i_{m}; \tag{6}$$

$$L_{\mu} \frac{d\Phi_{1}}{dt} = i_{\text{B}} w_{\text{B}} - 1.23 R_{\mu \text{I}} \Phi_{1} - f(\Phi) + R_{\mu \text{I}} \Phi; \tag{7}$$

$$0.475L_{\mu}\frac{d}{dt}(\Phi - \Phi_{1}) = i_{B}W_{B} - 5.29R_{\mu 1}(\Phi - \Phi_{1}) - f(\Phi) + R_{\mu 1}\Phi.$$
 (8)

В результате математического моделирования двигателя установлено, что кривая затухания противо ЭДС двигателя согласуется с экспериментальными данными, полученными сотрудниками ВЭлНИИ (г. Новочеркасск). Расхождение между этими данными  $R^2$ , оцененное коэффициентом детерминации, составило 0,953, что свидетельствует о правомерности использования разработанной модели двигателя.

На рисунке 7 представлена модель системы «тяговая подстанция – электровоз, оборудованный КРМ с экстремальным регулятором».

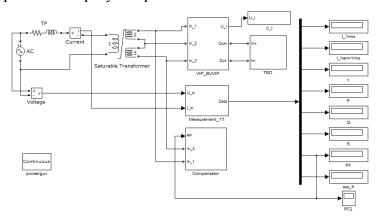


Рисунок 7 – Блок-схема модели электровоза с экстремальным регулятором

Модель тяговой подстанции представлена идеальным источником синусоидального напряжения AC с последовательно включенными индуктивностью и активным сопротивлением TP, учитывающими параметры тяговой подстанции. Модель электровоза показана в виде тягового трансформатора  $Saturable\ Transformer$ , блока выпрямительно-инверторного преобразователя  $VIP\_BUVIP$  и цепи нагрузки, состоящей из блока тяговых двигателей TED.

Измерительный блок показан в виде модуля  $Measument\_1T$  с индикаторами энергетических показателей, представленными в правой части схемы. Алгоритм экстремального регулирования реализован в блоке Compensator.

В процессе моделирования принято: шаг приращения напряжения вольтодобавки  $\Delta g = 20~\mathrm{B}$ , величина зоны нечувствительности  $\delta = 0{,}001$ , время одного цикла поиска  $T = 20~\mathrm{mc}$  (период сетевого напряжения).

На рисунке 8 приведен график коэффициента мощности электровоза с включенным экстремальным регулятором.

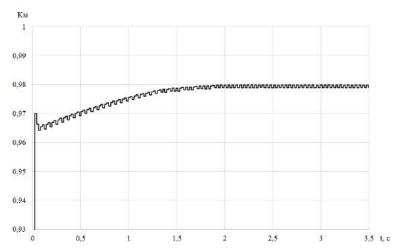


Рисунок 8 – Результат работы экстремального регулятора

Из рисунка 8 следует, что после достижения экстремального значения коэффициента мощности, равного 0,98, система экстремального регулирования поддерживает его на этом уровне.

На основании изложенного можно сделать следующие выводы.

- 1. Использование в схеме пассивного компенсатора реактивной мощности экстремального регулятора позволяет эффективно компенсировать реактивную мощность электровоза с зонно-фазовым регулированием напряжения.
- 2. Результаты математического моделирования подтверждают правильность выбора экстремального регулятора в качестве системы автоматического управления компенсатором реактивной мощности.

## Список литературы

- 1. Мамошин, Р. Р. Энергетика системы переменного тока [Текст] / Р. Р. Мамошин // Железнодорожный транспорт. -1987. -№ 9. C. 69 70.
- 2. Широченко, Н. Н. Улучшение энергетики электровозов переменного тока [Текст] / Н. Н. Широченко, В. А. Татарников, З. Г. Бибинеишвили // Железнодорожный транспорт. -1988. № 7. C. 33 37.
- 3. Пат. 2212086 Российская Федерация, МПК В60L 9/12 (2006.1) Устройство для компенсации реактивной мощности [Текст] / Кулинич Ю. М., Савоськин А. Н.; заявитель и патентообладатель ООО «ЭЛМЕХтранс А». №2001127970/09; заявл. 16.10.2001; опубл. 10.09.2003, Бюл. № 24.
- 4. Копанев, А. С. Испытания системы компенсации реактивной мощности на электровозе 3ЭС5К [Текст] / А. С. Копанев, П. А. Хрипков, В. М. Волков // Вестник Всероссийского научно-исследовательского и проектно-конструкторского института электровозостроения. Новочеркасск. 2010. Т. 2 (60). С. 14 36.
- 5. Пат. 2467893 Российская Федерация, МПК В60L 9/00 (2006.1) Устройство для компенсации реактивной мощности электроподвижного состава [Текст] / Кулинич Ю. М.,

Духовников В. К.; заявитель и патентообладатель Дальневосточный гос. ун-т путей сообщения. – 2011115446/11; заявл. 19.04.2011; опубл. 27.11.2012, Бюл. №33.

- 6. Либерзон, Л. М. Шаговые экстремальный системы [Текст] / Л. М. Либерзон, А. Б. Родов. М.: Энергия, 1969. 96 с.
- 7. Заявка на изобретение 2015133534 Российская Федерация. Устройство для компенсации реактивной мощности электроподвижного состава / Кулинич Ю. М., Шухарев С. А. Заявл. 10.08.2015.
- 8. Тушканов Б. А. Электровоз ВЛ85: руководство по эксплуатации [Текст] / Б. А. Тушканов, Н. Г. Пушкарев, Л. А. Позднякова. М.: Транспорт, 1992. 480 с.
- 9. Кацман, М. М. Электрические машины: Учебник [Текст] / М. М. Кацман. М.: Академия, 2008.-496 с.
- 10. Кулинич, Ю. М. Адаптивная система автоматического управления гибридного компенсатора реактивной мощности электровоза с плавным регулированием напряжения: Монография [Текст] / Ю. М. Кулинич / Дальневосточный гос. ун-т путей сообщения. Хабаровск, 2001. 153 с.

## References

- 1. Mamoshin R. R. AC Power System [Energetika sistemi peremennogo toka]. *Zheleznodorozhnyi transport Railway transport*, 1987, no. 9, pp. 69 70.
- 2. Shirochenko N. N., Tatarnikov V. A., Bibineyshvili Z. G. Improving Energy AC locomotives [Uluchenie energetiki elektrovozov peremennogo toka]. *Zheleznodorozhnyi transport Railway transport*, 1988, no. 7, pp. 33 37.
  - 3. Kulinich Y. M., Savoskin A. N. Patent RU 2212086, 2003.
- 4. Kopanev A. S., Khripkov P. A., Volkov V. M. Test for reactive power compensation system locomotive 3ES5K [Ispitania sistemi kompensacii reactivnoi moshnosti na elektrovoze 3ES5K]. Vestnik Vserossiiskogo nauchno-issledovatel'skogo i proektno-konstruktorskogo instituta elektrovozostroeniia Bulletin of the All-Russian Research and Design Institute of electric locomotive, 2010, V. 2 (60), pp. 14 36.
  - 5. Kulinich Y. M., Duhovnikov V. K. Patent RU 2467893, 2012.
  - 6. Liberson L. M. Shagovie ekstrmal'nie sistemi (Stepping Extreme system). Moscow, 1969, 96 p.
  - 7. Kulinich Y. M., Shukharev S. A. Claim for a discovery RU 2015133534.
- 8. Tushkanov B. A., Pushkarev N. G., Pozdnyakova L. A. *Elektrovoz VL85* (Electric locomotive VL85). Moscow, 1992, 480 p.
  - 9. Katzman M. M. Elektricheskie mashini (Electric machines). Moscow, 2008, 496 p.
- 10. Kulinich Y. M. Adaptivnaa sistema avtomaticheskogo upravlenia gibridnogo kompensatora reaktivnoi moshnosti elektrovoza s plavnim regulirovaniem naprazenia: Monografiia (Adaptive automatic control system of the hybrid electric reactive power compensator with a smooth voltage regulation).

Khabarovsk, 2001, 153 p.

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

#### Кулинич Юрий Михайлович

Дальневосточный государственный университет путей сообщения (ДВГУПС).

Серышева ул., д. 47, г. Хабаровск, 680021, Российская Федерация.

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

Тел.: +7 (4212) 40-70-76. E-mail: kulinitsch@rambler.ru

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

#### Kulinich Yuri Mikhailovich

Far Eastern State Transport University (FESTU). 47, Serysheva st. Khabarovsk, 680021, the Russion Federation.

Doctor of Technical Sciences, Professor of the department «Locomotive», FESTU.

Phone: +7 (4212) 40-70-76. E-mail: kulinitsch@rambler.ru

## Шухарев Сергей Анатольевич

Дальневосточный государственный университет путей сообщения (ДВГУПС).

Серышева ул., д. 47, г. Хабаровск, 680021, Российская Федерация.

Преподаватель кафедры «Локомотивы», ДВГУПС.

Тел.: +7 (4212) 40-70-76. E-mail: ab cd@mail.ru

## **Shuharev Sergey Anatolevich**

Far Eastern State Transport University (FESTU). 47, Serysheva st. Khabarovsk, 680021, the Russion Federation.

Lecturer of the department «Locomotive», FESTU.

Phone: +7 (4212) 40-70-76. E-mail: ab cd@mail.ru

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Кулинич, Ю. М. Использование экстремального регулятора как средства повышения коэффициента мощности тиристорного преобразователя [Текст] / Ю. М. Кулинич, С. А. Шухарев // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. — Омск. — 2016. —  $N \ge 2$  (26). — С. 91 — 100.

#### BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Kulinich Y. M., Shuharev S. A. Use extremum control system for the increase power factor in thyristor converter. Journal of Transsib Railway Studies, 2016, vol. 26, no. 2, pp. 91 - 100. (In Russian).

УДК 621.331.5

#### Ю. В. Москалев, Г. Г. Ахмедзянов

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

# ОПРЕДЕЛЕНИЕ МЕСТА РАЗМЕЩЕНИЯ И МОЩНОСТИ КОМПЕНСИРУЮЩЕГО УСТРОЙСТВА В СИСТЕМЕ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА ДВУХПУТНОГО УЧАСТКА ПО МИНИМУМУ ПОТЕРЬ АКТИВНОЙ МОЩНОСТИ

Аннотация. В статье рассмотрен один из способов повышения энергетической эффективности системы тягового электроснабжения переменного тока магистральных железных дорог 25 кВ, 50 Гц. Предложенный подход позволяет определить оптимальное место размещения и мощность нерегулируемого устройства поперечной емкостной компенсации по критерию минимума потерь активной мощности в тяговой сети. Моделирование движения поездов на участке было выполнено с использованием мгновенных схем, описание системы тягового электроснабжения реализовано методом узловых потенциалов и комплексным методом, определение оптимальных значений реактивной мощности для всех возможных мест размещения компенсирующего устройства было рассчитано численным оптимизационным методом Хука – Дживса по критерию минимума потерь активной мощности в тяговой сети. Математическая модель позволяет учитывать элементы тяговой сети, графики движения поездов, изменение тяговых токов электровозов, схемы питания контактной сети. Предложенный подход был рассмотрен на примере тестовой задачи, в результате решения которой были определены оптимальное место размещения и необходимая реактивная мощность нерегулируемого компенсирующего устройства. Размещение компенсирующего устройства в определенном месте на участке позволит минимизировать потери мощности в контактной сети, рельсовой цепи и тяговых трансформаторах от протекания реактивной составляющей тока в среднем для всех мгновенных схем с различными тяговыми нагрузками. Одно нерегулируемое компенсирующее устройство на межподстанционной зоне позволяет снизить расход электроэнергии на тягу поездов на 1-2 %.

Ключевые слова: электроэнергия, компенсирующее устройство, тяга поездов, коэффициент мощности.

#### Yuriy V. Moskalev, Gayaz G. Ahmedzyanov

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

# THE DEFINITION OF THE LOCATION AND CAPACITY OF THE COMPENSATING DEVICE IN THE AC ELECTRICAL POWER SYSTEM OF RAILWAYS BY MINIMUM OF ACTIVE POWER LOSSES

**Abstract.** The article considers one of the ways of improving the energy efficiency of AC electrical system railways 25 kV, 50 Hz. The proposed approach allows to determine the optimal location and capacity of an unregulated device for

№ 2(26) 2016

compensation reactive power according to the criterion of minimum active power losses in a traction electrical system. Modeling of trains on the site was made using instant schemes. Description of the traction power supply system implemented by the node potential method and Steinmetz's symbolic method. Optimal value of reactive power for all possible locations of a compensating device was calculated numerically by an optimization method of Hooke-Jeeves according to the criterion of minimum active power losses in the traction network. The mathematical model allows to consider the elements of the traction network, schedules of trains, change of traction loads of electric locomotives, schemes of overhead network. The proposed approach was considered on the example test problem, which solution allowed to determinate the optimal location and required value of reactive power of an technical device. The placement of a compensating device in a certain place will allows to minimize the power loss in the contact network, track circuit and traction transformers from the flow of the reactive component of the current in average for all instant schemes with various traction loads. An unregulated technical device for compensating reactive power which is located between two traction substations reduces energy consumption for traction of trains on the  $1-2\,\%$ .

**Keywords:** electrical energy, compensating device, traction of trains, power factor.

Повышение энергетической эффективности железнодорожных перевозок является важным направлением научных исследований. В настоящее время существует множество организационных и технических мероприятий, позволяющих снизить расход электрической энергии на тягу поездов [1]. Одним из известных способов повышения энергоэффективности системы тягового электроснабжения переменного тока и электрических сетей общего назначения является компенсация реактивной мощности. В тяговой сети переменного тока магистральных железных дорог реактивная мощность потребляется электровозами переменного тока, коэффициент мощности которых зависит от режима работы электровоза (в режиме тяги  $\cos \varphi = 0.5 - 0.85$ ; в режиме рекуперативного торможения  $\cos \varphi = 0.25 - 0.55$ ). На межподстанционной зоне в соответствии с графиком движения перемещаются несколько четных и нечетных поездов, это является причиной изменения потребляемой реактивной мощности во времени в разных точках участка. При оптимальном сочетании компенсирующих устройств (КУ) на электровозах с устройствами в системе тягового электроснабжения расход электроэнергии на тягу поездов может быть уменьшен на 3-4 % [2].

Актуальной проблемой для железнодорожного транспорта является увеличение пропускной и провозной способности участков, один из способов ее решения — формирование и пропуск поездов повышенной массы (6 тыс. т и более). При этом значительно возрастает токовая нагрузка на элементы системы тягового электроснабжения, снижается уровень напряжения в контактной сети, увеличиваются потери электроэнергии. Использование КУ позволяет усилить систему тягового электроснабжения благодаря уменьшению реактивной составляющей и высших гармоник токов в тяговой сети и, следовательно, уменьшить нагрев электрооборудования и контактной подвески, увеличить действующее значение напряжения, снизить несимметрию напряжения (при размещении на тяговых подстанциях). Увеличение напряжения в контактной сети также способствует увеличению участковой скорости поездов.

Известно большое количество научных работ, направленных на разработку регулируемых и нерегулируемых КУ для систем тягового электроснабжения железных дорог [3 – 6], на совершенствование алгоритмов управления, на определение технической и экономической эффективности и других особенностей проектирования и эксплуатации таких устройств [3, 7, 8].

Наиболее рациональным местом размещения КУ является место потребления реактивной мощности, т. е. электроподвижной состав (ЭПС) [4]. При этом усложняется схема электровоза, увеличиваются эксплуатационные затраты. При размещении КУ в системе тягового электроснабжения необходимо определить для него оптимальное место размещения и мощность. Существующие нормативные документы и руководящие технические материалы (оптимизационный, нормативный и другие методы расчета) обеспечивают единую техническую политику при выборе средств компенсации реактивной мощности для тяговых электрических сетей [9]. Переход к схемно-техническим расчетам с максимально возможным учетом

элементов тяговой сети, графиков движения поездов, схем питания и других факторов позволит значительно повысить эффективность применения устройств поперечной емкостной компенсации для улучшения качества электроэнергии, усиления системы тягового электроснабжения и повышения энергетической эффективности тяговых сетей переменного тока железных дорог.

Для определения места размещения и мощности нерегулируемого КУ на межподстанционной зоне в системе тягового электроснабжения переменного тока двухпутного участка необходимо произвести следующее:

- 1) разработать математическую модель расчетного участка с учетом графика движения и изменения токов ЭПС (определяются в результате тяговых расчетов);
- 2) определить значения генерируемой реактивной мощности КУ для различных вариантов размещения устройства с использованием оптимизационного метода и принятых критериев;
- 3) выбрать оптимальное место размещения и мощность КУ из рассмотренных вариантов. При моделировании системы тягового электроснабжения использован метод узловых напряжений в комплексной форме, расчет выполнен с использованием выражения

$$\dot{I} = \underline{Y} \cdot \left( S^t \left( \left( S \underline{Y} S^t \right)^{-1} S \left( \dot{J} - \underline{Y} \dot{E} \right) \right) + \dot{E} \right) - \dot{J}, \tag{1}$$

где E – вектор-столбец комплексных ЭДС ветвей (для тяговых подстанций), B;

J – вектор-столбец комплексных узловых токов, A;

У – диагональная матрица комплексных проводимостей ветвей, См;

I – вектор-столбец комплексных токов ветвей схемы замещения, A;

S – матрица связи.

Моделирование движения поездов на участке осуществляется с использованием мгновенных схем, для каждой мгновенной схемы были заданы токи нескольких ЭПС на участке и рассчитано токораспределение, что позволило в дальнейшем определить потери мощности и электроэнергии.

В качестве примера рассмотрим участок длиной 48 км, который электрифицирован по системе переменного тока с напряжением 25 кВ (50  $\Gamma$ ц), тип контактной подвески – ПБСМ-95+М $\Phi$ -100, тип рельса – P65.

Схема замещения расчетного участка представлена на рисунке, где использованы следующие обозначения: ТП – тяговая подстанция, ПС – пост секционирования; ППС – пункт параллельного соединения, ветви 69-81 являются местами возможного размещения КУ.

При моделировании системы тягового электроснабжения приняты следующие допущения: элементы системы электроснабжения линейны; рассматривается только основная частота; схема питания контактной сети двухсторонняя с ПС и ППС; для использования мгновенных схем тяговая сеть разделена на участки длиной 6 км; напряжение холостого хода тяговых подстанций принято равным 27,5 кВ; поезда на участке перемещаются равномерно.

Электрические параметры элементов системы тягового электроснабжения представлены в таблице 1 [8].

Таблица 1 – Электрические параметры элементов системы тягового электроснабжения

Марка провода, тип рельса	ПБСМ-95	МФ-100	P-65	
Активное сопротивление 1 км провода (рельса) при 20 °C, Ом/км	0,575	0,177	0,24 (для однофазного тока	
т км провода (рельса) при 20 С, Ом/км			промышленной частоты)	

Реактивные составляющие сопротивлений элементов системы тягового электроснабжения приняты в соответствии с рекомендациями работы [8]. Сопротивление одного километра контактной подвески принято равным  $(0,135+j\,0,016)\,\mathrm{Om}$ ; рельсовой цепи одного пути –  $(0,12+j\,0,09)\,\mathrm{Om}$ ; постов секционирования, пунктов параллельного соединения –  $0,002\,\mathrm{Om}$ ;

тяговых трансформаторов ТДТНЖ-40000/110, приведенных к напряжению 27,5 кВ,  $-(0.29 + j\ 10.3)$  Ом.

Проводимости ветвей схемы замещения приняты с учетом того, что длина каждого участка составляет 6 км (см. рисунок):  $Y\pi\Pi 1 = Y\pi\Pi 2 = (0,0027 - j\ 0,097)$  См (тяговые трансформаторы);  $Y\kappa C7-22 = (1,22-j\ 0,14)$  См (контактная сеть);  $Yp23 - 38 = (0,89-j\ 0,67)$  См (рельсы).

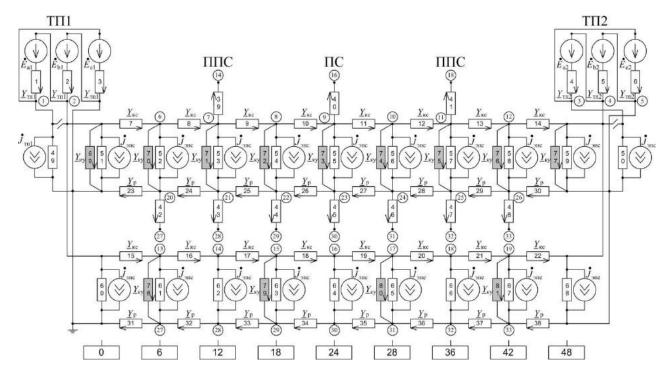


Схема замещения расчетного участка

Имитация движения поездов на расчетном участке выполнялась с использованием мгновенных схем [8]. В качестве примера рассмотрим шесть мгновенных схем (таблица 2). Ветви 51-59 на рисунке и в таблице 2 соответствуют ЭПС нечетных поездов, которые движутся от ТП 2 к ТП1, а ветви 60 – 68 – ЭПС четных поездов (в межподстанционной зоне находятся девять поездов). Для каждой мгновенной схемы в таблице 2 приведены значения потребляемых токов ЭПС и их коэффициенты мощности. Например, для первой мгновенной схемы ЭПС одного поезда соответствует ветви 57 схемы замещения (см. рисунок), для второй мгновенной схемы этот ЭПС соответствует ветви 56 и т. д.

TD 6 0 TD	1 1			
1 and $1$ $1$ $1$ $1$ $1$ $1$ $1$ $1$ $1$ $1$	и коэффициент мощн	IOCTH ABEKTHOROSOR I	ппа разпичных м	CHUBERHITA CAEM
I domina 2 I ok i	т коэффицисит мощі	docum oneki pobosob A	дли разли шыл м	HODGIIIDIA CACM

Harran nampy	Номер мгновенной схемы												
Номер ветви		1		2		3		4		5		6	
на рисунке	I, A	cos φ	I, A	cos φ	I, A	cos φ	I, A	cos φ	I, A	cos φ	I, A	cos φ	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	
49	343	0,80	289	0,80	298	0,85	342	0,82	324	0,70	295	0,85	
50	265	0,75	247	0,60	315	0,77	364	0,75	364	0,79	214	0,90	
51	140	0,52			162	0,77			172	0,66			
52			130	0,80			145	0,77			150	0,75	
53	109	0,42			78	0,42			72	0,36			
54			214	0,65			220	0,78			205	0,70	
55	210	0,70			198	0,75			205	0,80			
56			186	0,80			192	0,81			202	0,79	
57	172	0,80			166	0,82			190	0,76			
58			156	0,78			144	0,84			150	0,81	
59	109	0,43			97	0,75			100	0,80			

Окончание таблицы 2

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
60			162	0,75			171	0,77			195	0,83
61	172	0,80			189	0,77			195	0,78		
62			86	0,80			92	0,68			100	0,69
63	222	0,67			210	0,84			215	0,77		
64			145	0,71			151	0,77			142	0,79
65	109	0,35			93	0,47			60	0,55		
66			110	0,67			100	0,82			97	0,75
67	196	0,75			200	0,69			186	0,74		
68			178	0,80			188	0,79			169	0,72

В таблице 2 ветви 53 и 65 схемы замещения (см. рисунок), моделирующие ЭПС, соответствуют режиму рекуперативного торможения.

В примере рассмотрен критерий минимума потерь активной мощности в тяговой сети:

$$\Delta P = \sum_{i=1}^{38} R_i I_i^2 \to \min,\tag{2}$$

где  $I_i$  – действующее значение переменного тока в i-м элементе схемы замещения, A;

 $R_i$  – активное сопротивление i-го элемента схемы замещения, Ом.

Получение математической зависимости, показывающей взаимосвязь мощности КУ и потерь мощности во всех элементах тяговой сети является сложной задачей, поэтому для решения оптимизационной задачи с критерием (2) может быть использован любой численный метод прямого поиска [10]. Оптимизация выполнена методом Хука — Дживса.

В качестве независимой переменной поочередно рассматриваются мнимые составляющие комплексных проводимостей ветвей 69-81 схемы замещения (см. рисунок), которые соответствуют КУ. Для каждой из этих ветвей определяется оптимальное значение проводимости в соответствии с критерием (2), по известному напряжению в месте подключения этой ветви определяется необходимое значение реактивной мощности  $Q_{\text{опт}}$ .

В результате моделирования для каждой ветви КУ получены оптимальные значения реактивной мощности для заданных исходных данных (таблица 3). В таблице 3 представлены значения мощности двух тяговых подстанций  $P_{\text{тп}}$  и потери активной мощности в тяговой сети для различных вариантов размещения КУ.

Таблица 3 – Результаты моделирования для различных мгновенных схем

Номер мгнов	енной схемы	1	2	3	4	5	6	
ветвь КУ	$P_{TII}$ , $MBT$	17,4	24,1	20,4	25,9	21,1	25,1	Снижение потерь, %
на рисунке	Q <sub>опт</sub> , Мвар		Поте	ери в тяг	овой сет	и, %		
_	=	4,77	3,55	3,67	3,45	3,69	3,50	0,00
70	3,16	4,47	3,40	3,47	3,30	3,46	3,33	0,20
71	5,82	1,04	0,47	0,67	0,42	0,70	0,48	0,63
72	6,28	3,44	2,75	2,82	2,81	2,86	2,77	0,86
73	7,32	3,01	2,65	2,51	2,74	2,61	2,70	1,07
74	6,05	3,54	2,80	2,84	2,88	2,96	2,84	0,79
75	5,65	3,82	3,03	3,00	3,11	3,11	3,08	0,58
76	3,04	4,51	3,36	3,48	3,34	3,56	3,37	0,17
78	3,21	4,40	3,43	3,40	3,34	3,39	3,37	0,21
79	6,28	3,25	2,90	2,70	2,92	2,72	2,90	0,87
80	5,99	3,42	2,90	2,76	2,97	2,91	2,95	0,79
81	3,16	4,43	3,40	3,40	3,38	3,49	3,40	0,19

Оптимальное место размещения КУ находим из расчетной таблицы 3 – ветвь КУ с максимальным значением снижения потерь в тяговой сети. Для рассмотренного примера определены оптимальный вариант размещения нерегулируемого КУ – пост секционирования (ветвь 73 на рисунке) – и оптимальное значение реактивной мощности этого КУ – 7,32 Мвар.

Это позволит снизить потери электроэнергии в системе тягового электроснабжения на 1,07 %.

Основным отличием предлагаемого подхода от ранее известных является использование в составе модели схемы замещения, которая учитывает основные элементы системы тягового электроснабжения, токи ЭПС (в режиме тяги и рекуперации) и КУ, а также графики движения поездов на участке. Это позволяет рассчитывать токораспределение с учетом КУ, определять оптимальную мощность устройства для различных критериев и изменения токов нагрузок во времени.

В настоящее время разработаны компенсирующие устройства для тяговых сетей железных дорог с плавным регулированием реактивной мощности, созданные на базе силовых полупроводниковых преобразователей [5, 6]. Эти устройства дороже нерегулируемых устройств, работа силовых ключей приводит к генерации высших гармоник устройством, поэтому в ряде случаев технически и экономически целесообразно использовать нерегулируемые КУ.

На основании изложенного можно сделать следующие выводы.

- 1) Использование предложенного подхода для определения оптимального места размещения и мощности нерегулируемого компенсирующего устройства в системе тягового электроснабжения переменного тока двухпутного участка с учетом параметров элементов системы тягового электроснабжения, схемы питания тяговой сети, графиков движения поездов позволит повысить эффективность компенсации реактивной мощности.
- 2) При размещении одного стационарного нерегулируемого КУ на межподстанционной зоне расход электроэнергии на тягу может быть снижен на 1-2 % (в рассмотренном примере оптимальным местом размещения КУ является пост секционирования, оптимальная мощность КУ составляет 7,32 Мвар, снижение расхода электроэнергии на тягу -1,07 % от отпущенной электроэнергии с шин тяговых подстанций 27,5 кВ).
- 3) Реализация системы автоматизированного проектирования для ЭВМ с использованием предложенного подхода позволит повысить точность расчетов за счет уменьшения интервалов дискретизации межподстационной зоны, учета неравномерного движения поездов и изменения размеров движения в течение суток.

## Список литературы

- 1. Энергосбережение на железнодорожном транспорте: Справочно-методическое издание [Текст] / В. А. Гапанович, В. Д. Авилов и др. М.: Интехэнерго-Издат, 2014. 304 с.
- 2. Гапанович, В. А. Энергетическая стратегия и электрификация российских железных дорог [Текст] / В. А. Гапанович, С. Н. Епифанцев, В. А. Овсейчук. М.: Эко-Пресс, 2012. 196 с.
- 3. Герман, Л. А. Управляемые устройства емкостной компенсации в системах тягового электроснабжения железных дорог: Учебное пособие [Текст] / Л. А. Герман, А. С. Серебряков. М.: Транспортная книга, 2013.-120 с.
- 4. Кулинич, Ю.М. Адаптивная система автоматического управления гибридного компенсатора реактивной мощности электровоза с плавным регулированием напряжения: Монография [Текст] / Ю. М. Кулинич / Дальневосточный гос. ун-т путей сообщения. Хабаровск, 2001. 153 с.
- 5. Natesan P. Compensation of Power Quality Problems in Traction Power System Using Direct Power Compensator [Text] / P. Natesan, G. Madhusudanan / IEEE International Conference on Innovations in Engineering and Technology, 2014, vol. 3, no. 7, pp. 277 280.
- 6. Bueno A. Harmonic and unbalance compensation based on direct power control for electric railway systems [Text] / A. Bueno, J. Aller and others / IEEE Transactions on power electronics, 2013, vol. 28, no. 12, pp. 5823 5831.
- 7. Марквардт, К. Г. Электроснабжение электрифицированных железных дорог [Текст] / К. Г. Марквардт. М.: Транспорт, 1982. 528 с.

- 8. Кондратьев, Ю. В. Выбор мощности и места размещения устройств поперечной компенсации реактивной мощности [Текст] / Ю. В. Кондратьев, А. В. Тарасенко // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. Омск, 2015. № 2 (22). С. 79 87.
- 9. СТО РЖД 07.022.2-2015. Система тягового электроснабжения железной дороги переменного тока. Методика выбора мест размещения и мощности средств продольной и поперечной компенсации реактивной мощности.
- 10. Банди, Б. Методы оптимизации. Вводный курс [Текст] / Б. Банди. М.: Радио и связь, 1988.-128 с.

## Referenses

- 1. Gapanovich V. A. *Jenergosberezhenie na zheleznodorozhnom transporte* (Energy savings in rail transport). Moscow: Intehjenergo-Izdat, 2014, 304 p.
- 2. Gapanovich V. A., Epifancev S. N., Ovsejchuk V. A. *Jenergeticheskaja strategija i jelektrifikacija rossijskih zheleznyh dorog* (Energy Strategy and the electrification of Russian railroads). Moscow: Jeko-Press, 2012, 196 p.
- 3. German L. A., Serebrjakov A. S. *Upravljaemye ustrojstva emkostnoj kompensacii v sistemah tjagovogo jelektrosnabzhenija zheleznyh dorog* (Managed devices capacitive compensation systems, traction power supply of railways). Moscow: Transportnaja kniga, 2013, 120 p.
- 4. Kulinich Ju. M. Adaptivnaja sistema avtomaticheskogo upravlenija gibridnogo kompensatora reaktivnoj moshhnosti jelektrovoza s plavnym regulirovaniem naprjazhenija (Adaptive cruise control hybrid reactive power compensator with electric continuously variable voltage). Khabarovsk: DVGUPS, 2001, 53 p.
- 5. Natesan P., Madhusudanan G. Compensation of Power Quality Problems in Traction Power System Using Direct Power Compensator. IEEE International Conference on Innovations in Engineering and Technology, 2014, vol. 3, ,no. 7, pp. 277 280.
- 6. Bueno A., Aller J., Restrepo J., Harley R., Habetler T. Harmonic and Unbalance Compensation Based on Direct Power Control for Electric Railway Systems. IEEE Transactions on power electronics, 2013, vol. 28, ,no. 12, pp. 5823 5831.
- 7. Markvardt K. G. *Jelektrosnabzhenie jelektrificirovannyh zheleznyh dorog* (Power supply of electrified railways). Moscow: Transport, 1982, 528 p.
- 8. Kondratyev Y. V., Tarasenko A. V. The power selection and placement of devices cross-reactive power compensation [Vybor moshhnosti i mesta razmeshhenija ustrojstv poperechnoj kompensacii reaktivnoj moshhnosti]. *Izvestia Transsiba The Journal of Transsib Railway Studies*, 2015, no. 2 (22), pp. 79 87.
- 9. STO RZD 07.022.2-2015. The system of traction current Railway AC. Technique selection and placement of power means the longitudinal and transverse reactive power compensation [Sistema tjagovogo jelektrosnabzhenija zheleznoj dorogi peremennogo toka. Metodika vybora mest razmeshhenija i moshhnosti sredstv prodol'noj i poperechnoj kompensacii reaktivnoj moshhnosti].
  - 10. Bunday B. D. Basic optimization methods. London: Edward Arnold, 1984, 128 p.

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

#### Москалев Юрий Владимирович

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.

Тел.: +7 (3812) 31-18-27. E-mail: yuriyvm@mail.ru

## Ахмедзянов Гаяз Гумарович

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

## Moskalev Yuriy Vladimirovich

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Ph. D., Associate Professor of the department «Electric machines and electrical engineering» Omsk State Transport University.

Phone: +7 (3812) 31-18-27. E-mail: yuriyvm@mail.ru

#### Ahmedzyanov Gayaz Gumarovich

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Ph. D., Associate Professor of the department «Automatics and remote control» Omsk State Transport Uni-

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

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Автоматика и телемеханика», ОмГУПС.

Тел.: +7 (3812) 31-18-72. E-mail: 1zzzz1omsk@gmail.com versity (OSTU).

Phone: +7 (3812) 31-18-72. E-mail: 1zzzz1omsk@gmail.com

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Москалев, Ю. В. Определение места размещения и мощности компенсирующего устройства в системе тягового электроснабжения переменного тока двухпутного участка по минимуму потерь активной мощности [Текст] / Ю. В. Москалев, Г. Г. Ахмедзянов // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. — Омск. — 2016. — N (26). — (26).

#### **BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION**

Moskalev Y. V., Ahmedzyanov G. G. The definition of the location and capacity of the compensating device in the ac electrical power system of railways by minimum of active power losses. Journal of Transsib Railway Studies, 2016, vol. 26, no. 2, pp. 100 – 107. (In Russian).

УДК 621.336.322

#### О. А. Сидоров, И. Л. Саля

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

# ВЫБОР МЕТОДА ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ТОКОПРИЕМНИКА ЭЛЕКТРОПОДВИЖНОГО СОСТАВА

Аннотация. Реальный процесс взаимодействия токоприемника с контактной подвеской связан со случайными процессами. Основными факторами, воздействующими на токоприемник, являются колебания подвижного состава на уровне установки токоприемника, аэродинамическое воздействие, нестабильность динамических свойств токоприемника и контактной подвески и т. д. Ввиду множества влияющих на токосъем факторов теоретически исследовать динамическую систему «токоприемник – контактная подвеска» в полном объеме сложно. Более рациональным для теоретических исследований и достаточным для практического использования является рассмотрение детерминированных процессов.

При численном моделировании токоприемников наиболее распространены следующие типы расчетных схем (моделей):

- схема с малым числом степеней свободы и приведенными массами;
- схема, состоящая из элементов, описываемых массами и геометрическими размерами реального токоприемника;
- модели токоприемника, созданные в специализированных CAD-системах, которые детально описывают геометрические размеры и физические свойства каждого элемента токоприемника.

При проектировании устройств токосъема необходимым является расчет взаимодействия токоприемника с контактной подвеской. Контактная подвеска в расчетах учитывается в виде сосредоточенной массы, взаимодействующей с полозом токоприемника, или в виде пространственной системы, составленной из упругих элементов конечной длины (контактная подвеска с распределенными параметрами). Второй тип модели контактной подвески активно используется в расчете взаимодействия с первыми двумя типами рассмотренных моделей токоприемников. Однако данный тип модели контактной подвески не может быть использован в САД-системе, так как такие системы в настоящее время не позволяют выполнять динамические расчеты с учетом деформаций и волновых процессов в контактной подвеске.

С учетом особенностей каждого из представленных видов моделей токоприемника предложена методика выбора модели токоприемника в зависимости от цели моделирования.

**Ключевые слова:** токоприемник, модель, CAD-система, динамика, нагрузки.

#### Oleg A. Sidorov, Ilya L. Salya

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

# THE CHOICE OF THE METHOD OF NUMERICAL SIMULATION OF THE PANTOGRAPH ELECTRIC ROLLING STOCK

**Abstract.** The actual process of interaction of pantograph with catenary associated with random processes. The main factors affecting the pantograph are vibrations of the rolling stock, aerodynamic, the instability of the dynamic

№ 2(26) 2016

properties of the pantograph and overhead catenary, etc. In view of the plurality of influencing the current collection of factors theoretically investigate the dynamical system "Pantograph – catenary" in full It is a complex task. A more rational to theoretical studies and sufficient for practical use is to consider deterministic processes.

In the numerical simulation of the current collectors are the most common types of the following design schemes (models):

- lumped mass pantograph model;
- pantograph multibody schematics;
- pantograph multibody schematics in CAD-systems, which describe in detail the geometric dimensions and physical properties of each element of the pantograph.

In the design of the pantographs is an integral part of the calculation of interaction of pantograph with contact suspension. Contact suspension counted in the calculations in the form of a concentrated mass interacting with the pantograph skid or a spatial system composed of resilient elements of finite length (catenary with distributed parameters). The second type of catenary model is used in the interaction with the first two types of models considered by the current collectors.

Based on the features of each of the presented kinds of models, present the technique of the pantograph model selection, depending on the purpose of the simulation.

Keywords: pantograph, model, CAD-systems, dynamics stress.

Реальный процесс взаимодействия токоприемника с контактной подвеской связан со случайными процессами. Основными факторами, воздействующими на токоприемник, являются колебания подвижного состава на уровне установки токоприемника, аэродинамическое воздействие, нестабильность динамических свойств токоприемника и контактной подвески и т. д. Ввиду множества влияющих на токосъем факторов теоретически исследовать динамическую систему «токоприемник – контактная подвеска» в полном объеме сложно. Более рациональным для теоретических исследований и достаточным для практического использования является рассмотрение детерминированных процессов [1, 2].

При численном моделировании токоприемников наиболее распространены следующие типы расчетных схем (моделей):

- схема с малым числом степеней свободы и приведенными массами (рисунок 1) [3, 4];
- схема, состоящая из элементов, описываемых массами и геометрическими размерами реального токоприемника (рисунок 2) [5];
- модели токоприемника, созданные в специализированных *CAD*-системах, которые детально описывают геометрические размеры и физические свойства каждого элемента токоприемника (рисунок 3) [6].

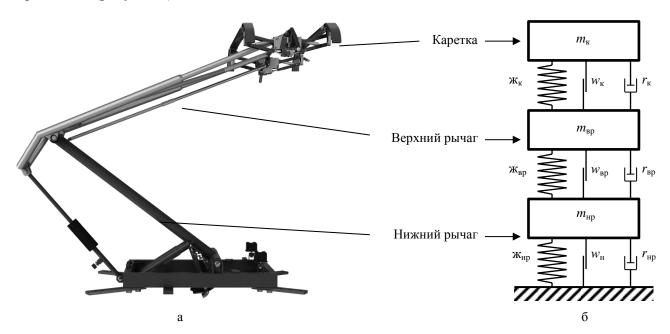


Рисунок 1 – Токоприемник (a) и его расчетная схема с малым числом степеней свободы и приведенными массами (б)

В расчетных схемах с малым числом степеней свободы основные параметры моделируемой системы приводятся к точке контакта полоза токоприемника с контактной подвеской и верхним шарнирам системы подвижных рам. Данный способ численного моделирования имеет малое число рассматриваемых степеней свободы, что приводит к упрощению реальной задачи и уменьшению точности получаемых результатов при моделировании статики и динамики процесса токосъема. Несмотря на небольшую точность моделирования токоприемника данные модели активно используются для проектирования участков контактной сети в европейских странах. При моделировании используются программные средства, разработанные крупными компаниями (Siemens, Deutsche Bahn, SNCF), занимающимися проектированием, производством и обслуживанием железнодорожной техники, устройств и сооружений. Данные программные средства являются закрытыми и используются только внутри компаний-разработчиков. К таким программным средствам относятся Sicat-Dynamics, PrOSA, OSCAR. При моделировании взаимодействия токоприемника и контактной подвески в программной среде OSCAR реальный токоприемник преобразуется в модель с сосредоточенными массами при помощи оптимизации неградиентным случайным поиском путем подбора вычисленных амплитудно-частотных характеристик трех масс токоприемника (каретка, верхний и нижний рычаги).

Второй вариант формирования модели токоприемника более точно описывает реальные геометрические, кинематические, упругие и инерционные параметры токоприемника.

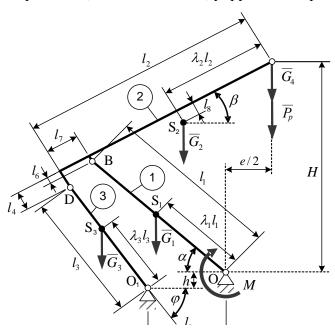


Рисунок 2 — Расчетная стержневая схема, учитывающая геометрические размеры элементов токоприемника

Данная модель позволяет более точно описать работу токоприемника, подобрать размеры и параметры отдельных его элементов с точки зрения оптимизации динамики и статики процесса токосъема [7]. При использовании такого типа моделей появляется возможность моделировать токоприемник в трех измерениях, создавая условия для учета распределения усилий в каретках, при нагрузках, неравномерно действующих на полоз.

Данный тип моделей, как и тип моделей с приведенными параметрами, реализуется в любой современной программной среде (C++, Object Pascal, Visual Basic и др.), а также в специализированных математических программах (MathCAD, MathLab и др.). Исполь-

зование специализированных математических программ облегчает процесс визуализации расчетной схемы, исходных данных и полученных результатов. Использование программы, написанной на языке программирования в программной среде, позволяет использовать в модели несвойственные для математической программы элементы, которые позволяют более точно описывать различные элементы токоприемника, в том числе работу системы автоматического регулирования токоприемника и предохранительных устройств.

Третий вариант численного моделирования подразумевает использование специализированных программных средств (CAD-систем), позволяющих выполнить поэлементное проектирование основных элементов и систем токоприемника. В данном случае учитывается вся геометрия токоприемника, а также особенности используемых материалов, форм и креплений. При использовании этого типа моделирования появляется возможность выполнять не

только динамические расчеты процесса токосъема, но и аэродинамические, температурные, прочностные. В совокупности такое параметрическое моделирование позволяет выполнить рациональное проектирование элементов токоприемника.

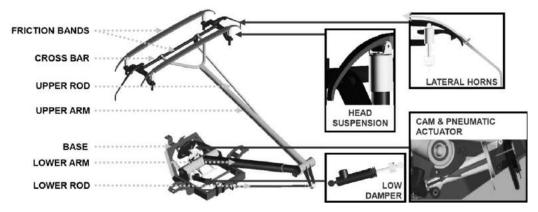


Рисунок 3 – Схема токоприемника в *CAD*-системе, встроенной в программное обеспечение *OSCAR* (Франция)

Данный вид моделирования тесно связан с проектированием и оптимизацией всех элементов токоприемника, поэтому он активно используется всеми современными железнодорожными компаниями при проектировании не только устройств токосъема, но и всех элементов и устройств железнодорожного хозяйства. При проектировании активно используются следующие *CAD*-системы: *ANSYS*, *MSC Nastran*, *T-FLEX*, *SolidWorks*, *CATIA*.

При проектировании устройств токосъема необходимым является расчет взаимодействия токоприемника с контактной подвеской. Контактная подвеска в расчетах учитывается в виде сосредоточенной массы, взаимодействующей с полозом токоприемника, или в виде пространственной системы, составленной из упругих элементов конечной длины (контактная подвеска с распределенными параметрами). Второй тип модели контактной подвески активно используется в расчете взаимодействия с первыми двумя типами рассмотренных моделей токоприемников. Однако данный тип модели контактной подвески не может быть использован в CAD-системе, так как такие системы в настоящее время не позволяют выполнять динамические расчеты с учетом деформаций и волновых процессов в контактной подвеске. Использование конечно-элементной модели контактной подвески в CAD-системе объясняется значительной погрешностью расчета взаимодействия токоприемника и контактной сети и очень высокими требованиями к вычислительной системе.

Кроме этого в *CAD*-системе затруднительно выполнить моделирование работы предохранительных устройств и систем автоматического регулирования токоприемника при расчете взаимодействия токоприемника и контактной сети.

На основании рассмотренных моделей разработаны рекомендации по выбору модели то-коприемника, данные представлены в таблице.

Рекомендации по выбору модели токоприемника

	Рекомендуемая			
Цель моделирования	_			
	модель токоприемника			
Выбор оптимальной схемы контактной сети для заданно-	Схема с малым числом степеней			
го участка пути без детального учета динамики токопри-	свободы и приведенными массами			
емника				
Выбор рациональных размеров элементов токоприемни-	Стержневая схема, учитывающая			
ка, материалов, предохранительных устройств, системы	геометрические размеры элементов			
автоматического регулирования и др. С учетом статиче-	токоприемника			
ских, динамических и аэродинамических нагрузок, дейст-				
вующих на токоприемник				
Выбор рациональных размеров элементов токоприемни-	Модель в специализированной			
ка, материалов, аэродинамических профилей, токопрово-	САД-системе			
дящей смазки в контакте и др. С учетом статических или				
периодически меняющихся во времени нагрузок, действу-				
ющих на токоприемник				

#### Список литературы

- 1. Численное моделирование динамики токоприемника при взаимодействии с контактной подвеской [Текст] / Е. В. Авотин, Н. В. Миронос и др. // Вестник ВНИИЖТа / ОАО «Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта». М., 2008. № 3. С. 42-45.
- 2. Сидоров, О. А. Применение рациональных методик оценки качества токосъема магистральных электрических дорог [Текст] / О. А. Сидоров, А. Н. Смердин, В. А. Жданов // Транспорт Урала / Уральский гос. ун-т путей сообщения. Екатеринбург. 2011. № 3. С. 33 43.
- 3. Schär R. Active Control of the Pantograph-Catenary Interaction in a Finite Element Model // Master Thesis / Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, 2013.
- 4. Farhangdoust S. Modeling of the Pantograph-Catenary dynamic stability / S. Farhangdoust, M. Farahbakhsh, M. Shahravi // Technical Journal of Engineering and Applied Sciences (3-14), Tehran, 2013.
- 5. Shimanovsky A. Modeling of the Pantograph-Catenary Wire Contact Interaction / A. Shimanovsky, V. Yakubovich, I. Kapliuk // Procedia Engineering (134), Gomel, 2016.
- 6. Laurent C. Pantograph catenary dynamic optimization based on advanced multibody and finite element co-simulation tools / C. Laurent, J.-P. Massat, T.M.L. Nguyen-Tajan, J.-P. Bianchi, E. Balmes // Vehicle System Dynamics: International Journal of Vehicle Mechanics and Mobility, 2014, no. 52.
- 7. Михеев, В. П. Исследование и прогнозирование износа контактных пар устройств токосъема [Текст] / В. П. Михеев, О. А. Сидоров, И. Л. Саля // Известия высших учебных заведений. Электромеханика / Южно-Российский гос. политехн. ун-т (НПИ) им. М. И. Платова. Новочеркасск, 2003. N 2. C. 74 79.

#### References

- 1. Avotin E. V., Mironos N. V., Tituh I. N., Tyurnin P. G. Numerical modeling of the dynamics of the pantograph in contact with the catenary [Chislennoe modelirovanie dinamiki tokopriemnika pri vzaimodejstvii s kontaktnoj podveskoj]. *Vestnik nauchno-issledovatel'skogo instituta zheleznodorozhnogo transporta Railway Research Institute Bulletin*, 2008, no. 3, pp. 42 45.
- 2. Sidorov O. A., Smerdin A. N., Zhdanov V. A. The use of rational methods for assessing the quality of current collection main electric road [Primenenie racional'nyh metodik ocenki kachestva tokos'ema magistral'nyh jelektricheskih dorog]. *Transport Urala Ural Transport*, 2011, no. 3, pp. 33 43.
- 3. Schär R. Active Control of the Pantograph-Catenary Interaction in a Finite Element Model. Master Thesis. Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, 2013.
- 4. Farahbakhsh M., Shahravi M. Modeling of the Pantograph-Catenary dynamic stability. Technical Journal of Engineering and Applied Sciences (3-14), Tehran, 2013.
- 5. Shimanovsky A., Yakubovich V., Kapliuk I. Modeling of the Pantograph-Catenary Wire Contact Interaction. Procedia Engineering, Gomel, 2016, no. 134.
- 6. Laurent C., Massat J.-P., Nguyen-Tajan T.M.L., Bianchi J.-P., Balmes E. Pantograph catenary dynamic optimization based on advanced multibody and finite element co-simulation tools. Vehicle System Dynamics: International Journal of Vehicle Mechanics and Mobility, 2014, no. 52.
- 7. Miheev V. P., Sidorov O. A., Salya I. L. Research and prediction of wear of contact pairs of the current collection devices [Issledovanie i prognozirovanie iznosa kontaktnyh par ustrojstv to-kos'ema]. *Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij. Jelektromehanika Bulletin of the higher educational institutions. Electromechanics*, 2003, no. 5, pp. 74 79.

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

#### Сидоров Олег Алексеевич

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

Sidorov Oleg Alekseevich Omsk State Transport University (OSTU). 35, Marx st., Omsk, 644046, the Russion Federation.

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

Доктор технических наук, заведующий кафедрой «Электроснабжение железнодорожного транспорта» ОмГУПСа, заслуженный изобретатель РФ, академик Академии электротехнических наук РФ, академик Петровской академии наук и искусств, почетный железнодорожник, ОмГУПС.

Тел.: +7 (3812) 31-34-46. E-mail: egt@omgups.ru

#### Саля Илья Леонидович

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Информатика, прикладная математика и механика»,  $\text{Ом}\Gamma \text{У}\Pi\text{C}.$ 

Тел.: +7 (3812) 31-18-66. E-mail: salyail@mail.ru

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Сидоров, О. А. Выбор метода численного моделирования токоприемника электроподвижного состава [Текст] / О. А. Сидоров, И. Л. Саля // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. — Омск. — 2016.

Doctor of Technical Sciences, Professor, head of the department «Power supply of railway transport» Omsk State Transport University, Honored Inventor of the Russian Federation, academician of the Academy of Electrical Sciences of Russia, Academician Peter's Academy of Arts and Sciences, Honorary Railwayman.

Phone: +7 (3812) 31-34-46. E-mail: egt@omgups.ru

#### Salya Ilya Leonidovich

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Ph. D., Associate Professor of the department «Computer science, applied mathematics and mechanics» Omsk State Transport University (OSTU).

Phone: +7 (3812) 31-18-66. E-mail: salyail@mail.ru

#### **BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION**

Sidorov O. A., Salya I. L. The choice of the method of numerical simulation of the pantograph electric rolling stock. Journal of Transsib Railway Studies, 2016, vol. 26, no. 2, pp. 107 – 112. (In Russian).

УДК 656.222:629.4

#### Е. А. Сидорова, С. О. Подгорная

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

#### ВЛИЯНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА УЧАСТКОВОЙ СКОРОСТИ НА УДЕЛЬНЫЙ РАСХОД ЭНЕРГИИ В ГРУЗОВОМ ДВИЖЕНИИ

Аннотация. Важнейшей задачей энергетической стратегии Российской Федерации является эффективное использование топливно-энергетических ресурсов. Железнодорожный транспорт — один из крупнейших потребителей дизельного топлива и электроэнергии, основная доля энергозатрат которого приходится на тягу поездов. Расход энергии на тягу зависит от множества эксплуатационных факторов, в том числе от скоростных характеристик движения поездов. Статья посвящена определению способа оценки влияния изменения коэффициента участковой скорости движения грузовых поездов на изменение удельного расхода энергии локомотивами. Сделан вывод о том, что расчет коэффициентов влияния показателей использования локомотивов, в том числе коэффициента участковой скорости, необходимо выполнять для каждого структурного подразделения и анализируемого календарного периода. Предложенная для этого авторами статьи формула включена в состав Методики анализа и прогнозирования расхода ТЭР на тягу поездов, внедренной на сети железных дорог России в 2015 г.

**Ключевые слова:** удельный расход энергоресурсов, тяга поездов, коэффициент участковой скорости, уравнение тягово-энергетического баланса, коэффициент влияния.

#### Elena A. Sidorova, Svetlana O. Podgornaya

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

## PRECINCT SPEED FACTOR INFLUENCE ON SPECIFIC ENERGY CONSUMPTION IN FREIGHT TRAFFIC

**Abstract.** The most important task of the Russian Federation's energy strategy is the efficient use of energy resources. Rail transport is a one of the major consumers of diesel fuel and electricity, where the major energy consump-

№ 2(26) 2016

tion is used for traction. Traction energy consumption depends on a number of operational factors, including the characteristics of high-speed trains. The article is devoted to the designation of ways to assess the impact of changes in the coefficient of the precinct speed of freight trains on the change in specific energy consumption of locomotives. It is concluded that the calculation influence coefficient use indicators of locomotives, including the coefficient of the precinct speed must be performed for each of the structural units and analyzed the calendar period. Proposed by the authors for this formula is included in the methods of analysis and forecasting of energy resources consumption for traction trains introduced on the Russian train system in 2015.

**Keywords:** the specific consumption of energy, traction of trains, precinct speed factor, the equation of traction and energy balance, the influence factor.

Эффективное использование топливно-энергетических ресурсов (ТЭР) — важнейшая задача энергетической стратегии Российской Федерации. Одним из крупнейших потребителей ТЭР в стране является железнодорожный транспорт, на осуществление работы которого расходуется более 4 % электроэнергии и около 10 % дизельного топлива, используемых в России. От всех затрачиваемых железной дорогой энергоресурсов более 76 % приходится на выполнение перевозочного процесса [1]. Для обеспечения рационального энергопотребления на тягу поездов большое значение имеют разработка и реализация энергосберегающих мероприятий, в основе которых лежит всесторонний анализ энергоемкости перевозочного процесса.

На тяговое энергопотребление оказывают влияние множество эксплуатационных факторов, в том числе качественные показатели использования локомотивов. К ним относится и ряд показателей, определяющих норму удельного расхода энергии (УРЭ) на выполнение единицы перевозочной работы в грузовом движении, — средняя масса поезда Q, техническая скорость  $V_{\text{тех}}$ , нагрузка на ось грузового вагона  $q_{\text{гр}}$ , доля порожнего пробега грузовых вагонов  $\alpha_{\text{п}}$ , а также коэффициент участковой скорости  $k_{\text{уч}}$ , характеризующий соотношение участковой  $V_{\text{уч}}$  и технической скоростей движения поездов. На различных уровнях организационной иерархии железнодорожного транспорта производится анализ изменения удельного расхода ТЭР на тягу поездов за счет влияния изменения перечисленных выше показателей, которое оценивается с помощью специальных характеристик, называемых коэффициентами влияния. Они показывают, на сколько процентов изменится УРЭ при изменении i-го нормообразующего фактора на 1 % или принятую единицу его измерения [2].

В литературных источниках и нормативных документах ОАО «РЖД» [3 – 4 и др.], посвященных разработке и исследованию методологии анализа энергозатрат на тягу поездов, рекомендовано осуществлять определение коэффициентов влияния путем дифференцирования уравнения тягово-энергетического паспорта локомотива по соответствующему нормообразующему фактору. Это уравнение характеризует взаимосвязь удельного расхода энергии b и характеристик локомотива, состава вагонов и пути при движении поезда массой Q со средней технической скоростью  $V_{\text{тех}}$  по спрямленному участку пути, имеющему постоянный уклон i:

$$b = \frac{I_{\tau}}{Q \cdot \eta} \left( K_{x} \cdot K_{b_{x}} \frac{N_{\text{KH}}}{V_{\text{rex}}} + \frac{K_{\tau,c} - K_{x} \cdot K_{b_{x}}}{367,2} (P + Q) \cdot (w_{o} + i) \right), \tag{1}$$

где  $I_{\rm T}$  – индекс вида тяги: для электрической тяги — 10000, для дизельной тяги — 843;  $\eta$  – номинальный коэффициент полезного действия (КПД) локомотива;  $K_{\rm x}$  – коэффициент использования мощности вспомогательного оборудования локомотива на холостом ходу;  $K_{\rm T.c}$  – коэффициент технического состояния локомотива;  $K_{b_{\rm x}}$  – коэффициент, характеризующий относительный расход ТЭР на холостом ходу;  $N_{\rm KH}$  – номинальная касательная мощность локомотива, кВт; P – сцепной вес локомотива, т;  $w_o$  – основное удельное сопротивление движению поезда, кгс/т, которое определяется согласно рекомендациям работ [5, 6].

При практическом использовании данного уравнения в качестве показателей P,  $\eta$ ,  $N_{\rm KH}$ ,  $K_b$  принимаются соответствующие параметры осредненного локомотива, определяемые с

учетом относительного объема перевозочной работы, выполненной локомотивами каждой серии, в общем объеме грузовой работы в структурном подразделении [7]. Эти и другие эксплуатационные показатели, которые включает в себя уравнение (1), существенно различаются для разных структурных подразделений и календарных периодов. Для примера в таблице 1 приведены диапазоны изменения значений показателей использования локомотивов в грузовом движении на всех железных дорогах России на полигонах электрической и дизельной тяги в августе 2014 г. Данные таблицы 1 свидетельствуют о том, что разброс значений одного и того же показателя может достигать более 50 %. По этой причине коэффициенты влияния изменения показателей использования локомотивов, определяемые на основе уравнения (1), должны рассчитываться индивидуально для каждого структурного подразделения и периодически корректироваться с учетом изменений эксплуатационных факторов и технических характеристик локомотивов, вагонов и пути в отчетном периоде.

Таблица 1 — Диапазоны изменения показателей использования локомотивов в грузовом движении на железных дорогах России в августе 2014 г.

Показатель	Масса поезда, т	Нагрузка на ось вагона, т	Техническая скорость, км/ч	Доля порожнего пробега вагонов, %	Коэффициент участковой ско- рости, %				
	Электрическая тяга								
Минимальное значение	3382	14,1	36,0	31,1	56,4				
Максимальное значение	4378	15,8	55,7	43,9	90,6				
Расхождение, %	29,5	12,1	54,7	41,2	60,6				
		Дизелы	ная тяга						
Минимальное значение	2632	13,8	38,7	35,6	66,8				
Максимальное значение	4040	15,9	55,1	55,6	86,0				
Расхождение, %	53,5	15,2	42,4	56,2	28,7				

Математические выражения для расчета коэффициентов влияния изменения таких показателей использования локомотивов, как Q,  $V_{\text{тех}}$ ,  $q_{\text{гр}}$ ,  $\alpha_{\text{п}}$ , приведены в специализированных источниках [4], однако порядок определения коэффициента влияния изменения коэффициента участковой скорости  $\beta_{k_{yq}}$ , характеризующего относительное (в процентах) изменение УРЭ при изменении  $k_{yq}$  на 1 % (в абсолютном представлении), в этих источниках отсутствует:

в работах профессора В. С. Молярчука [4] такой фактор не рассматривается;

в Методике анализа результатов расхода топливно-энергетических ресурсов на тягу поездов ЦТД-26 представлены только числовые значения — для электрической тяги  $\beta_{k_{yu}} = -0.64$  %, для дизельной тяги  $\beta_{k_{yu}} = -0.60$  % — без указания того, каким образом они получены и в каких случаях применяются;

на практике на разных железных дорогах при анализе энергозатрат на тягу поездов помимо указанных выше значений  $\beta_{k_{yy}}$  иногда используют другие величины: для электровозов –  $\beta_{k_{yy}} = -0.276$ , для тепловозов –  $\beta_{k_{yy}} = -0.237$  %, но чем они обусловлены неизвестно.

Расчетная формула для оценки влияния на УРЭ коэффициента участковой скорости приведена лишь в разработанной специалистами ВНИИЖТа методологии технического нормирования расхода ТЭР локомотивами на тягу поездов [3]. При этом определяется абсолютное изменение УРЭ при изменении  $k_{yq}$  на единицу:

$$k_{k_{yq}} = -\frac{1}{V_{\text{Tex}} \cdot Q} \cdot \frac{10^4}{k_{yq}^2} \cdot P_m \left( \beta + (1 - \beta) \cdot \frac{P_{\text{M}}}{P_{\text{O}}} \right), \tag{2}$$

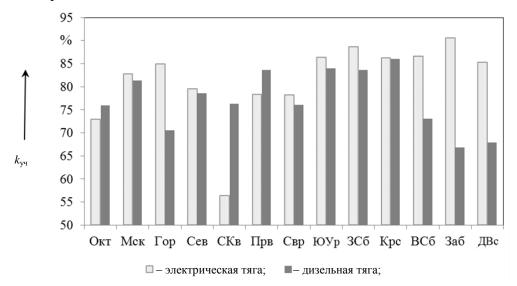
где  $P_m$  – показатель, в качестве которого для электрической тяги используется мощность вспомогательного оборудования локомотива  $N_{\rm Bcn}$ , кВт, для дизельной тяги – yдельный расход топлива на холостом ходу тепловозом основной серии  $b_{xxo}$ , кг/ч;  $\beta$  – коэффициент структуры

эксплуатируемого парка локомотивов;  $P_{\rm o}$ ,  $P_{\rm d}$  – сцепной вес локомотивов основной и дополнительной серий, т.

Перечень входящих в выражение (2) показателей отличается от списка параметров в уравнении (1). Это обусловлено тем, что указанная методология технического нормирования расхода ТЭР реализует анализ энергозатрат для конкретной поездки или участка работы локомотивных бригад. Рекомендаций по определению изменения УРЭ на уровне структурного подразделения она не содержит.

В источнике [3] приведены значения  $k_{k_{yu}}$ , полученные по формуле (2) для разных месяцев на участке работы электровозов Вязьма — Бекасово. Они колеблются в диапазоне от -11,51 до -13,78 кВт·ч/10 тыс. ткм брутто, что при переходе к относительным величинам составляет от -0,1 до -0,142 %. Эти значения существенно отличаются от приведенных выше значений коэффициента  $\beta_{k_{yu}}$ .

Согласно данным таблицы 1 значения коэффициента участковой скорости колеблются в широком диапазоне. Об этом же свидетельствует и гистограмма изменения данного показателя на железных дорогах России в августе 2014 г., представленная на рисунке. В связи с этим применение для разных структурных подразделений универсальных числовых значений коэффициента влияния  $\beta_{k_{yq}}$  нельзя признать корректным, что обосновывает необходимость определения способа его расчета.



Коэффициент участковой скорости на железных дорогах России в августе 2014 г.

Для решения этой задачи воспользуемся обобщенной формулой, рекомендованной в работе [4] для определения влияния показателей, изменение значений которых учитывается в абсолютном представлении (в физических единицах измерения). Применительно к коэффициенту влияния  $\beta_{k_{ss}}$  она будет иметь вид:

$$\beta_{k_{yu}} = \frac{100}{b} \cdot \frac{db}{dk_{yu}},\tag{3}$$

где  $\frac{db}{dk_{yq}}$  — частный дифференциал удельного расхода ТЭР по коэффициенту участковой скорости, определяемый на основе уравнения (1).

Непосредственное вычисление такого частного дифференциала невозможно, поскольку показатель  $k_{\rm yq}$  в явном виде в выражении (1) отсутствует. Для устранения этой проблемы воспользуемся взаимосвязью между технической и участковой скоростью движения:

$$V_{\text{Tex}} = \frac{V_{\text{yq}}}{k_{\text{yq}}} \,. \tag{4}$$

Согласно положениям теории тяги основное удельное сопротивление движению поезда определяется по выражению [5]:

$$w_o = \frac{\left(P \cdot w_o' + Q \cdot w_o''\right)}{\left(P + Q\right)},\tag{5}$$

где  $w'_o$ ,  $w''_o$  – сопротивление движению локомотива и вагонов соответственно, которое рассчитывается по формулам [6]:

$$w'_{o} = 1,9 + A_{\pi} \cdot V_{\text{rex}} + B_{\pi} \cdot V_{\text{rex}}^{2},$$
 (6)

$$w_o'' = A_{\rm rp} + B_{\rm rp} \cdot V_{\rm rex} + C_{\rm rp} \cdot V_{\rm rex}^2 \,, \tag{7}$$

где  $A_{\rm л}$ ,  $B_{\rm л}$ ,  $A_{\rm rp}$ ,  $B_{\rm rp}$  и  $C_{\rm rp}$  – вспомогательные коэффициенты [7].

В результате подстановки выражений (4) – (7) в формулу (1) она примет вид, в котором явно фигурирует коэффициент участковой скорости  $k_{vy}$ :

$$b = \frac{I_{m}}{Q \cdot \eta} \left( K_{x} \cdot K_{b_{x}} \cdot \frac{N_{KH} \cdot k_{y^{u}}}{V_{y^{u}}} + \frac{K_{TC} - K_{x} \cdot K_{b_{x}}}{367, 2} \times \left( P \left( 1, 9 + A_{\pi} \cdot \frac{V_{y^{u}}}{k_{y^{u}}} + B_{\pi} \cdot \frac{V_{y^{u}}^{2}}{k_{y^{u}}^{2}} \right) + Q \left( A_{rp} + B_{rp} \cdot \frac{V_{y^{u}}}{k_{y^{u}}} + C_{rp} \cdot \frac{V_{y^{u}}^{2}}{k_{y^{u}}^{2}} \right) + i \right) \right).$$
(8)

В результате дифференцирования выражения (8) по  $k_{yy}$  и возврата с помощью формулы (4) к отчетному показателю  $V_{\text{тех}}$  получаем:

$$\frac{db}{dk_{yq}} = \frac{I_{T}}{Q \cdot \eta} \left( K_{x} \cdot K_{b_{x}} \frac{N_{KH}}{V_{Tex} \cdot k_{yq}} - \frac{K_{TC} - K_{x} \cdot K_{b_{x}}}{367, 2} \times \left( \frac{P \cdot A_{T} \cdot V_{Tex}}{k_{yq}} + \frac{2 \cdot P \cdot B_{T} \cdot V_{Tex}^{2}}{k_{yq}} + \frac{Q \cdot B_{Tp} \cdot V_{Tex}}{k_{yq}} + \frac{2 \cdot Q \cdot C_{Tp} \cdot V_{Tex}^{2}}{k_{yq}} \right) \right).$$
(9)

После подстановки выражения (9) в (3) формула для расчета коэффициента влияния  $\beta_{k_{yq}}$  примет вид:

$$\beta_{k_{y_{\text{T}}}} = \frac{100 \cdot I_{\text{m}}}{b \cdot Q \cdot k_{y_{\text{T}}} \cdot \eta} \left( \frac{K_{x} \cdot K_{b_{x}} \cdot N_{\text{KH}}}{V_{\text{Tex}}} - \frac{\left(K_{\text{TC}} - K_{x} \cdot K_{b_{x}}\right)}{367, 2} \times \left(V_{\text{Tex}} \left(P \cdot A_{\pi} + Q \cdot B_{\text{rp}}\right) + 2V_{\text{Tex}}^{2} \left(P \cdot B_{\pi} + Q \cdot C_{\text{rp}}\right)\right).$$

$$(10)$$

С целью количественной оценки величины коэффициента влияния  $\beta_{k_{yq}}$  выполнен расчет по формуле (10) на основе реальных исходных данных для отдельных структурных подразделений и сети железных дорог в целом на полигоне электрической (ЭТ) и дизельной (ДТ) тяги (таблица 2). Анализ составляющих уравнения (10) и полученных результатов расчетов показал, что наибольшее влияние на изменение величины  $\beta_{k_{yq}}$  оказывает изменение технической скорости.

Таблица 2 – Результаты расчета коэффициента влияния  $\beta_{k_{**}}$ 

Железная дорога	Вид тяги	<i>b</i> , кВт·ч (кг)/ 10 тыс. ткм брутто	Q, T	$V_{ m rex}$ , км/ч	k <sub>уч</sub> , %	$eta_{\scriptscriptstyle k_{ m yu}}$ , %
Забайкальская	ΤE	105,9	4114	36,0	90,6	-0,314
<b>Заоаикальская</b>	ДТ	74,4	2804	38,7	78,0	-0,052
20110 гио Сибирокод	ТЄ	80,6	4333	55,7	88,7	-0,866
Западно-Сибирская	ДТ	37,6	2934	55,1	83,6	-0,294
Changenored	ТЄ	98,3	4091	41,2	78,2	-0,496
Свердловская	ДТ	29,6	3870	44,8	76,1	-0,333
Canana Vanyaaayaa	ТE	113,0	3363	47,2	57,8	-0,822
Северо-Кавказская	ДТ	40,1	3139	40,2	75,4	-0,122
Всего по сети желез-	ТE	96,4	4041	47,3	85,0	-0,601
ных дорог	ДТ	41,3	3318	45,1	81,4	-0,181

Существенные различия полученных значений  $\beta_{k_{yq}}$  подтверждают вывод о том, что расчет коэффициентов влияния показателей использования локомотивов, в том числе коэффициента участковой скорости, необходимо выполнять для каждого структурного подразделения и анализируемого календарного периода.

Предложенная авторами статьи формула для расчета  $\beta_{k_{yq}}$  (10) включена в Методику анализа и прогнозирования расхода ТЭР на тягу поездов, внедренную на сети железных дорог России в 2015 г.

#### Список литературы

- 1. Энергосбережение на железнодорожном транспорте: Справочно-методическое издание [Текст] / В. А. Гапанович, В. Д. Авилов и др. М.: Интехэнерго-Издат; Теплоэнергетик,  $2014.-304~\rm c.$
- 2. Игин, В. Н. Энергосбережение в эксплуатационном депо [Текст] / В. Н. Игин, А. Ю. Новиков, С. С. Петраковский // Локомотив. 2014. № 7 (691). С. 9 11.
- 3. Современная методология технического нормирования расхода топливно-энергетических ресурсов локомотивами на тягу поездов [Текст] / Л. А. Мугинштейн. М.: ВМГ-Принт, 2014.-144 с.
- 4. Молярчук, В. С. Теоретические основы методики нормирования расхода топлива и электроэнергии для тяговых средств транспорта [Текст] / В. С. Молярчук. М.: Транспорт, 1966. 263 с.
- 5. Теория электрической тяги: Учебник [Текст] / С. И. Осипов, С. С. Осипов, В. П. Феоктистов. М.: Маршрут, 2006. 436 с.
  - 6. Правила тяговых расчетов для поездной работы [Текст]. М.: Транспорт, 1985. 287 с.
- 7. Сидорова, Е. А. Влияние показателей использования локомотивов на расход энергоресурсов в грузовом движении [Текст] / Е. А. Сидорова, С. О. Подгорная // Транспорт Урала / Уральский гос. ун-т путей сообщения. Екатеринбург. 2016. № 1 (48). С. 41 45.

#### References

- 1. Gapanovich V. A., Avilov V. D., Ivanov B. I. *Jenergosberezhenie na zheleznodorozhnom transporte: Spravochno-metodicheskoe izdanie* (Energy savings in rail transport: The edition of guidance, of the). Moscow: Intehjenergo-Izdat, Teplojenergetik, 2014, 304 p.
- 2. Igin V. N., Novikov A. Ju., Petrakovskij S. S. Energy saving in operational depot [Jenergosberezhenie v jekspluatacionnom depo]. Lokomotiv Locomotive, 2014, no. 7 (691), pp. 9 11.
- 3. Muginshtejn L. A. *Sovremennaja metodologija tehnicheskogo normirovanija rashoda top-livno-jenergeticheskih resursov lokomotivami na tjagu poezdov* (Modern methodology of technical regulation of fuel and energy resources locomotives for hauling). Moscow: VMG-Print, 2014, 144 p.

- 4. Moljarchuk V. S. *Teoreticheskie osnovy metodiki normirovanija rashoda topliva i jelektro- jenergii dlja tjagovyh sredstv transporta* (Theoretical foundations of methods of fuel rationing and electricity for traction transport means). Moscow: Transport, 1966, 263 p.
- 5. Osipov S. I., Osipov S. S., Feoktistov V. P. *Teorija jelektricheskoj tjagi* (The theory of electric traction). Moscow: Marshrut, 2006, 436 p.
- 6. *Pravila tjagovyh raschetov dlja poezdnoj raboty* (Rules for the train traction calculation). Moscow: Transport, 1985, 287 p.
- 7. Sidorova E. A., Podgornaja S. O. Effect of utilization rates of locomotives on the consumption of energy resources in the cargo movement [Vlijanie pokazatelej ispol'zovanija lokomotivov na rashod jenergoresursov v gruzovom dvizhenii]. *Transport Urala Urals Transport*, 2016, no. 1 (48), pp. 41–45.

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

#### Сидорова Елена Анатольевна

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

Доктор технических наук, заведующая кафедрой «Информатика, прикладная математика и механика», ОмГУПС.

Тел.: +7 (3812) 31-18-66. E-mail: pmm@omgups.ru

#### Подгорная Светлана Олеговна

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

Инженер, ОмГУПС. Тел.: +7 (3812) 31-18-66. E-mail: ps.light@mail.ru

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Сидорова, Е. А. Влияние коэффициента участковой скорости на удельный расход энергии в грузовом движении [Текст] / Е. А. Сидорова, С. О. Подгорная // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. — Омск. — 2016. —  $\mathbb{N}$  2 (26). — С. 112 — 118.

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

#### Sidorova Elena Anatolievna

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Doctor of Technical Sciences, Professor, head of the department «Computer science, applied mathematics and mechanics» Omsk State Transport University.

Phone: +7 (3812) 31-18-66. E-mail: pmm@omgups.ru

#### Podgornaya Svetlana Olegovna

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx st., Omsk, 644046, the Russion Federation. Engineer, Omsk State Transport University (OSTU).

Phone: +7 (3812) 31-18-66. E-mail: ps.light@mail.ru

#### BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Sidorova E. A., Podgornaya S. O. Precinct speed factor influence on specific energy consumption in freight traffic. Journal of Transsib Railway Studies, 2016, vol. 26, no. 2, pp. 112 – 118. (In Russian).

УДК 625.143-192

#### Н. И. Карпущенко, П. С. Труханов

Сибирский государственный университет путей сообщения (СГУПС), г. Новосибирск, Российская Федерация

#### ОЦЕНКА И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ НАДЕЖНОСТИ РЕЛЬСОВ В РАЗЛИЧНЫХ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ УСЛОВИЯХ

**Аннотация.** В статье представлены методики расчета надежности рельсов. Проведено исследование отказов и долговечности рельсов на двух направлениях Западно-Сибирской дирекции инфраструктуры для участков пути с разными эксплуатационными характеристиками. Получена зависимость гамма-процентного ресурса рельсов от осевой нагрузки вагонов и плана пути. Сделано заключение об условиях увеличения продолжительности жизненного цикла рельсов с наработкой тоннажа до 1500 млн т брутто.

**Ключевые слова:** надежность рельсов, отказы, гамма-процентный ресурс рельсов, наработанный тоннаж, осевая нагрузка, радиус кривых.

#### Nikolai I. Karpuschenko, Pavel S. Trukhanov

Siberian State Transport University (SSTU)

## ASSESSMENT AND FORECASTING OF RELIABILITY OF RAILS IN VARIOUS OPERATIONAL CONDITIONS

**Abstract.** Method of calculation of reliability of rails are presented in article. Research of refusals and durability of rails on two directions of the West Siberian management of infrastructure for sites of a way with different operational characteristics is conducted. Dependence of a gamma percent resource of rails on axial loading of cars and the plan of a way is received. Conclusions about a possibility of reaching of the passed tonnage of rails in 1500 million tons gross are given.

**Keywords:** reliability of rails, failures, a gamma percent resource of rails, the passed tonnage, axial load, radius of curves.

Для повышения эффективности перевозочного процесса на сети железных дорог ОАО «РЖД» реализуется программа повышения веса поезда.

Очень важным фактором стало появление на сети инновационных вагонов с повышенной нагрузкой 25 т на ось. На сети сейчас уже 35 тыс. таких полувагонов. Они не требуют технического обслуживания в пути следования, что значительно ускоряет их продвижение и сокращает затраты на их осмотр на станциях. Немаловажно использование инновационного подвижного состава в кольцевых маршрутах. Например, можно перевозить в этих вагонах уголь из Кузбасса на Дальний Восток поездами с повышенной весовой нормой в 7 тыс. 100 т. Тяжеловесные поезда массой 9 тыс. т уже следуют из Кузбасса до станции Лужская. Однако известно, что инновационные вагоны с повышенной осевой нагрузкой оказывают негативное воздействие на инфраструктуру.

Повышение надежности работы верхнего строения пути в современных условиях эксплуатации осуществляется в двух направлениях: первое — разработка и внедрение более совершенных элементов конструкций пути — рельсов, скреплений, железобетонных шпал; второе — широкое применение мероприятий, направленных на максимальное использование резервов работоспособности существующих конструкций.

Вопросы повышения качества и эксплуатационной стойкости рельсов всегда занимали одно из центральных мест в важнейших разработках нашей страны. В настоящее время рельсы отечественного производства существенно уступают рельсам из передовых стран Европы, США и Японии: по сроку службы (у отечественных -600-750 млн т брутто наработки тоннажа, у зарубежных -1,0-1,5 млрд т брутто).

Согласно ГОСТ Р 51685-2013 «Рельсы железнодорожные. Общие технические условия» гамма-процентный ресурс рельсов должен составлять не менее 92,5 % при наработке тоннажа 1100 млн т брутто [1].

Руководство компании ОАО «РЖД» ставит задачу довести продолжительность жизненного цикла верхнего строения бесстыкового пути на железобетонных шпалах с упругим рельсовым скреплением до наработки 1500 млн т брутто.

В связи с этим оценим безотказность и долговечность типовых термоупрочненных рельсов категории качества Т1 в различных условиях эксплуатации.

**Оценка надежности рельсов по усеченной выборке отказов.** Для оценки надежности невосстанавливаемых объектов, к которым относятся рельсы, используют вероятностные характеристики случайной величины — наработки t объекта от начала его эксплуатации до первого отказа. Под наработкой понимают объем работы рельсов, измеряемой в миллионах тонн брутто, пропущенного по участку пути тоннажа.

При испытаниях на надежность рельсов чаще всего используют нормальный закон распределения, так как отказы рельсов могут быть вызваны многими равно влияющими факто-

рами. Параметрами распределения для нормального закона являются средняя наработка до отказа, которая определяется как математическое ожидание величины t,  $M_t = T_{\rm cp}$ , и дисперсия этой величины  $D_t$ . По статистическим данным об отказах средняя наработка до отказа вычисляется по формуле:

$$T_{\rm cp} = \sum_{i=1}^{N_0} t_i / N_0, \tag{1}$$

где  $N_0$  – число испытуемых рельсов;

 $t_i$  — наработка безотказной работы i-го рельса.

Уравнение для статистической оценки дисперсии величины *t* имеет вид:

$$D_{t} = \sum_{i=1}^{N_{0}} (t_{i} - T_{cp}) / T_{0}.$$
 (2)

За меру рассеивания принимают также среднее квадратическое отклонение

$$\sigma_t = \sqrt{D_t}$$
.

Расчеты ведутся с использованием интегральной функции нормального распределения (нормированной и центрированной)

$$F_0(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{x} e^{-\frac{x^2}{2}dx}.$$
 (3)

Переменная величина этой функции

$$x = (t_i - T_{cp}) / \sigma_t. \tag{4}$$

Эксплуатировать рельсы до полного отказа всех элементов невозможно, поэтому для определения параметров распределения отказов используют усеченные выборки.

В случае усеченной выборки, когда в результате испытаний объектов получены r возрастающих значений наработки ( $r < N_0$ ), для отказавших объектов  $t_1$ ,  $t_2$ ,...,  $t_r$ , а  $N_{0-r}$  объектов по истечении некоторого времени  $t_0 \ge t_r$  остались исправными, параметры  $T_{\rm cp}$  и  $\sigma_t$  можно оценить по методу квантилей следующим образом [2].

Квантиль порядка P есть такое значение  $U_P$  случайной величины x, для которой  $F_0(x) = F_0(U_P) = P \ (0 < P < 1)$ .

Значения функций  $F_0(U_P) = P$  и соответствующие ей значения  $U_P$  можно найти в специальных таблицах нормального распределения:

$$U_P = \frac{t_i - T_{\rm cp}}{\sigma_t} \quad \text{if} \quad t_i = T_{\rm cp} + U_P \sigma_t. \tag{5}$$

Индекс P означает «вероятность» и в таблицах квантилей задается в пределах  $0,5 \le P \le 1$ , если  $P \le 0,5$ , то определяют 1-P, т. е.  $U_{1-P} = -U_P$  и  $t_{1-P} = T_{\rm cp} - U_P \sigma_t$ .

Считаем, что за время  $t_i$  вероятность выхода из строя испытываемых объектов

$$F(t_i) = \frac{r(t_i)}{N_0}. (6)$$

Для этой вероятности (частости) определим квантили  $U_P$  по таблице и составим r уравнений:

$$\begin{cases} T_{cp} + U_{P1}\sigma_t = t_1; \\ T_{cp} + U_{P2}\sigma_t = t_2; \\ ... \\ T_{cp} + U_{Pr}\sigma_t = t_r. \end{cases}$$

$$(7)$$

Полученную систему уравнений решаем по методу наименьших квадратов, для чего умножим левые части каждого из уравнений системы на  $U_{P1},\ U_{P2},...,\ U_{Pr}$  соответственно и все r уравнений сложим, в результате чего получим первое, так называемое нормальное уравнение:

$$T_{\rm cp} \sum_{i=1}^{r} U_{Pi} + \sigma_t \sum_{i=1}^{r} U_{Pi}^2 = \sum_{i=1}^{r} U_{Pi} t_i.$$
 (8)

Второе нормальное уравнение получим суммированием уравнений системы (7):

$$T_{cp}r + \sigma_t \sum_{i=1}^r U_{Pi} = \sum_{i=1}^r t_i.$$
 (9)

Уравнения (8) и (9) решаем относительно неизвестных  $T_{\rm cp}$  и  $\sigma_t$ , и находим, таким образом, их оценки.

Оценка доверительных границ (95 %) найденных значений параметров  $T_{\rm cp}$  и  $\sigma_t$  производится по формулам:

$$\begin{cases}
T_{cp} \left( \max/ \min \right) = T_{cp} \pm 2\sigma(T_{cp}); \\
\sigma_{t} \left( \max/ \min \right) = \sigma_{t} \pm 2\sigma(\sigma_{t}).
\end{cases}$$
(10)

В зависимостях (10) значения  $\sigma(T_{\rm cp})$  и  $\sigma(\sigma_t)$  вычисляются так:

$$\sigma^{2}(T_{cp}) = \frac{\sigma_{t}^{2}}{N_{0}} f_{2}(k); \ \sigma^{2}(\sigma_{t}) = \frac{\sigma_{t}^{2}}{N_{0}} f_{3}(k), \tag{11}$$

где k – коэффициент усечения выборки,

$$k = \frac{T_{\rm cp} - t_r}{\sigma_t},\tag{12}$$

где  $f_2(k)$  и  $f_3(k)$  – вспомогательные функции [3];

 $N_0$  – количество обследуемых рельсов на данном участке.

**Определение гамма-процентного ресурса рельсов.** В этом случае необходимо решить задачу, обратную приведенному выше алгоритму, а именно: по заданной вероятности отказа определить значения соответствующей ей наработки.

Пусть задано  $F(t) = F(t_P)$ . Этой функции соответствует нормированная функция  $F_0(x) = F_0(U_P)$ , при этом  $t = t_P$  и  $x = U_P$ .

Гамма-процентному ресурсу рельсов  $\gamma = 92,5 \%$  соответствует вероятность безотказной работы

$$P(T_{\gamma}) = \gamma/100 = 0.925.$$
 (13)

Каждому значению  $\gamma/100$  соответствует определенное значение квантили  $U_P$ , равное корню функции  $F_0(U_P)$ .

Применительно к данному случаю квантиль  $U_P$  соответствует наработке, при которой будет иметь место заданная вероятность отказа  $F(t_{\gamma}) = 0,075$ . Значения функции  $F_0(U_P)$  и соответствующие ей значения  $U_P$  можно найти в специальных таблицах.

$$U_P = \frac{T_{\gamma} - T_{\rm cp}}{\sigma_{\rm t}} \quad \text{и} \quad T_{\gamma} = T_{\rm cp} - U_P \sigma_{\rm t}. \tag{14}$$

В нашем случае  $U_P = 1,44$ .

**Прогнозирование отказов рельсов.** Для обеспечения безопасности движения поездов на всех этапах жизненного цикла рельсов нужно уметь прогнозировать их отказы.

Рассмотрим методику прогнозирования отказов с использованием нормального распределения долговечности.

При прогнозировании необходимо решить задачу: по известным оценкам  $T_{cp}$  и  $\sigma_t$  вычислить точечный прогноз вероятности отказов рельсов  $F(t_i)$  при наработке  $t_i$ .

Последовательность вычислений следующая. Определяем квантиль нормального распределения, соответствующий вероятности  $F(t_i)$ , по формуле:

$$U_{Pi} = \frac{t_i - T_{\rm cp}}{\sigma_i}.$$
 (15)

Зная квантиль  $U_{Pi}$ , определяем вероятность  $F(t_i)$  с использованием табулированной функции  $F_0(x)$ .

Оценку суммарного выхода рельсов из расчета на один километр бесстыкового пути определим по формуле

$$n(t_i) = 160F(t_i),$$
 (16)

где 160 – условное количество рельсов длиной 12,5 м на одном километре бесстыкового пути.

Точность и достоверность прогноза зависят от соотношения основания прогноза, или ретроспективного периода, и глубины прогноза, или периода упреждения:

$$\tau = \frac{t_{y}}{t_{p}},\tag{17}$$

где  $t_y$  – период упреждения;

 $t_p$  — величина ретроспективного периода.

Относительная ошибка прогноза определяется по формуле:

$$E = \frac{n_{\pi} - n_{\phi}}{n_{\phi}} 100\%, \tag{18}$$

где  $n_{\rm II}$  и  $n_{\rm d}$  – прогнозируемые и фактические значения отказов рельсов.

Обычно чем больше т, тем менее достоверны результаты прогнозирования.

**Исследование отказов и долговечности рельсов.** При введении в обращение нового массового подвижного состава, в том числе с повышенными осевыми нагрузками, необходимо оценивать его соответствие не только показателям прочности элементов верхнего строения, но и долговечности.

Поэтому основное внимание было сосредоточено на оценке надежности пути по отказам элементов верхнего строения и прежде всего наиболее ответственных элементов – рельсов типа P65 категории качества T1 на двух двухпутных эксплуатационных направлениях Западно-Сибирской дирекции инфраструктуры: Омск – Новосибирск – Красноярск (Транссибирская магистраль) и Входная – Среднесибирская – Кузбасс (Среднесибирская магистраль).

Технические параметры опытных участков приведены в таблице 1.

Анализ отказов рельсов производился с использованием рельсовых книг с 2009 по 2015 г. включительно. Наработанный тоннаж на локальных участках составлял от 100 до 1300 млн т брутто.

Таблица 1 – Характеристики опытных участков

	Технические параметры участков							
Эксплуатационное направление	средняя грузо- напряженность, млн ткм брут- то/км в год	средняя осевая нагрузка, кН	средневзве- шенный радиус кривых, м	доля кривых на участке, %	гамма- процентный ресурс рельсов ( $\gamma = 92,5 \%$ ), млн т брутто			
Омск – Новоси- бирск 1	111	186	721	0,4	1100			
Омск – Новоси- бирск 2	74	123	648	0,3	1520			
Новосибирск – Красноярск 1	65	157	629	24,0	1157			
Новосибирск – Красноярск 2	80	183	629	23,5	923			
Входная – Среднесибирская 1	112	215	802	2,6	923			
Входная – Среднесибирская 2	42	76	828	2,4	1913			
Среднесибирская – Кузбасс 1	105	216	541	38,4	769			
Среднесибирская – Кузбасс 2	34	76	556	23,7	1674			

Данные об отказах рельсов на конкретном опытном участке представляют вариационный ряд случайных чисел в функции наработки  $t_i$  тоннажа (таблицы 2-4). Фактическая частота отказов  $r(t_i)$  определяется как частное от деления накопленных (суммарных) отказов на протяженность локального участка в километрах.

Таблица 2 – Оценка и прогнозирование отказов рельсов на Транссибирской магистрали

Участок Омск – Новосибирск, 1-й путь								
Средняя осевая нагрузка, кН	Протяжен- ность кри- вых, %	Средняя грузона- пряжен- ность, млн т брутто/км в год	Наработка $\it t_i$ , млн т бругто	Протяжен- ность участка, км	Фактическая частота отказов $r(t_i)$ , шт./км	Прогнозируемая частота отказов $r'(t_i)$ , шт./км	Относи- тельная ошибка <i>E</i> в зависи- мости от глубины прогноза, %	
	0,4	111,0	100	582,9	0,08	0,09	11,8	
		112,1	300	553,0	0,28	0,30	8,3	
		114,8	500	144,9	1,05	0,91	-13,6	
182		112,6	700	141,1	2,61	2,41	-7,6	
102	0,4	111,0	900	130,0	5,85	5,69	-2,8	
		110,7	1100	255,6	11,90	11,97	0,6	
		107,1	1300	102,5	21,10	22,49	6,6	
		_	1500	_	_	38,03	_	
$T_{ m cp}$ =	= 1893 млн т бј	р.; $\sigma_t = 550$ млн	т бр.; Т(92,5 %	(о) = 1100 млн т	бр.	$E_{ m cp}$	7,3	

Значения параметров нормального распределения  $T_{\rm cp}$  и  $\sigma_t$  определяем по полученным данным методом квантилей в сочетании с методом наименьших квадратов.

С использованием зависимости (15), по найденным для каждого участка  $T_{\rm cp}$  и  $\sigma_t$  при  $U_P=1,44$  получены значения  $T_\gamma$ , которые приведены в таблице 1 и на рисунке.

Анализ данных рисунка показывает, что при снижении средней осевой нагрузки относительно стандартной для Транссибирской магистрали  $P_{\rm cr}=180~{\rm kH}$  гамма-процентный ресурс  $T_{\gamma}$  увеличивается, а при росте — уменьшается.

При снижении величины средневзвешенного радиуса и увеличении доли кривых на участке значение гамма-процентного ресурса рельсов также уменьшается.

Статическая обработка данных  $T_{\gamma}$  с использованием регрессионного анализа позволила получить следующую зависимость  $T_{\gamma}$ :

$$T_{\gamma} = 1100 \left( \left( \frac{P_{\rm cr}}{P_{\rm cp}} \right)^{0.83} - \varepsilon \left( \frac{R_{\rm cp}}{R_{\rm cr}} \right)^{1.2} \right),$$
 (19)

где  $P_{\rm cp}$  – средняя осевая нагрузка подвижного состава на рассматриваемом участке;

 $P_{\rm cr}$  — стандартная нагрузка, при которой определены параметры функции (19) ( $P_{\rm cr}$  = 180 кH);

 $R_{\rm cr}$  — стандартный радиус, при котором определены параметры функции (19), обычно  $R_{\rm cr}$  принимают равным 1000 м, так как в таких кривых выход рельсов мало отличается от прямых;

 $R_{\rm cp}$  – средневзвешенный радиус кривых на рассматриваемом участке;

ε – доля кривых на 1 км длины рассматриваемого участка.

Таблица 3 – Оценка и прогнозирование отказов рельсов на Транссибирской магистрали

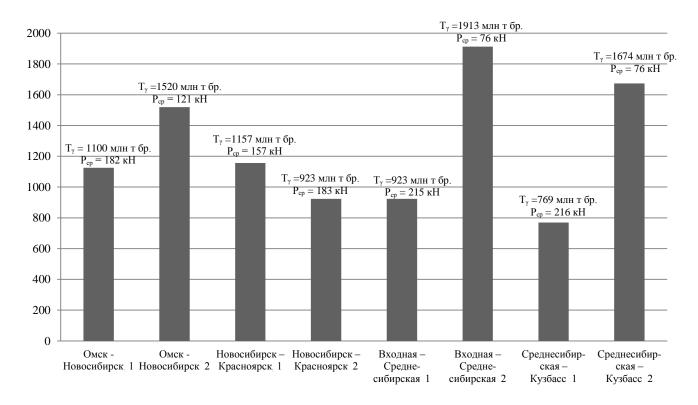
	Участок Омск – Новосибирск, 2-й путь								
Средняя осевая нагрузка, кН	Протяжен- ность кри- вых, %	Средняя грузона-пряженность, млн бругто/км в год	Наработка $t_i$ , млн т брутто	Протяжен- ность участка, км	Фактиче- ская часто- та отказов $r(t_i)$ , шт./км	Прогнозируемая частота отказов <i>r</i> '( <i>t<sub>i</sub></i> ),	Относи- тельная ошибка E в зависимо- сти от глу- бины про- гноза, %		
	0,3	73,7	100	226,88	0,12	0,13	5,2		
		68,5	300	66,96	0,29	0,28	-2,8		
		73,5	500	493,47	0,62	0,60	-3,9		
121		73,6	700	448,8	1,21	1,19	-1,3		
121		73,9	900	381,34	2,18	2,28	4,4		
		74,3	1100	142,56	4,12	4,10	-0,4		
		_	1300	_	_	7,03	_		
		_	1500	_	_	11,46	_		
$T_{ m cp}$ =	= 2709 млн т бј	бр.	$E_{ m cp}$	3,0					

Таблица 4 – Оценка и прогнозирование отказов рельсов на Среднесибирской магистрали

	Участок Входная – Среднесибирская 2								
Средняя осевая нагрузка, кН	Протяжен- ность кри- вых, %	Средняя грузона-пряженность, млн бругто/км в год	Наработка $t_i$ , млн т брутто	Протяжен- ность участка, км	Фактиче- ская часто- та отказов $r(t_i)$ , шт./км	Прогнозируемая частота отказов $r'(t_i)$ , шт./км	Относи- тельная ошибка <i>E</i> в зависимо- сти от глу- бины про- гноза, %		
1	2	3	4	5	6	7	8		
76	0,3	41,5	100	780,0	0,15	0,16	6,7		

#### Окончание таблицы 4

1	2	3	4	5	6	7	8
		42,2	300	201,4	0,31	0,30	-4,0
		41,9	500	136,3	0,55	0,52	-5,0
		27,3	700	102,4	0,96	0,89	-7,4
		41,2	900	110,5	1,42	1,47	3,5
		41,5	1100	140,7	2,25	2,36	5,1
			1300	ı	_	3,68	ı
		_	1500	ı	_	5,57	ı
$T_{\rm cp}$ =	$E_{ m cp}$	5,3					



Гамма-процентный ресурс ( $\gamma$  = 92,5 %) рельсов категории Т1 на опытных участках

В этом случае формула (19) будет иметь вид:

$$T_{\gamma} = 1100 \left( \left( \frac{180}{P_{\rm cp}} \right)^{0.83} - \varepsilon \left( \frac{R_{\rm cp}}{1000} \right)^{1.2} \right). \tag{20}$$

Имея параметры нормального распределения отказов рельсов по фактическим данным, можно составить прогноз выхода рельсов в дефектные и определить относительную ошибку прогноза (см. таблицы 2-4).

Оценку суммарного выхода рельсов из расчета на один километр пути при наработке  $t_i$  определим по формуле (16).

В соответствии с этой формулой суммарные отказы рельсов при  $F(T_{\gamma}) = 0.075$  составляют 12 шт., что достаточно много [4]. При дальнейшем росте тоннажа выход рельсов резко нарастает (см. таблицы 2 – 4), что ведет к риску излома рельсов под поездом.

В связи с этим наработка тоннажа до 1500 млн т брутто возможна только на участках, где средние осевые нагрузки не превышают 120 кH, а доля кривых не превышает 20 % от протяженности участка.

#### Список литературы

- 1. ГОСТ Р51685-2013. Рельсы железнодорожные. Общие технические условия. М.: Стандартинформ, 2014. 31 с.
- 2. Карпущенко, Н. И. Обеспечение надежности железнодорожного пути и безопасности движения поездов [Текст] / Н. И. Карпущенко, Д. В. Величко / Сибирский гос. ун-т путей сообщения. Новосибирск, 2008. 321 с.
- 3. Карпущенко, Н. И. Надежность железнодорожного пути: Учебное пособие [Текст] / Н. И. Карпущенко, Г. И. Тарнопольский / Новосибирский ин-т инж. ж.-д. трансп. Новосибирск, 1989. 104 с.
- 4. Технические условия на работы по реконструкции (модернизации) и ремонту железнодорожного пути [Текст] / ОАО «РЖД», Центр «Транспорт». 2013. 236 с.

#### References

- 1. Standart R51685-2013. Rails are railway. General specifications [GOST R51685–2013. Relsy zheleznodorozhnye. Obschie tekhnicheskie usloviya]. Moscow: Standard inform, 2014, 31 p.
- 2. Karpushchenko N. I., Velichko D. V. *Obespechenie nadejnosti jeleznodorojnogo puti i bezopasnosti dvijeniya poezdov* (Ensuring reliability of a railway track and traffic safety of trains). Novosibirsk, 2008, 321 p.
- 3. Karpushchenko N. I., Tarnopolsky G. I. *Nadezhnost zheleznodorozhnogo puti* (Reliability of a railway track: teaching aid). Novosibirsk, 1989, 104 p.
- 4. Tekhnicheskie usloviya na raboty po rekonstruktsii (modernizatsii) i remontu zheleznodorozhnogo puti (Specifications for works on reconstruction (modernization) and repair of a railway track). Moscow: Transport center, 2013, 236 p.

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

#### Карпущенко Николай Иванович

Сибирский государственный университет путей сообщения (СГУПС).

Дуси Ковальчук ул., д. 191, г. Новосибирск, 630049, Российская Федерация.

Доктор технических наук, профессор кафедры «Путь и путевое хозяйство», СГУПС.

Тел.: +7 (383) 328-05-66.

E-mail: kni@stu.ru

#### Труханов Павел Станиславович

Сибирский государственный университет путей сообщения (СГУПС).

Дуси Ковальчук ул., д. 191, г. Новосибирск, 630049, Российская Федерация.

Аспирант, инженер научно-исследовательской лаборатории «Путеиспытательная», СГУПС.

E-mail: gaiwer123@mail.ru

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Карпущенко, Н. И. Оценка и прогнозирование надежности рельсов в различных эксплуатационных условиях [Текст] / Н. И. Карпущенко, П. С. Труханов // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. — Омск. — 2016. — 126.

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

#### Karpuschenko Nikolai Ivanovich

Siberian State Transport University (SSTU).

191, Dusi Kovalchuk st., Novosibirsk, 630049, the Russion Federation.

Doctor of Technical Sciences, Professor of the department «Track and track facilities».

Phone: +7 (383) 328-05-66.

E-mail: kni@stu.ru

#### Trukhanov Pavel Stanislavovich

Siberian State Transport University (SSTU).

191, Dusi Kovalchuk st., Novosibirsk, 630049, the Russion Federation.

Post-graduate student, engineer of research laboratory «Track Testing, SSTU.

E-mail: gaiwer123@mail.ru

#### **BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION**

Karpuschenko N. I., Trukhanov P. S. Assessment and forecasting of reliability of rails in various operational conditions. Journal of Transsib Railway Studies, 2016, vol. 26, no. 2, pp. 118-126. (In Russian).

УДК 656.2:658.382.3

#### Ю. В. Дементьева

Самарский государственный университет путей сообщения (СамГУПС), г. Самара, Российская Федерация

# КОРРЕЛЯЦИОННЫЙ АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ФАКТОРА «ВИД ПРОИСШЕСТВИЯ» НА СТАТИСТИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ТРАВМАТИЗМА (НА ПРИМЕРЕ ХОЗЯЙСТВА ПУТИ КУЙБЫШЕВСКОЙ ЖЕЛЕЗНОЙ ДОРОГИ)

Аннотация. В статье проведен корреляционный анализ влияния вида происшествий, как качественного факторного признака, на статистические показатели производственного травматизма в хозяйстве пути Куйбышевской железной дороги за ряд последовательных лет. Посредством математических расчетов установлена статистическая взаимосвязь исследуемых характеристик и величин с учетом степени тяжести повреждения здоровья работников, пострадавших от несчастных случаев на производстве. Подтверждена постановочная гипотеза в рамках путевого хозяйства Куйбышевской железной дороги и произведена оценка степени взаимной сопряженности видов происшедших несчастных случаев и их количества. Показана практическая значимость полученных результатов корреляционного анализа в части формирования и (или) корректировки превентивных мероприятий по снижению уровня профессиональных рисков и профилактики производственного травматизма.

**Ключевые слова:** путевое хозяйство, производственный травматизм, несчастный случай на производстве, опасный фактор, степень тяжести повреждения здоровья, вид происшествия, статистическая зависимость, коэффициент корреляции, корреляционная зависимость.

#### Yulia V. Dementyeva

Samara State Transport University (SSTU), Samara, the Russian Federation

## CORRELATION ANALYSIS OF «ACCIDENT TYPE» FACTOR ON INDUSTRIAL INJURIES STATISTIC INDEX

Abstract. The article provides the correlation analysis of accident type influence as quality factorial characteristic on industrial injuries statistic index in the permanent way division of the Kuibyshev railway during some years. By means of mathematical calculations statistical correlation study of characteristics and values has made, taking into account the degree of severity of workers' health damage affected by industrial accidents. The hypothesis staged within the framework of Kuibyshev Railway permanent way division has confirmed and the degree of mutual contingency of accident types and their quantity has assessed. It is shown that the practical significance of the correlation analysis results on the formation and (or) adjustment of preventive measures to reduce the levels of occupational hazard and prevention of industrial injuries.

**Keywords:** industrial injuries, industrial injuries, occupational accident at work, dangerous factor, degree gravity damage health, fashion incident, statistic dependence, correlation parameter, correlation dependence.

Отраслевая специфика функционирования железнодорожного транспорта, особенности, сложность и разнообразие технологических процессов, эксплуатация оборудования и железнодорожного подвижного состава характеризуются потенциальным воздействием на работников опасных производственных факторов. В этой связи осуществление экономическими субъектами компании ОАО «РЖД» производственной деятельности сопряжено с риском наступления несчастного случая [1].

Служба пути – одно из основных и наиболее фондоемких хозяйств ОАО «РЖД», главной задачей которого является безопасное и бесперебойное движение поездов при безусловном обеспечении исправного содержания железнодорожного пути и путевых устройств [2].

Превалирующее большинство работников путевого хозяйства по основным направлениям деятельности занято на работах по ремонту и текущему содержанию железнодорожного пути, специфичность которых непосредственно связана с перманентной повышенной опасностью труда.

Апостериорно-агрегированный анализ статистических показателей производственного травматизма показал, что за период с 2004 по 2015 г. в хозяйстве пути Куйбышевской железной дороги произошло 124 несчастных случая, в результате которых пострадало 146 работников, из них 73 работника получили травмы легкой степени тяжести, 54 пострадало от тяжелых несчастных случаев и 19 человек травмированы смертельно [1, 3].

Трагические и фатальные происшествия на производстве происходят с работниками не случайно. В превалирующем большинстве всегда наличествуют причины, вызывающие травмирование работающих, т. е. предшествуют те или иные факторы, потенциально влияющие на безопасность их трудовой деятельности.

Существует гипотеза, что тот или иной вид происшествия, являясь либо не являясь опасным по своим последствиям, оказывает определенное влияние на показатели и динамику производственного травматизма, а также на степень тяжести происшедшего несчастного случая.

В целях определения зависимости показателей производственного травматизма в рамках хозяйства пути Куйбышевской железной дороги от факторного признака «вид происшествия» на момент его наступления были идентифицированы статистические данные за ряд последовательных лет исследуемого периода и ранжированы по категориям степени тяжести повреждения здоровья пострадавших с использованием материалов расследования несчастных случаев, происшедших на производстве.

Динамику статистических данных за ряд последовательных лет исследуемого периода по фактору «вид происшествия» представим в виде диаграммы на рисунке 1.

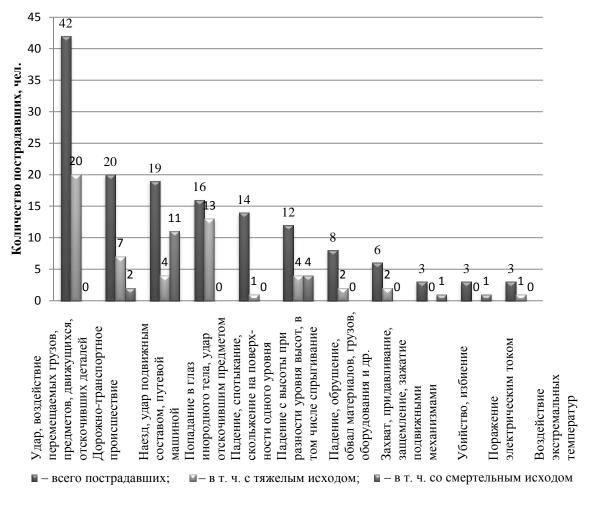


Рисунок 1 – Распределение работников хозяйства пути по фактору «вид происшествия»

Для научного подтверждения или опровержения постановочной гипотезы необходимо установить наличие или отсутствие взаимосвязи между рассматриваемым факторным признаком и соответствующими показателями производственного травматизма, используя результаты проведенного апостериорно-агрегированного статистического анализа за исследуемый период в хозяйстве пути Куйбышевской железной дороги [1, 3].

Посредством математических расчетов определим, насколько сопряжены статистические связи между качественным факторным признаком «вид происшествия» и соответствующими показателями производственного травматизма «количество пострадавших работников», ранжированных по степени тяжести повреждения здоровья пострадавших работников на легкую, тяжелую и смертельную.

Так как показатели по виду происшествий и количеству пострадавших работников — это случайные величины, их степень взаимосвязи характеризует корреляционная статистическая зависимость, математическим критерием которой является коэффициент их взаимной сопряженности, т. е. коэффициент корреляции Пирсона C [4].

Потенциальная взаимосвязь рассматриваемых величин определяется посредством изначальной классификации качественных признаков по группам в виде матрицы коэффициентов взаимной  $m \times n$  сопряженности, представленной в таблице 1, где  $p_{11}$ ,  $p_{12}$  ...  $p_{mn}$  — частоты событий с соответствующими признаками x и y.

	$\searrow y_i$	Признак $y_i$					
$x_{i}$		1-й качественный признак	2-й качественный признак		<i>n</i> -й качественный признак		
	1-й качественный признак	$p_{11}^{}$	$p_{12}$		$p_{1n}$		
нак $x_j$	2-й качественный признак	$p_{21}^{}$	p <sub>22</sub>		$p_{2n}$		
Признак							
	<i>m</i> -й качественный признак	$p_{m1}$	$p_{m2}$		$p_{mn}$		

Таблица 1 — Матрица коэффициентов взаимной  $m \times$ -матричной сопряженности

Корреляционная зависимость предполагает, что рассматриваемые переменные «вид выполняемой работы» и «количество пострадавших работников», распределенные по степени тяжести повреждения здоровья пострадавших работников на легкую, тяжелую и смертельную, сопряжены в матрице  $m \times n$ , где x — входная переменная и независимая случайная величина, y — выходная переменная и зависимая случайная величина, следовательно,  $x_i$  — значения, принимаемые переменной y [4].

Коэффициент  $m \times$ -матричной сопряженности вычисляется по формуле [4]:

$$C = \sqrt{\frac{X^2}{X^2 + N'}}\tag{1}$$

где

$$X^2 = N(\sum_{i=1}^{m} B_i - 1). (2)$$

Для определения значения  $X^2$  используем следующие расчетные формулы [4]:

$$N = \sum_{1}^{n} \sum_{1}^{m} p_{ji}; (3)$$

$$B_m = \frac{A_1}{\sum_{i=1}^{n} p_{1i}};\tag{4}$$

$$A_m = \sum_{1}^{n} \frac{p_{i1}^2}{\sum_{1}^{m} p_{ji}}.$$
 (5)

Подставив статистические данные в расчетные формулы (3) – (5), получим подготовительные математические расчеты для определения значения  $X^2$ , результаты которых трансформированы в таблицу 2, где  $p_{11}$ ,  $p_{12}$ ,  $p_{13}$  – количество работников, травмированных при производстве работ, легкой, тяжелой и смертельной степени тяжести повреждения здоровья, пострадавших соответственно за исследуемый период.

Таблица 2 — Расчет значения  $X^2$ 

	$y_i$ $x_j$	легкий $p_{m1}$	тяже- лый р <sub>т2</sub>	смертель- ный $p_{m3}$	$\sum_{1}^{3}$	$A_{j}$	$\mathrm{B}_{j}$
	Удар, воздействие перемещаемых, движущихся грузов, деталей	22	20	0	42	14,03754	0,334227
	Дорожно-транспортное происшествие	11	7	2	20	2,775469	0,138773
	Наезд, удар подвижным составом, путевой машиной, краном на жд. ходу	4	4	11	19	6,883895	0,362310
$x_j$	Попадание в глаз инородного тела, удар в глаз отскочившим предметом	3	13	0	16	3,252917	0,203307
Признак $x_j$	Падение, спотыкание, скольжение на поверхности одного уровня	13	1	0	14	2,333587	0,166685
Пр	Падение с высоты при разности уровней высот	4	4	4	12	1,357580	0,113132
	Падение, обрушение, обвалы материалов, грузов, оборудования и др.	6	2	0	8	0,567225	0,070903
	Захват, зажатие между подвижными частями рабочего оборудования	4	2	0	6	0,293252	0,048875
	Убийство, избиение	2	0	1	3	0,107426	0,035809
	Поражение электрическим током	2	0	1	3	0,107426	0,035809
	Воздействие экстремальных температур	2	1	0	3	0,073313	0,024438
	Общее количество пострадавших	73	54	19	146	31,78963	1,534268

Зная, что количество качественных факторных признаков «вид происшествия» m=11 и подставив в формулу (2) расчетные значения из таблицы 2, определим значение  $X^2$ :

$$X^2 = 146 (1,534 - 1) = 77,964.$$

Далее вычислим коэффициент взаимной сопряженности по формуле Пирсона (1):

$$C = \sqrt{\frac{77,964^2}{77,964^2 + 146}} = 0,59.$$

Для оценки значимости коэффициента C сравним статистическую величину  $X^2$  с его теоретическим значением  $X_{\alpha}^2$ , используя таблицу квантили  $X^2$  — распределения для доверительной вероятности уровня значимости 1-a=0.95 и 1-a=0.99 в зависимости от числа степеней свободы, рассчитанного по формуле [4]:

$$v = (m-1)(n-1), (6),$$

где m — число строк расчетной таблицы 2, n — число столбцов соответственно.

Подставив значения m и n, получим: v = (11 - 1)(3 - 1) = 20.

Если  $X^2_{\text{ст}} \leq X^2_{\alpha=0,05}$ , то принимается нулевая гипотеза об отсутствии корреляционной зависимости между рассматриваемыми величинами x и y. Если  $X^2_{\text{ст}} > X^2_{\alpha=0,01}$ , то нулевая гипотеза отклоняется и корреляционная взаимосвязь считается значимой, т. е. установленной [4].

Произведем оценку значимости (существенности) полученных коэффициентов взаимной сопряженности в соответствии с числом степеней свободы v=20. Сравнив  $X^2$  с теоретическим значением  $X^2_{\alpha=0,05}=31,4$ , получаем, что 77,964 > 31,4 и  $X^2>X^2_{\alpha=0,05}$ , далее – с теоретическим значением  $X^2_{\alpha=0,01}=37,6$ , получаем, что 77,964 > 37,6 и  $X^2>X^2_{\alpha=0,01}$ , это свидетельствует об установленной связи между рассматриваемыми переменными x и y.

На основании результата сравнения полученных статистических значений с теоретическими делаем вывод: взаимосвязь между парой рассматриваемых переменных взаимосвязи между факторным признаком «вид происшествия» и «количество пострадавших работников» с учетом степени тяжести повреждения здоровья пострадавших работников с вероятностью 0,99 % установлена.

Значение коэффициента корреляции Пирсона С изменяется от 0 до 1, т. е. измеряет тесноту взаимосвязи, не указывая ее направление. Используя шкалу Чеддока [5], произведем оценку тесноты связи между анализируемыми факторными признаками при рассчитанном коэффициенте корреляции Пирсона C = 0.59.

В соответствии с критериями шкалы Чеддока [5] результаты корреляционного анализа констатируют, что вид происшествия в момент наступления несчастного случая оказывает «заметное» — значительное влияние на статистические количественные показатели производственного травматизма и поставленную гипотезу в рамках путевого хозяйства Куйбышевской железной дороги следует подтвердить. В этой связи при формировании и (или) корректировке превентивных мероприятий по снижению уровней профессиональных рисков, профилактике производственного травматизма необходимо фокусировать внимание руководителей и работников на наиболее повторяющихся видах происшествий.

Диаграмма Парето – инструмент, позволяющий анализировать, ранжировать и выявлять наиболее существенные факторы, влияющие на показатели производственного травматизма, разделяя их на немногочисленные важные и многочисленные несущественные. Принцип Парето говорит о том, что 20 % наиболее значимых факторов приносят 80 %-ный вклад в изменение характеристики, поэтому целью применения диаграммы Парето является выбор таких видов происшествий, при которых пострадало наибольшее количество работников [6].

Используя статистические данные по фактору «вид происшествия», построим соответствующую диаграмму Парето (рисунок 2).

Из представленных выше сведений следует, что удар, воздействие перемещаемых грузов, предметов, движущихся, отскочивших деталей при производствах работ являются основными видами происшествия, при которых травмировано доминирующее количество работников -42 человека, составляющие 28.8 % от общего количества травмированных, в том числе 20 (13.7 %) с тяжелым исходом.

В дорожно-транспортных происшествиях пострадало 20 человек, что составляет 30,1 % от общего количества травмированных, в том числе семь человек (7,8 %) получили тяжелые повреждения здоровья и два работника (1,4 %) – со смертельным исходом.

19 работников (13,1 %) травмированы от наезда, удара подвижным составом, путевой машиной, краном на железнодорожном ходу, вместе с тем четыре человека (2,7 %) — с тяжелым исходом и 11 работников (7,5 %) — со смертельным исходом.

Несколько меньше -16 (23,3 %) - работников получили травмы от попадания в глаз инородного тела, удара в глаз отскочившим предметом, в том числе 13 работников (8,9 %) получили тяжелые повреждения здоровья.

В результате падения, спотыкания, скольжения на поверхности одного уровня травмировано 14 работников (9,6 %), из них один человек (0,7 %) получил тяжелую травму.

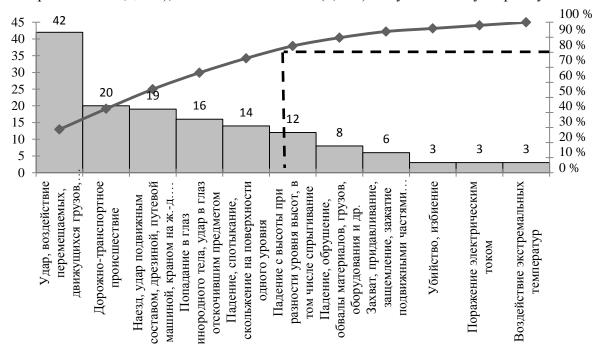


Рисунок 2 – Диаграмма Парето распределения работников хозяйства пути по фактору «вид происшествия»

12 (8,2 %) работников получили травмы в результате падения с высоты при разности уровня высот, а также при спрыгивании, в том числе четыре человека (2,7 %) получили тяжелые повреждения здоровья и четыре человека (2,7 %) травмированы смертельно.

Проведенные научные исследования за период с 2004 по 2015 г. в рамках хозяйства пути Куйбышевской железной дороги показывают, что между видом происшествий и соответствующим количеством работников, пострадавших от несчастных случаев на производстве, с учетом степени тяжести повреждения их здоровья установлена статистическая взаимосвязь. Результаты корреляционного анализа свидетельствуют о заметном влиянии того или иного вида происшествий на уровень риска наступления нечастного случая и тяжести его последствий, диаграмма Парето определяет наиболее повторяющиеся виды происшествий.

В фокусе идеологии охраны труда и минимизации травмирования работников руководителям структурных подразделений предприятий хозяйства пути Куйбышевской железной дороги представляется превентивно использовать полученные данные при организации работ и контроле за производством работ при безусловном соблюдении работниками соответствующих им требований безопасности.

Результаты проведенных исследований также определяют свое практическое применение в части разработки и пересмотра технологических процессов, правил и инструкций по охране труда, а также при формировании и (или) корректировке превентивных мероприятий с приоритетом безопасности труда на такие виды происшествий, при которых пострадало наибольшее количество работников.

Применение предложенных профилактических мероприятий априори способствует снижению уровня риска наступления несчастного случая на производстве, а следовательно, повышает безопасность труда работников, занятых текущим содержанием и ремонтом пути.

#### Список литературы

1. Дементьева, Ю. В. Апостериорно-агрегированный анализ абсолютных и относительных показателей производственного травматизма [Текст] / Ю. В. Дементьева // Инновационная наука / Мордовский гос. ун-т им. Н. П. Огарева. – Уфа. – 2016. – № 2. – С. 64 – 67.

- 2. Терешин, В. С. Охрана труда в путевом хозяйстве [Текст] / В. С. Терешин, В. Б. Каменский. М.: Транспорт, 1999. 320 с.
- 3. Анализ состояния условий и охраны труда Куйбышевской железной дороги за период с 2004 по 2015 г. [Текст] / Кбшжд. Самара, 2016. 52 с.
- 4. Чернов Е. Д. Математико-статистические методы исследования причин производственного травматизма [Текст] / Е. Д. Чернов // Новосибирский ин-т инж. ж.-д. трансп. Новосибирск, 1979.-40 с.
- 5. Спирин, А. А. Общая теория статистики. Статистическая методология в изучении коммерческой деятельности [Текст] / А. А. Спирин, О. Э. Башина. М.: Финансы и статистика, 1997. 296 с.
- 6. СТО РЖД 1.05.515.2-2009. Методы и инструменты улучшений. Анализ Парето / ОАО «РЖД». М., 2009. 11 с.

#### References

- 1. Dementyeva Y. V. *Aposteriorno-agregirovannyi analiz absoliutnykh i otnositel'-nykh poka-zatelei proizvodstvennogo travmatizma* (The posteriori aggregated analysis of absolute and relative indicators of industrial injuries). Ufa: Innovative science, 2016, no. 2. pp. 64 67.
- 2. Tereshin V. V., Kamensky V. B. *Okhrana truda v putevom khoziaistve* (Safety of track facilities). Moscow: Transport, 1999, 320 p.
- 3. Analiz sostoianiia uslovii i okhrany truda Kuibyshevskoi zheleznoi dorogi za period s 2004 po 2015 g (Condition and safety analysis of the Kuibyshev Railway between 2004 and 2015). Kbshzhd, 2016, 52 p.
- 4. Chernov D. *Matematiko statisticheskie metody issledovaniia prichin proizvod-stvennogo travmatizma* (Mathematical statistical research methods of industrial injuries causes). Novosibirsk: NIIZHT, 1979, 40 p.
- 5. Spirin A. A., Bashina O. E. Obshchaia teoriia statistiki. Statisticheskaia metodologiia v izuchenii kommercheskoi deiatel'nosti (General Theory of Statistics. Statistical methodology in the study of business). Moscow: Finance and Statistics, 1997, 296 p.
- 6. Standard № STO RZhD 1.05.515.2 2009 «Improvement methods and tools. Pareto Analysis» (Standard of JSC «Russian Railways» № STO RZhD 1.05.515.2-2009. Methods and tools to improve-tions. Pareto Analysis). Moscow: JSC «Russian Railways», 2009, 11 p.

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

#### Дементьева Юлия Васильевна

Самарский государственный университет путей сообщения (СамГУПС).

Свободы ул., д. 2 В, г. Самара, 443066, Российская Федерация.

Руководитель отдела охраны труда, старший преподаватель, аспирант кафедры «Безопасность жизнедеятельности и экология», СамГУПС.

Тел.: +7 (846) 973-60-28.

E-mail: yulia \_dementyeva @bk.ru

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Дементьева, Ю. В. Корреляционный анализ влияния фактора «вид происшествия» на статистические показатели производственного травматизма (на примере хозяйства пути Куйбышевской железной дороги) [Текст] / Ю. В. Дементьева // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. — Омск. — 2016. —  $\mathbb{N}$  2 (26). — С. 127 — 133.

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

#### Dementveva Yulia Vasilvevna

Samara State Transport University (SSTU).

2V, Svoboda st., Samara, 443066, the Russion Federation.

Head department occupational safety, senior teacher, post graduate student, chair «Safety Working Environment in Railway Transport», SSTU.

Phone: +7 (846) 973-60-28.

E-mail: yulia \_dementyeva @bk.ru

#### **BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION**

Dementyeva Y. V. Correlation analysis of «accident type» factor on industrial injuries statistic index. Journal of Transsib Railway Studies, 2016, vol. 26, no. 2, pp. 127 – 133. (In Russian).

УДК 656.2

#### В. Т. Черемисин, А. А. Комяков, В. И. Иванченко

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

## О КОМПЛЕКСНОМ ПОДХОДЕ К АНАЛИЗУ И КОНТРОЛЮ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ СТРУКТУРНЫХ ПОДРАЗДЕЛЕНИЙ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА

Аннотация. В статье рассматриваются некоторые структурные подразделения железнодорожного транспорта, расположенные в Западно-Сибирском регионе. Цель работы — выявить структурные подразделения с наиболее низкими показателями энергетической эффективности. Для этого рассчитывается такой показатель, как удельная энергоэффективность за период времени, равный одному календарному году, на основе данных о годовом расходе электрической энергии и годовом объеме работы предприятия. В статье излагаются также основные положения концепции анализа и контроля показателей энергетической эффективности стационарных объектов железнодорожного транспорта, которая позволит выявлять неэффективные структурные подразделения с применением управляющих воздействий по снижению нерационального расхода энергетических ресурсов. Расчет удельной энергоэффективности осуществляется на одном из этапов данной концепции. В результате получены диаграммы удельной энергоэффективности структурных подразделений Западно-Сибирского региона различной хозяйственной принадлежности, позволяющие наглядно произвести сравнение этого показателя. По итогам сравнения установлено, что 10 из 65 рассмотренных структурных подразделений имеют низкий показатель удельной энергоэффективности. Это говорит о необходимости тщательного изучения причин низких значений показателя энергетической эффективности в этих структурных подразделениях и предложения мер по устранению такой ситуации. Порядок осуществления этих мероприятий предложен на третьем и четвертом этапах указанной концепции. Установление и последующее применение единого подхода к анализу и контролю показателей энергетической эффективности для всех структурных подразделений позволит повысить энергетическую эффективность территориальных филиалов ОАО «РЖД» и всего холдинга в целом.

**Ключевые слова:** железнодорожный транспорт, структурное подразделение, удельная энергоэффективность, анализ, концепция.

### Vasiliy T. Cheremisin, Alexandr A. Komyakov, Vladimir I. Ivanchenko

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

## ABOUT THE INTEGRATED APPROACH TO THE ANALYSIS AND CONTROL THE ENERGY EFFICIENCY OF THE STRUCTURAL SUBDIVISIONS OF RAILWAY TRANSPORT

Abstract. In the article the questions of increase of efficiency of structural subdivisions, members of the directorates of the West Siberian railway - branch of JSC "Russian Railways", such as infrastructure Directorate, Directorate railcar rolling stock and the Directorate of buildings and structures. The aim of this work is to identify structural units with the lowest energy efficiency indicators. This requires estimation of an indicator such as relative energy efficiency over a period of time equal to one calendar year, based on data of annual consumption of electric energy and annual volume of enterprise work. The article also outlines the main provisions of the concept analysis and monitoring the energy efficiency indicators of stationary objects of the railway transport, which will identify inefficient structural subdivisions with the use of control actions to reduce irrational consumption of energy resources. Calculation of the relative energy efficiency is one of the stages of this concept. The result is a received charts of the relative energy efficiency of structural subdivisions of the West Siberian railway which allows to make a comparison of this indicator. According to the results of comparison found that 10 of the 65 structural units have a low indicator of relative energy efficiency. This suggests the need for careful study the reasons of the low values of energy efficiency in these structural subdivisions and proposals the measures to eliminate this situation. The method and sequence of these activities proposes into the third and fourth stages of the concept. The establishment and subsequent application of a unified approach to the analysis and monitoring of energy efficiency indicators for all departments will increase the energy efficiency of the territorial branches of JSC "Russian Railways" and the holding company as whole.

Keywords: railway transport, structural subdivision, relative energy efficiency, analysis, the concept.

Затраты ОАО «РЖД» на приобретение топливно-энергетических ресурсов (ТЭР) в 2015 г. составили около 227 млрд р., из них в стационарной энергетике — 35,4 млрд р. (16%), что примерно на 3% больше, чем в 2014 г. Затраты на ТЭР составляют около 20% эксплуатационных расходов компании. Если в тяге поездов потенциал энергосбережения в известной мере реализован, то в стационарной энергетике до сих пор имеются значительные резервы. По экспертным оценкам, на отдельных стационарных объектах доля нерационального потребления ТЭР может превышать 30%.

В связи с этим снижение топливно-энергетической составляющей в себестоимости перевозочного процесса является одним из приоритетных направлений развития железнодорожного транспорта Российской Федерации. Решение указанной задачи возможно в случае обеспечения мониторинга фактического удельного расхода топливно-энергетических ресурсов на выпуск конечной продукции структурных подразделений ОАО «Российские железные дороги», его дочерних и зависимых обществ [1].

Для характеристики предприятия принято использовать такой показатель, как энергетическая эффективность (энергоэффективность) производственной деятельности. Под энергетической эффективностью производственной деятельности понимается характеристика, отражающая отношение полезного эффекта от использования энергетических ресурсов (работы и услуги РЖД в целом или каждого из его структурных подразделений) к затратам энергетических ресурсов, произведенным в целях получения продукции при производстве работ и оказании услуг и рассчитанным в натуральных или стоимостных показателях [2].

В настоящее время на сети железных дорог введены в действие «Типовое положение о системе управления энергоэффективностью производственных процессов (энергоруководство) структурного подразделения» и «Типовые методики энергетического анализа производственно-хозяйственной деятельности» для различных структурных подразделений. Указанные документы разработаны на основе международного стандарта ISO 50001:2011 «Системы энергетического менеджмента — Требования и руководство по использованию» и СТО РЖД 08.017-2012 «Система управления энергоэффективностью производственных процессов. Основные положения».

В соответствии с названными документами структурные подразделения ОАО «РЖД» должны осуществлять регулярный мониторинг потребления всех видов ТЭР с учетом влияния объемов производственной деятельности, характеристик производственного процесса, состава и режимов работы энергопотребляющего оборудования, численности персонала и иных факторов, в том числе по цехам и производственным участкам.

В то же время указанные нормативные документы имеют некоторые недостатки:

не предусмотрена возможность сравнения показателей энергоэффективности различных структурных подразделений в рамках служб и дирекций и, следовательно, выявления неэффективных структурных подразделений с точки зрения использования ТЭР;

представленные показатели энергоэффективности не во всех случаях отражают специфику производственной деятельности структурных подразделений, влияние состава, режимов работы энергопотребляющего оборудования и иных факторов на расход ТЭР;

не описаны подходы к определению причин нерационального использования ТЭР;

отсутствует порядок разработки и внедрения управляющих воздействий для повышения энергоэффективности структурных подразделений.

Предлагаемая методика (концепция) позволит реализовать комплексный подход к контролю и анализу показателей энергоэффективности стационарных объектов железнодорожного транспорта с выявлением неэффективных структурных подразделений и применением управляющих воздействий с целью снижения нерационального расхода ТЭР [3-8].

**На первом этапе** устанавливается единый укрупненный измеритель работы для структурных подразделений. Например, для эксплуатационных вагонных депо таким показателем является количество вагонов, прошедших техническое обслуживание и текущий отцепочный ремонт, для мотор-вагонных депо — количество отремонтированных секций и т. д. После это-

го осуществляется сбор исходных данных о расходе ТЭР и об объеме выполненной работы в течение определенного периода (не менее года) при помощи установленных форм (таблиц) отчетности.

**На втором этапе** осуществляются обработка данных, вычисление и анализ показателей, характеризующих энергетическую эффективность производственной деятельности предприятия.

В качестве показателя энергетической эффективности производственной деятельности может быть принята удельная энергоэффективность, определяемая отношением объема работ и услуг к единице израсходованных ТЭР в условном исчислении, определяемая за расчетный год по формуле

$$\Im = \frac{1}{E} \,,$$
(1)

где Е – энергоемкость производственной деятельности за расчетный год,

$$E = \frac{W}{A},\tag{2}$$

где W — общий объем потребления ТЭР всех видов в условном исчислении за расчетный год в тоннах условного топлива (т у.т.);

A — общий объем работ и услуг по основным и прочим видам деятельности за расчетный год в приведенных единицах (прив. ед.).

Как видно из соотношений (1) и (2), удельная энергоэффективность и энергоемкость (называемая также удельным расходом ТЭР) являются взаимно обратными величинами.

Целесообразным представляется выполнить анализ годового объема работы и связанного с ним расхода электрической энергии (одного из основных видов ТЭР), который был достигнут нетяговыми железнодорожными потребителями (линейными предприятиями).

Для этого достаточно рассчитать итоговые годовые значения удельной энергоэффективности на основе имеющихся данных для следующих предприятий (по итогам 2015 г.): 6 эксплуатационных вагонных депо (ВЧДЭ), 25 дистанций пути (ПЧ), 13 дистанций электроснабжения (ЭЧ), 13 дистанций сигнализации, централизации и блокировки (ШЧ), 4 моторвагонных депо (ТЧ), 4 дистанции гражданских сооружений (НГЧ).

Итоговое расчетное соотношение для удельной энергоэффективности Э с учетом формул (1) и (2) имеет вид:

$$\Im = \frac{A}{W^{\Im}},\tag{3}$$

где  $W^{9}$  — объем потребления электрической энергии за расчетный период, тыс. кВт·ч;

A- объем работы за расчетный период в единицах измерения, зависящих от предприятия:

для ВЧДЭ это сотни тысяч приведенных вагонов (100 тыс. пр. ваг.); для ПЧ — приведенные километры пути (пр. км пути); для ЭЧ и ШЧ — сотни технических единиц (100 т. е.); для мотор-вагонных депо — приведенные единицы ремонта (прив. ед.);

для  $H\Gamma Y$  – площадь эксплуатируемых зданий ( $M^2$ ).

Результаты расчета на основе формулы (3) представлены на рисунках 1-6. При этом столбцы гистограмм с темной заливкой иллюстрируют удельную энергоэффективность (уд. эн. эфф.), столбцы со светлой заливкой – объем работы предприятия. Точные расчетные значения этих показателей отражены над столбцами более крупным и более мелким шрифтом соответственно.

Из представленных рисунков видно, что удельная энергоэффективность по предприятиям с одинаковым видом деятельности может различаться в несколько раз. Так, если взять

эксплуатационные вагонные депо, то удельная энергоэффективность ВЧДЭ F более чем в четыре раза превышает этот показатель для ВЧДЭ A. Аналогичная ситуация наблюдается для остальных принятых к рассмотрению структурных подразделений: отношение максимальной удельной энергоэффективности к минимальной по дистанциям гражданских сооружений составляет 6,4, по мотор-вагонным депо -1,9, по дистанциям сигнализации, централизации и блокировки -4,5, по дистанциям электроснабжения -3, по дистанциям пути -14,2.

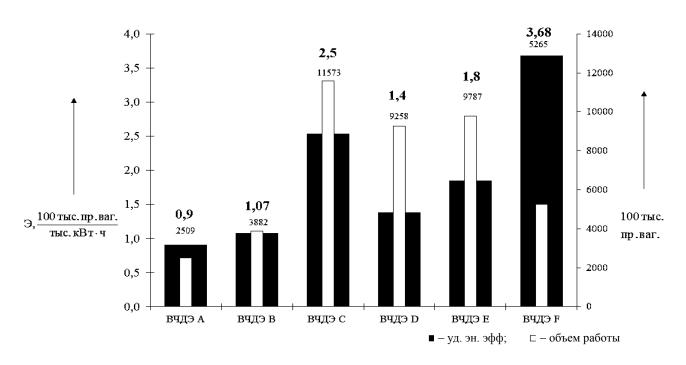


Рисунок 1 – Годовая удельная энергоэффективность и объем работы эксплуатационных вагонных депо

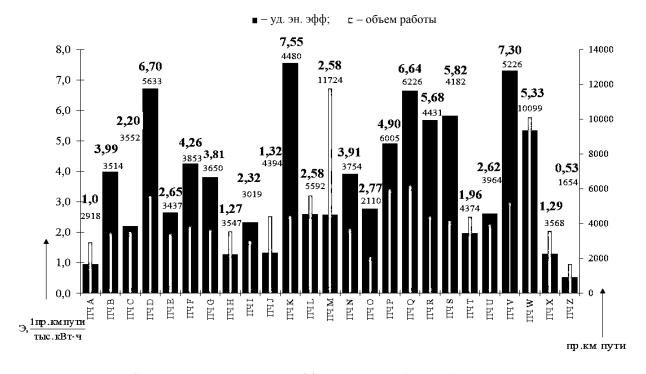


Рисунок 2 – Годовая удельная энергоэффективность и объем работы дистанций пути

Безусловно, такая ситуация частично может быть объяснена разной степенью энерговооруженности предприятий железнодорожного транспорта, но, тем не менее, очевидна необходимость выявления причин сильно отличающихся значений удельной энергоэффективности внутри групп предприятий с одинаковым видом деятельности, при этом данная работа должна выполняться на регулярной основе.

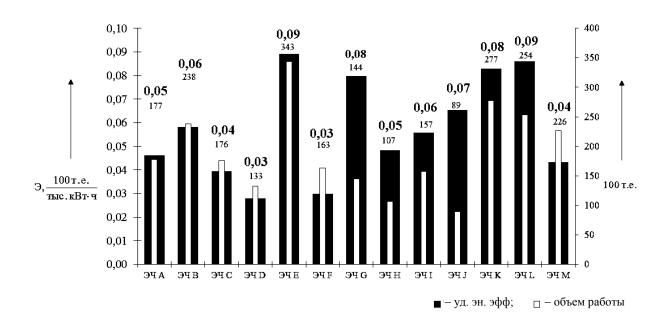


Рисунок 3 – Годовая удельная энергоэффективность и объем работы дистанций электроснабжения

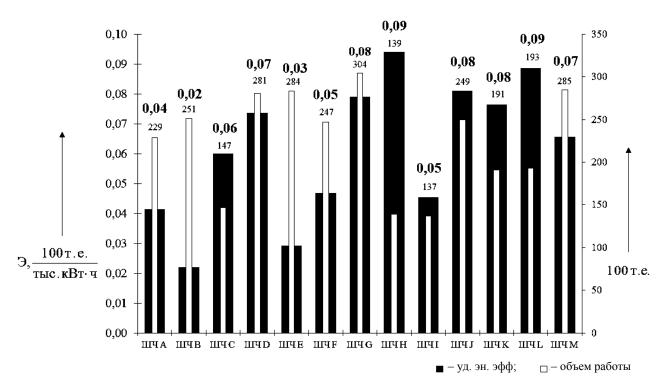


Рисунок 4 — Годовая удельная энергоэффективность и объем работы дистанций сигнализации, централизации и блокировки

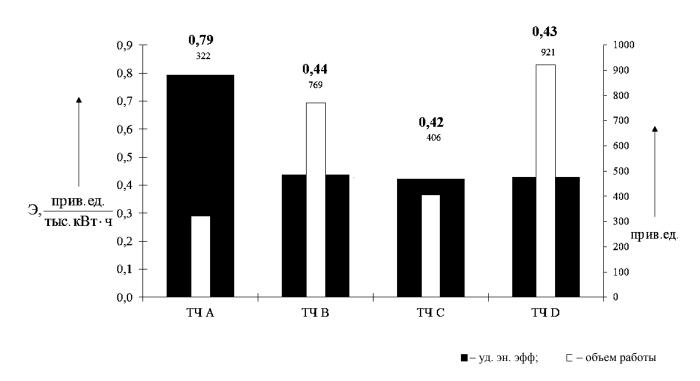


Рисунок 5 – Годовая удельная энергоэффективность и объем работы мотор-вагонных депо

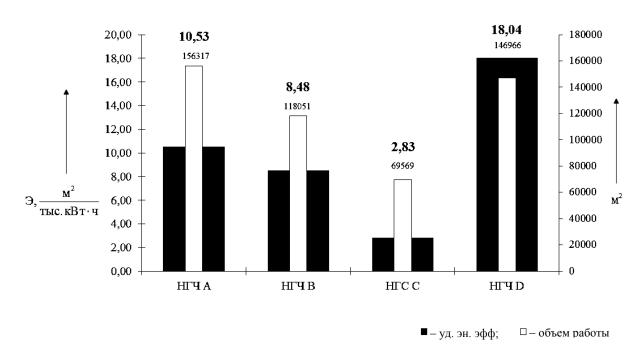


Рисунок 6 – Годовая удельная энергоэффективность и объем работы дистанций гражданских сооружений

**На третьем этапе** осуществляется выявление предприятий с наиболее низкими показателями энергетической эффективности. Исходя из указанных выше результатов к таковым можно отнести ВЧДЭ А, ВЧДЭ В, ПЧ А, ПЧ Z, ЭЧ D, ЭЧ F, ЭЧ М, ШЧ В, ШЧ Е, ТЧ С, НГЧ С. Затем осуществляется тщательное обследование этих предприятий с целью установления причин нерационального расхода ТЭР, которое предлагается осуществлять в следующем порядке [9, 10].

- 1. В составе структурного подразделения выделяются цеха, отделения, производственные участки и другие объекты. При этом определяется измеритель производственной деятельности для каждого из выделенных объектов. Например, в составе ВЧДЭ выделяются пункты технического обслуживания, пункты текущего отцепочного ремонта, административные здания и т.д.
- 2. Осуществляется сбор данных о расходе энергоресурсов и объемах производственной деятельности по выделенным объектам, после чего рассчитываются показатели их энергоэффективности.
- 3. Осуществляется анализ показателей энергоэффективности и выявление наименее эффективных объектов в составе рассматриваемого предприятия.

Такой подход направлен на выявление «узких мест» в процессе энергопотребления и позволяет локализовать источники нерационального расхода ТЭР.

**На четвертом этапе** осуществляется разработка программы мероприятий (управляющих воздействий), направленных на повышение энергетической эффективности, т.е. на снижение расхода ТЭР.

Предлагаемая концепция соответствует требованиям международного стандарта ISO 50001:2011 «Системы энергетического менеджмента – Требования и руководство по использованию» и позволяет выявлять неэффективные структурные по показателям использования ТЭР за счет мониторинга энергоэффективности их производственной деятельности с дальнейшим применением управляющих воздействий для снижения нерационального расхода ТЭР.

#### Список литературы

- 1. Каштанов, А. Л. Актуализация энергетической стратегии холдинга «Российские железные дороги» [Текст] / А. Л. Каштанов, А. А. Комяков, М. М. Никифоров // Инновационные проекты и технологии в образовании, промышленности и на транспорте: Материалы науч. конф. / Омский гос. ун-т путей сообщения. Омск, 2015. С. 141 147.
- 2. Энергосбережение на железнодорожном транспорте: Учебник [Текст] / Под ред. В. А. Гапановича. М.: МИСиС, 2012. 620 с.
- 3. Разработка подсистемы анализа и систематизации составляющих расхода электроэнергии на эксплуатационные нужды в общей системе мониторинга потребления и потерь электроэнергии в границах железной дороги [Текст] / В. Т. Черемисин, В. Н. Зажирко и др. // Исследование процессов взаимодействия объектов железнодорожного транспорта с окружающей средой / Омский гос. ун-т путей сообщения. — Омск, 2003. — С. 174 — 186.
- 4. Никифоров, М. М. О некоторых результатах и перспективных направлениях научных исследований в области повышения энергетической эффективности перевозочного процесса [Текст] / М. М. Никифоров, С. Ю. Ушаков, А. С. Вильгельм // Инновационные проекты и технологии в образовании, промышленности и на транспорте: Материалы науч. конф. / Омский гос. ун-т путей сообщения. Омск, 2015. С. 28 36.
- 5. Никифоров, М. М. Повышение эффективности контроля расхода электроэнергии нетяговых потребителей с использованием данных АСКУЭ ЖУ [Текст] / М. М. Никифоров, И. Ю. Норкин // Энергосберегающие технологии, контроль и управление для предприятий железнодорожного транспорта: Межвуз. темат. сб. науч. тр. / Омский гос. ун-т путей сообщения. Омск, 2011. С. 59 64.
- 6. Никифоров, М. М. Создание системы контроля и оперативного управления потреблением топливно-энергетических ресурсов в ОАО «Российские железные дороги» [Текст] / М. М. Никифоров // Ресурсосберегающие технологии на Западно-Сибирской железной дороге: Материалы науч.-практ. конф. / Омский гос. ун-т путей сообщения. Омск, 2010. С. 105 111.
- 7. Никифоров, М. М. Перспективные направления повышения эффективности использования энергоресурсов на железнодорожном транспорте [Текст] / М. М. Никифоров, А. Л. Каштанов, С. Ю. Ушаков // Инновационные проекты и новые технологии на железнодорожном транспорте: Материалы науч.-практ. конф. / Омский гос. ун-т путей сообщения. Омск, 2009. С. 40 53.

- 8. Никифоров, М. М. Организация контроля потерь электрической энергии в железнодорожных узлах [Текст] / М. М. Никифоров // Транссиб-99: Материалы региональной науч. практ. конф. / Сибирский гос. ун-т путей сообщения. Новосибирск, 1999. С. 128 133.
- 9. Незевак, В. Л. Потенциал энергосбережения в сфере эксплуатации мотор-вагонного подвижного состава постоянного тока [Текст] / В. Л. Незевак, М. М. Никифоров // Эксплуатационная надежность локомотивного парка и повышение эффективности тяги поездов: Материалы всерос. науч.-техн. конф. с междунар. участием / Омский гос. ун-т путей сообщения. Омск, 2012. С. 251 256.
- 10. Каштанов, А. Л. Особенности проведения энергетических обследований дистанций электроснабжения структурных подразделений железных дорог филиалов ОАО «Российские железные дороги» [Текст] / А. Л. Каштанов, А. А. Комяков, М. М. Никифоров // Омский научный вестник. Омск. 2010. № 3 (93). С. 148 151.

#### References

- 1. Kashtanov A. L., Komyakov A. A., Nikiforov M. M. The actualization the energy strategy of the holding company "Russian Railways" [Aktualizacija jenergeticheskoj strategii holdinga «Rossijskie zheleznye dorogi»]. Innovacionnye proekty i tehnologii v obrazovanii, promyshlennosti i na transporte: Materialy nauchnoj konferencii *Innovative projects and technologies in education, industry and transport: proceedings of the conference*, 2015. pp. 141 147.
- 2. Gapanovich V. A, Avilov V. D., Arzhannikov B. A. Jenergosberezhenie na zheleznodorozhnom transporte: uchebnik dlja vuzov *Energy saving in railway transport: the textbook for high schools*, 2012. 620 p.
- 3. Cheremisin V. T., Zazhirko V. N., Nikiforov M. M., Pashkov D. V. Development of a subsystem of analysis and systematization the components of the energy consumption for operating needs in the general system of monitoring of consumption and losses of electricity within the borders of the railway [Razrabotka podsistemy analiza i sistematizacii sostavljajushhih rashoda jelektrojenergii na jekspluatacionnye nuzhdy v obshhej sisteme monitoringa potreblenija i poter' jelektrojenergii v granicah zheleznoj dorogi]. Issledovanie processov vzaimodejstvija ob#ektov zhelez-nodorozhnogo transporta s okruzhajushhej sredoj *Research the processes of interaction the railway transport with the environment*, 2003. pp. 174 186.
- 4. Nikiforov M. M., Ushakov S. Ju., Vil'gel'm A. S. About some of the results and promising areas of research in the field of improving the energy efficiency of the transportation process [O nekotoryh rezul'tatah i perspektivnyh napravlenijah nauchnyh issledovanij v oblasti povyshenija jenergeticheskoj jeffektivnosti perevozochnogo processa]. Innovacionnye proekty i tehnologii v obrazovanii, promyshlennosti i na transporte: Materialy nauchnoj konferencii *Innovative projects and technologies in education, industry and transport: proceedings of the conference*, 2015. pp. 28 36.
- 5. Nikiforov M. M., Norkin I. Ju. Improving the efficiency of controlling the flow of electricity non-tractive consumers using data from ASKUE ZHU [Povyshenie jeffektivnosti kontrolja rashoda jelektrojenergii netjagovyh potrebitelej s ispol'zovaniem dannyh ASKUJe ZhU]. Jenergosberegajushhie tehnologii, kontrol' i upravlenie dlja predprijatij zheleznodorozhnogo transporta: Mezhvuzovskij tematicheskij sbornik nauchnyh trudov *Energy-saving technologies, control and management for the enterprises of railway transport: interuniversity thematic collection of scientific papers*, 2011. pp. 59 64.
- 6. Nikiforov M. M. The establishment the system of control and operational management the consumption of fuel and energy resources at JSC "Russian Railways" [Sozdanie sistemy kontrolja i operativnogo upravlenija potreb-leniem toplivno-jenergeticheskih resursov v OAO «Rossijskie zheleznye dorogi»]. Resursosberegajushhie tehnologii na Zapadno-Sibirskoj zheleznoj doroge: Materialy nauchno-prakticheskoj konferencii *Resource-saving technologies in the West-Siberian railway: Materials of scientific-practical conference*, 2010. pp. 105 111.
- 7. Nikiforov M. M., Kashtanov A. L., Ushakov S. Ju. Perspective directions of increase the efficiency of energy use in railway transport [Perspektivnye napravlenija povyshenija jeffektivnosti ispol'-zovanija jenergoresursov na zheleznodorozhnom transporte]. Innovacionnye proekty i novye tehnologii na zheleznodorozhnom transporte: Materialy nauchno-prakticheskoj konferencii *Innovative projects and new technologies in railway transport: Materials of scientific-practical conference*, 2009. pp. 40-53.

- 8. Nikiforov M.M. Organization the control of electric energy losses at the railway junctions [Organizacija kontrolja poter' jelektricheskoj jenergii v zhelezno-dorozhnyh uzlah]. Transsib-99: Materialy regional'noj nauchno-prakticheskoj konferencii *The TRANS-Siberian railway-99: proceedings of the regional scientific-practical conference*, 1999. pp. 128 133.
- 9. Nezevak V.L., Nikiforov M.M. Energy saving potential in the exploitation of railcar rolling stock DC [Potencial jenergosberezhenija v sfere jekspluatacii motorvagonnogo podvizhnogo sostava postojannogo toka]. Jekspluatacionnaja nadezhnost' lokomotivnogo parka i povyshenie jeffektivnosti tjagi poezdov: Materialy Vserossijskoj nauchno-tehnicheskoj konferencii s mezhdunarodnym uchastiem *The operational reliability of the locomotive fleet and improving the efficiency of traction the trains: all-Russian scientific-technical conference with international participation*, 2012. C. 251 256.
- 10. Kashtanov A.L., Komyakov A.A., Nikiforov M.M. Features of carrying out the energetic surveys of power supply distances which is a structural subdivisions of Railways-branches of JSC «Russian Railways» [Osobennosti provedenija jenergeticheskih obsledovanij distancij jelektrosnabzhenija-strukturnyh podrazdelenij zheleznyh dorog-filialov OAO «Rossijskie zheleznye dorogi»]. Omskij nauchnyj vestnik *Omsk scientific bulletin*, 2010. no. 3 (93), pp. 148 151.

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

#### Черемисин Василий Титович

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

Доктор технических наук, профессор, директор НИИ энергосбережения на железнодорожном транспорте, заведующий кафедрой «Подвижной состав электрических железных дорог», ОмГУПС.

Тел.: +7 (3812) 31-34-19. E-mail: cheremisinvt@gmail.com

#### Комяков Александр Анатольевич

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Теоретическая электротехника», ОмГУПС.

Тел.: +7 (3812) 44-39-23. E-mail: tskom@mail.ru

#### Иванченко Владимир Иванович

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

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

Тел.: +7 (3812) 44-39-02. E-mail: ivanchenko-v.i@yandex.ru

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Черемисин, В. Т. О комплексном подходе к анализу и контролю энергетической эффективности структурных подразделений железнодорожного транспорта [Текст] / В. Т. Черемисин, А. А. Комяков, В. И. Иванченко // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. — Омск. — 2016. — № 2 (26). — С. 134 — 142.

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

#### **Cheremisin Vasiliv Titovich**

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx st., Omsk, 644046, the Russion Federation. Doctor of Technical Sciences, Professor, director of energy research Institute of railway transport, head of the department «Rolling stock electric railways», OSTU.

Phone: (3812) 31-34-19. E-mail: cheremisinvt@gmail.com

#### Komyakov Alexandr Anatolievich

Omsk State Transport University (OSTU). 35, Marx st., Omsk, 644046, the Russion Federation. Ph. D., the senior lecturer of the department «Theoretical the electrical engineer», OSTU.

Phone: +7 (3812) 44-39-23. E-mail: tskom@mail.ru

#### Ivanchenko Vladimir Ivanovich.

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx st., Omsk, 644046, the Russion Federation. Post-graduate student of the department «Rolling stock electric railways», OSTU.

Phone: +7 (3812) 44-39-02. E-mail: ivanchenko-v.i@yandex.ru

#### **BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION**

Cheremisin V. T., Komyakov A. A., Ivanchenko V. I. About the integrated approach to the analysis and control the energy efficiency of the structural subdivisions of railway transport. Journal of Transsib Railway Studies, 2016, vol. 26, no. 2, pp. 134 – 142. (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.

#### Правила представления рукописей научных статей в научно-технический журнал «Известия Транссиба»

В редакцию журнала представляются:

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; рукопись статьи включает: УДК, ФИО авторов, аффилиацию 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: фамилию, имя, отчество, ученую степень и звание, место работы с указанием почтового адреса, должность, контактные телефоны, е-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 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, 12 пт), аффилиацию авторов на русском языке (по центру, 10 пт), название статви 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, 10 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 A4 (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, подрисуночные 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. Ил-

люстрации, 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 очеред-

В случае возвращения статьи автору для устранения замечаний или для ее сокращения датой представления 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 публи-

Редакционный совет оставляет за собой право литературного редактирования статьи без согласования с авторами.

#### Научное издание

#### Научно-технический журнал «Известия Транссиба»

#### № 2 (26) 2016

Научно-технический журнал «Известия Транссиба» зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзором) 3 июня 2009 г., свидетельства о регистрации СМИ ПИ № ФС77-36469 от 3 июня 2009 г. и ПИ № ФС77-49218 от 30 марта 2012 г.

Hомер ISSN – 2220-4245.

Подписной индекс в общероссийском каталоге HTИ 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.

Выпуски журнала имеют свободную цену распространения.

Редактор – Майорова Н. А. Компьютерная верстка – Захаренко Е. И.

Адрес редакции (издательства): 644046, г. Омск, пр. Маркса, 35; тел.: (3812) 31-05-54; e-mail: izvestia transsiba@mail.ru

Подписано в печать 28.06.2016. Тираж 500 экз.

Отпечатано в ГП «Омская областная типография»: 644070, г. Омск, ул. Декабристов, 37. Дата выпуска: 30.06.2016.

