

научно-технический

ISSN 2220-4245
журнал

ИЗВЕСТИЯ

№ 3(27)

2016

Транссиба



РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ ЖУРНАЛА

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

EDITORIAL BOARD

1. Ovcharenko Sergey Mikhailovich – chief editor, the rector of OSTU, D. Sc., associate professor (Omsk, Russia).
2. 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 Yuriy Vasilyevich – professor of the department «Electrical equipment and automation» of SSUWT, D. Sc., professor (Novosibirsk, Russia).
8. Kargapol'tcev Sergey Konstantinovich – vice-rector for research of ISTU, D. Sc., professor (Irkutsk, Russia).
9. Kosarev Alexander Borisovich – deputy of general director of JSC «VNIIZhT» (Railway Research Institute), D. Sc., professor (Moscow, Russia).
10. Liu Jiankun – Ph. D., professor of Beijing Jiaotong University, School of Civil Engineering (Beijing, China).
11. Sidorov Oleg Alexeevich – head of the department «Power supply of rail transport» of OSTU, D. Sc., professor (Omsk, Russia).
12. Solonenko Vladimir Gelyevich – professor of the department «Wagons» of KazATC, D. Sc., professor (Almaty, Kazakhstan).
13. Fayzibaev Sherzod Sabirovich – professor of the department «Wagons and wagon economy» of TashIRE, D. Sc., professor (Tashkent, Uzbekistan).
14. Kharlamov Viktor Vasilyevich – head of the department «Electrical machines and common electrotechnic» of OSTU, D. Sc., professor (Omsk, Russia).

Захаренко Елена Игоревна – ответственный секретарь (Омск).

СОДЕРЖАНИЕ

Подвижной состав железных дорог

- Абляимов О. С. Анализ эксплуатации тепловозов 3ТЭ10М на холмисто-горном участке железной дороги 2
- Алтангэрэл Энх-Амгалан Обоснование электрификации Улан-Баторской железной дороги с учетом мирового опыта 9
- Антипин Д. Я., Бондаренко Д. А., Измеров О. В., Маслов М. А. Классификация динамических явлений в тяговом приводе локомотива 17
- Гозбенко В. Е., Карлина А. И. Математическая модель вагона с двумя степенями свободы, находящегося под действием периодической вынуждающей силы 23
- Жебанов А. В. Пути снижения теплопотерь вязких нефтегрузов при транспортировке железнодорожным транспортом 31
- Ли В. Н., Шурова Н. К. Особенности выбора компенсирующих устройств в тяговой сети по критериям оптимальности 38
- Нехаев В. А. Взаимодействие вынужденных и параметрических возбужденных колебаний подвижного состава при движении по неравноупругому по протяженности пути с неровностями на поверхности катания рельсов 44
- Харламов В. В., Попов Д. И., Литвинов А. В. Универсальный энергоэффективный стенд для нагрузочных испытаний тяговых асинхронных двигателей и двигателей постоянного тока 58
- Хоменко А. П., Черняк С. С., Бройдо В. Л. Разработка технологии электропечной выплавки легированной ванадием рельсовой стали и качество рельсов 66
- Шкодун П. К., Шестаков И. В., Стретенцев А. И. Применение метода волнового отклика для выявления повреждений межвитковой изоляции якорных обмоток вспомогательных машин тягового подвижного состава железных дорог 76

Транспортная энергетика

- Кандаев В. А., Авдеева К. В., Медведева А. А., Уткина А. В. Определение оптимального значения добавочного сопротивления дренажной установки тяговой подстанции постоянного тока 83
- Кузнецов А. А., Кузьменко А. Ю., Зверев А. Г. Моделирование и экспериментальные исследования распределения электростатического поля на гирляндах подвесных фарфоровых изоляторов 91

Информационные технологии, автоматика, связь, телекоммуникации

- Петров В. В., Ананьева Н. Г., Окишев А. С. Композиция математических методов программирования для оптимизации систем видеорегистрации на территориально распределенных объектах железнодорожного транспорта 99

Путь и искусственные сооружения

- Величко Д. В., Толстикова Н. А. Анализ загрязненности щебеночного балласта 110
- Ланис А. Л. Способы усиления земляного полотна инъектированием 117

Управление перевозочными процессами и безопасность движения поездов

- Соколов М. М. Совершенствование технологии обслуживания станционных рельсовых цепей 124

Организация производства на транспорте

- Пустовой И. В. Инкапсуляция статистических методов управления в информационную систему сервисного обслуживания и ремонта локомотивов 132

Научно-технический журнал «Известия Транссиба»

Учредитель: федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования

«Омский государственный университет путей сообщения»

(ОмГУПС (ОмИИТ))

644046, г. Омск, пр. Маркса, 35

УДК 629.42-629.4.054

О. С. Абляимов

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

АНАЛИЗ ЭКСПЛУАТАЦИИ ТЕПЛОВОЗОВ 3ТЭ10М НА ХОЛМИСТО-ГОРНОМ УЧАСТКЕ ЖЕЛЕЗНОЙ ДОРОГИ

Аннотация. Представлены результаты исследований по обоснованию параметров перевозочной работы тепловозов 3ТЭ10М на холмисто-горном участке железной дороги при движении грузовых поездов с остановками и без остановок на промежуточных станциях и отдельных пунктах.

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

Oleg S. Ablyalimov

Toshkent Temir Yo'l Muhandislari Instituti (ToshTYMI), Toshkent, Uzbekistan

ANALYSIS OF AN EXPLOITATION OF 3TE10M DIESEL LOCOMOTIVE ON A HILLY-MOUNTAINOUS DIRECTION OF RAILWAY

Abstract. The article includes research results of substantiation 3TE10M diesel locomotive's movement work parameters on a hilly-mountainous direction of railway while moving freight trains with stops and without any stops on the spaces stations and separating points.

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, substantiation, quality, section, profile, separate.

Изучение топливно-энергетической эффективности использования магистральных (поездных) грузовых локомотивов дизельной тяги с соблюдением рациональных режимов работы их силовых энергетических установок в пути следования и обеспечение безопасности движения поездов для направлений Самарканд – Бухара, Самарканд – Карши и на участке Мароканд – Навои все еще продолжает оставаться весьма значимой, необходимой и актуальной задачей железнодорожной отрасли Узбекистана.

На сегодняшний день, несмотря на увеличение эксплуатируемого парка локомотивов электрической тяги за счет пополнения его электровозами нового поколения «Узбекистан», большая часть всего объема грузовых перевозок железнодорожной отрасли продолжает вполне успешно реализовываться (реализуется) именно магистральными (поездными) грузовыми локомотивами дизельной тяги. Действительно, из анализа данных работы [1] следует, что около 52,6 % всего локомотивного парка АО «Ўзбекистон темир йўллари» составляют упомянутые локомотивы дизельной тяги, причем приблизительно 70 % из них приходится на магистральные (поездные) грузовые тепловозы серии ТЭ10М в различном секционном исполнении.

Настоящие исследования касаются дизельного тягового подвижного состава и, являясь в определенной степени логическим продолжением исследований [2], будут представлять собой базовый фундамент (предпосылку) для последующего (дальнейшего) проведения глубокого анализа и качественной составляющей оценки эффективности перевозочной работы магистральных (поездных) грузовых локомотивов тепловозной тяги в разных условиях организации эксплуатационной деятельности узбекских железных дорог.

Целью проведения данных теоретических исследований является обоснование параметров основных показателей перевозочной работы локомотивов дизельной тяги для реальных условий организации грузового движения по заданному холмисто-горному участку

железной дороги АО «Ўзбекистон темир йўллари» с учетом влияния различных параметров упомянутых показателей на полный (общий) и удельный расход натурального дизельного топлива, потребляемого (расходуемого) исследуемым дизельным тяговым подвижным составом за поездку при следовании грузовых поездов по участку в целом как в количественном, так и в денежном соотношении.

За объект исследования были приняты трехсекционные магистральные (поездные) грузовые тепловозы серии ЗТЭ10М с учетом критерия качественных и количественных показателей эффективности работы их в условиях эксплуатации: это техническая скорость движения и время хода поезда, расход натурального дизельного топлива с денежными затратами на него и объем перевозочной работы исследуемых тепловозов, а также спрямленный профиль пути реального, холмисто-горного участка Мароканд – Навои АО железнодорожного пути «Ўзбекистон темир йўллари» с характеристикой и параметрами элементов, приведенными в работе [2], отличительной особенностью которого является наличие величины расчетного подъема, равного $i_p \approx 6,0 \text{ ‰}$, и доли элементов профиля пути с крутизной уклонов в интервале от $+3,0$ до $-3,0 \text{ ‰}$, включая площадки $i = 0$, не превышающей 40 % от общей длины рассматриваемого участка.

Предмет исследования составили основные показатели перевозочной работы и параметры топливно-энергетической эффективности использования упомянутых выше тепловозов на заданном холмисто-горном участке железной дороги с учетом приведенных расходов натурального дизельного топлива на тягу поездов.

Поставленная цель исследований была реализована посредством выполнения серии тяговых расчетов на основе исходных данных работы [3] и рекомендаций теории локомотивной тяги [4, 5] для трех разнообразных условий организации перевозочного процесса на заданном участке Мароканд – Навои, на котором вождение грузовых поездов с разной массой составов в диапазоне от $Q_1 = 2500 \text{ т}$ до $Q_3 = 3500 \text{ т}$ с учетом дифференциации изменения их в пределах $\Delta Q = 500 \text{ т}$, но одинаковым числом осей в составе $m = 200$ осей осуществлялось магистральными (поездными) грузовыми тепловозами ЗТЭ10М с остановками и без остановок на промежуточных станциях, разъездах и отдельных пунктах.

Методика исследований изначально предусматривает разработку математических моделей вождения грузовых поездов тепловозами ЗТЭ10М, принимая во внимание характеристики материально-технической базы и условия организации их перевозочной работы, в основу которых было положено широко известное дифференциальное уравнение движения поезда [4 – 6]:

$$dV/dt = \zeta u, \quad (1)$$

где v – скорость движения, м/с; t – время хода поезда, с; u – удельная равнодействующая сила поезда, Н/кН; ζ – действительное ускорение движения поезда, кН м/Нс².

Решение уравнения (1) выполняли графическим методом исходя из принципа максимального использования мощности и тяговых качеств (свойств) локомотива [6], а также кинетической энергии поезда при движении на каждом конкретном элементе профиля пути с учетом выполнения условий по организации эксплуатационной надежности и устойчивости экипажа исследуемого локомотива. В результате решения уравнения (1) были определены (получены) траектории и кинематические параметры движения грузовых поездов на всех режимах управления трехсекционными магистральными (поездными) грузовыми тепловозами серии ЗТЭ10М на заданном холмисто-горном участке Мароканд – Навои при движении грузовых поездов без остановок и с остановками на промежуточных станциях, разъездах и отдельных пунктах.

В таблице 1 приведены кинематические параметры основных показателей перевозочной работы исследуемых тепловозов ЗТЭ10М на участке Мароканд – Навои при движении грузовых поездов с остановками и без остановок на промежуточных станциях, разъездах и отдельных пунктах, а также средние и усредненные значения параметров упомянутых

показателей для обоих видов движения, при этом последние были определены как среднеарифметические величины в принятом нами диапазоне изменения массы составов (от $Q_1 = 2500$ т до $Q_3 = 3500$ т) грузового поезда. Причем сопоставление этих упомянутых выше значений между собой позволит нам дать объективную и корректную оценку качественной составляющей перевозочной работы трехсекционных магистральных (поездных) грузовых тепловозов 3ТЭ10М, которая ими была осуществлена (выполнена) в процессе (при) организации в грузовом движении железнодорожных перевозок различных по видам и типам грузов на реальном, холмисто-горном участке Мароканд – Навои АО «Ўзбекистон темир йўллари»,

Сравнительный анализ данных таблицы 1 для средних значений параметров основных показателей перевозочной работы исследуемых тепловозов 3ТЭ10М показывает, что процесс вождения грузовых поездов, организованный упомянутыми тепловозами с остановками на промежуточных станциях и раздельных пунктах участка Мароканд – Навои, способствует

увеличению общего времени хода поезда на 17,11 мин при среднем расчетном времени на одну остановку приблизительно в 2,44 мин и уменьшению технической скорости движения на 9,79 км/ч;

обеспечению доли движения на режимах тяги в 37,49 %, а холостого хода и торможения в 62,51 %;

уменьшению/увеличению соответственно долей движения в режимах тяги, а также холостого хода и торможения приблизительно на 3,26 % по отношению к движению без остановок на промежуточных станциях и раздельных пунктах;

увеличению общего и удельного расхода натурального дизельного топлива на тягу поездов за поездку соответственно в среднем приблизительно на 24,75 и 24,51 %;

общему и удельному расходу натурального дизельного топлива на одну остановку соответственно приблизительно в 43,81 кг и 1,04 кг / 10^4 ткм брутто;

увеличению удельного расхода условного дизельного топлива на тягу поездов за поездку в среднем приблизительно на 24,46 %;

удельному расходу условного дизельного топлива на одну остановку приблизительно в 1,48 кг / 10^4 ткм брутто;

повышению полных и увеличению приведенных удельных денежных затрат соответственно на 465,5 тыс. сўм (или 24,76 %) и на 3,338 тыс. сўм / км (или 25,05 %).

Таблица 1 – Основные показатели перевозочной работы тепловозов 3ТЭ10М на участке Мароканд – Навои

Вариант тягового расчета	Условия перевозочной работы			Время хода поезда, мин			Расход дизельного топлива			Затраты денежных средств	
	масса состава Q т	число осей m , осей	техническая скорость движения V_t , км/ч	общее t_x	в режиме тяги t_t	в режиме холостого хода и торможения $t_{хх,т}$	общий	удельный		полные C_t , тыс. сўм	удельные c_t , тыс. сўм/км
							за поездку E , кг	натурного топлива e , кг/10 ⁴ ткм брутто	условного топлива e_y , кг/10 ⁴ ткм брутто		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Движение по перегонам участка без остановок, $L = 140,50$ км											
1	2500	200	75,18	112,60	36,15	76,45	998,13	28,30	40,46	1767,1	12,524
2	3000	200	74,65	113,40	38,45	74,95	1054,38	24,91	35,62	1866,7	13,230
3	3500	200	74,39	113,80	41,70	72,10	1133,0	22,94	32,81	2005,9	14,217
Средние значения			74,74	113,27	38,77	74,50	1061,84	25,38	36,30	1879,9	13,324
Движение по перегонам участка с остановками, $L = 140,50$ км											
1	2500	200	66,45	127,40	44,65	82,75	1219,5	34,57	49,44	2159,1	15,302
2	3000	200	64,90	130,45	48,95	81,50	1326,4	31,30	44,75	2348,3	16,643
3	3500	200	63,51	133,30	53,05	80,25	1428,3	28,92	41,36	2528,7	17,922
Средние значения			64,95	130,38	48,88	81,50	1324,7	31,60	45,18	2345,4	16,662

Окончание таблицы 1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Усредненные значения по обоим видам движения на участке Мароканд – Навои, $L = 140,50$ км											
1	2500	200	70,81	120,00	40,40	79,60	1108,81	31,43	44,95	1963,1	13,913
2	3000	200	69,77	121,92	43,70	78,22	1190,39	28,10	40,18	2107,5	14,936
3	3500	200	68,95	123,55	47,37	76,17	1280,65	25,93	37,08	2267,3	16,069

Анализ усредненных значений параметров основных показателей перевозочной работы магистральных (поездных) грузовых тепловозов 3ТЭ10М по отношению к графиковому (унифицированному) грузовому поезду с массой состава $Q_2 = 3000$ т и числом осей $m = 200$ осей [6] позволил сделать такие выводы и дать рекомендации.

1. Среднее общее время хода поезда составляет около 2,03 ч, а уменьшение массы состава на $\Delta Q = 500$ т приводит к уменьшению общего времени хода поезда приблизительно на 1,57 %, причем с увеличением массы состава на $\Delta Q = 500$ т происходит также увеличение этого времени на 1,34 %.

2. Техническая скорость движения поезда при аналогичном изменении массы состава имеет тенденцию к повышению приблизительно на 1,49 % и снижению приблизительно на 1,17 %, причем в среднем она приблизительно равна 69,84 км/ч.

3. Полный и удельный средний расход натурального дизельного топлива на тягу поездов составляет соответственно 1193,28 кг и 28,49 кг / 10^4 ткм брутто (или 40,74 кг / 10^4 ткм брутто условного дизельного топлива).

4. Увеличение массы состава приблизительно на 20 % способствует увеличению полного расхода натурального дизельного топлива на 7,58 %, однако удельный расход натурального дизельного топлива при этом уменьшается на 7,72 %, а уменьшение массы состава приблизительно на 20 % обеспечивает уменьшение полного и увеличение удельного расхода натурального дизельного топлива соответственно на 6,85 и 11,85 %.

5. Время хода поезда в режиме холостого хода и торможения, а также в режиме тяги колеблется соответственно от 1,327 до 1,269 ч и от 0,673 до 0,789 ч. При увеличении массы состава приблизительно на 20 % происходит уменьшение времени хода поезда в режиме холостого хода и торможения, а также его увеличение в режиме тяги соответственно на 0,034 и 0,061 ч. Время хода поезда в режиме холостого хода и торможения увеличивается на 0,023 ч, а в режиме тяги уменьшается соответственно на 0,055 ч с уменьшением приблизительно на 20 % массы состава.

6. Уменьшение массы состава приблизительно на 20 % приводит к снижению и увеличению показателей использования режимов тяги, а также холостого хода и торможения [6, 7] соответственно на 2,17 %, а с увеличением массы состава приблизительно на 20 %, наоборот, происходит повышение и снижение этих показателей на 2,51 %.

7. Уменьшение массы состава приблизительно на 20 % приводит к снижению полной и удельной стоимости за израсходованное количество натурального дизельного топлива в среднем на 6,85 %, а с увеличением массы состава приблизительно на 20 % происходит повышение этих показателей в среднем на 7,58 %.

Результатом обработки в среде *Microsoft Excel Office* значений параметров основных показателей топливно-энергетической эффективности использования исследуемых тепловозов 3ТЭ10М на участке Мароканд – Навои стали соответствующие уравнения регрессии (аналитические выражения), предназначенные для вычисления усредненных величин упомянутых параметров в реальных условиях организации грузового движения на заданном (принятом) холмисто-горном участке Мароканд – Навои, реализуемого трехсекционными магистральными (поездными) грузовыми тепловозами серии 3ТЭ10М любой i -й массы состава Q_i грузового поезда с достаточной величиной достоверности аппроксимации $R^2 = 1,0$ (необходимое условие достоверности – $R^2 \geq 0,8$). Здесь фактор (показатель) $Q_i = 1, 2, 3$ – вариант тягового расчета.

Общее время хода поезда, мин,

$$t_x = -0,145Q_i^2 + 2,355Q_i + 117,79. \quad (2)$$

Время хода поезда в режиме тяги, мин,

$$t_T = 0,185Q_i^2 + 2,745Q_i + 37,47. \quad (3)$$

Время хода поезда в режиме холостого хода и торможения, мин,

$$t_{xx, T} = -0,335Q_i^2 - 0,375Q_i + 80,31. \quad (4)$$

Техническая скорость движения V_T , км/ч,

$$V_T = 0,11Q_i^2 - 1,37Q_i + 72,07. \quad (5)$$

Общий расход натурального дизельного топлива за поездку, кг,

$$E = 4,34Q_i^2 + 68,56Q_i + 1035,9. \quad (6)$$

Удельный расход натурального дизельного топлива, кг / 10^4 ткм брутто,

$$e = 0,58Q_i^2 - 5,07Q_i + 35,92. \quad (7)$$

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

$$e = 0,835Q_i^2 - 7,275Q_i + 51,69. \quad (8)$$

Полные денежные затраты, тыс. сўм,

$$C_T = 7,7Q_i^2 + 121,3Q_i + 1834,1. \quad (9)$$

Приведенные денежные затраты, тыс. сўм / км,

$$c_T = 0,055Q_i^2 + 0,858Q_i + 13. \quad (10)$$

Анализ и оценка результатов настоящих исследований, направленных на изучение топливно-энергетической эффективности использования трехсекционных магистральных (поездных) грузовых тепловозов серии 3ТЭ10М в реальных условиях организации грузового движения на холмисто-горном участке Мароканд – Навои АО «Ўзбекистон темир йўллари», позволили нам для исследуемых упомянутых тепловозов обозначить такие обобщающие выводы:

динамика усредненных параметров основных показателей перевозочной работы упомянутых тепловозов в зависимости от изменения массы состава грузового поезда описывается полиномиальными зависимостями (законами);

увеличение расхода натурального дизельного топлива за поездку в первую очередь связано с увеличением времени работы силовой энергетической установки магистральных (поездных) тепловозов под нагрузкой и уменьшением времени хода грузового поезда на режимах холостого хода, торможения, а как следствие, это способствует увеличению механической работы сил, действующих на упомянутый поезд в режиме тяги;

уменьшение массы состава и времени работы силовых энергетических установок грузовых тепловозов на режимах тяги обеспечивает также и уменьшение израсходованного ими количества натурального дизельного топлива на тягу поездов;

для исследуемой серии тепловозов любое последовательное увеличение массы состава грузовых поездов, в том числе на каждые $\Delta Q = 500$ т, приводит не только к повышению полной и удельной стоимостей железнодорожных перевозок в грузовом движении, но и будет способствовать снижению удельного расхода натурального дизельного топлива на тягу поездов;

повышение топливно-энергетической эффективности использования исследуемой серии тепловозов напрямую зависит от увеличения объема их перевозочной работы и рационального использования на режимах тяги энергетически оптимальных позиций контроллера машиниста, характеризующихся самыми высокими коэффициентами полезного действия силовой цепи, в сочетании с режимами холостого хода и торможения.

Сопоставление полученных нами моделей вождения грузовых поездов трехсекционными магистральными (поездными) грузовыми тепловозами 3ТЭ10М, усредненных значений параметров основных показателей перевозочной работы их и уравнений регрессий по определению (вычислению) упомянутых параметров с результатами исследований [7 – 9 и многие другие] однозначно приводит нас к убеждению, что с технической и технологической точек зрения все они являются абсолютно корректными, достоверными и поэтому могут характеризовать перевозочный процесс на холмисто-горном участке Мароканд – Навои в реальных условиях организации грузового движения.

Кроме этого полученные нами результаты аналогично исследованиям [10] непременно станут основополагающими (главными) базовыми данными не только для машинистов и машинистов-инструкторов локомотивного депо Бухара и Карши АО «Ўзбекистон темир йўллари», но и для тех специалистов локомотивного хозяйства и других структурных подразделений железнодорожной отрасли Узбекистана, работа которых напрямую связана с вопросами организации перевозочного процесса в условиях эксплуатации, нормирования и прогнозирования расхода натурального дизельного топлива на тягу поездов, а также с разработкой и составлением единых «унифицированных» режимных карт вождения грузовых поездов тепловозами серии 3ТЭ10М на реальном, холмисто-горном и идентичным ему участкам железных дорог, в том числе и виртуальным.

Список литературы

1. Абляимов, О. С. Анализ эффективности использования локомотивной тяги на участке железной дороги [Текст] / О. С. Абляимов // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2015. – № 4 (24). – С. 2 – 9.
2. Абляимов, О. С. Исследование эксплуатации тепловозов 3ТЭ10М на холмисто-горном участке АО «Ўзбекистон темир йўллари» [Текст] / О. С. Абляимов // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2016. – № 2 (26). – С. 2 – 10.
3. Абляимов, О. С. К исследованию эффективности использования тепловозной тяги на участке Мароканд – Навои [Текст] / О. С. Абляимов, Ф. С. Равшанов // Республика илмий – амалий анжумани «Таълимнинг узвийлиги ва узликсизлигини таъминлаш – соҳа тараққиётининг муҳим мезони» / Тошкент давлат иқтисодий университети. – Тошкент, 2015. – С. 78 – 81.
4. Деев, В. В. Тяга поездов: Учебное пособие для вузов [Текст] / В. В. Деев, Г. А. Ильин, Г. С. Афонин. – М.: Транспорт, 1987. – 264 с.
5. Кузьмич, В. Д. Теория локомотивной тяги: Учебник [Текст] / В. Д. Кузьмич, В. С. Руднев, С. Я. Френкель. – М.: Маршрут, 2005. – 448 с.
6. Абляимов, О. С. Основы управления локомотивов: Учебник [Текст] / О. С. Абляимов, Э. С. Ушаков. – Ташент: Davr, 2012. – 392 с.
7. Абляимов, О. С. К анализу эффективности использования тепловозов 4ТЭ10М в эксплуатации [Текст] / О. С. Абляимов, В. С. Кудряшов, И. Р. Каюмов // Вестник ТашИИТа / Ташкентский ин-т инж. ж.-д. трансп. – Ташкент, 2012. – № 1. – С. 42 – 45.

8. Абляимов, О. С. Исследование эффективности использования локомотивной тяги в эксплуатации [Текст] / О. С. Абляимов, В. С. Кудряшов, И. Р. Каюмов // Вестник ТашИИТа / Ташкентский ин-т инж. ж.-д. трансп. – Ташкент, 2013. – № 1/2. – С. 50 – 53.

9. Абляимов, О. С. Исследование эффективности использования тепловозной тяги на холмистом участке железной дороги [Текст] / О. С. Абляимов, Ж. Х. Атахажаев // Вестник ТашИИТа / Ташкентский ин-т инж. ж.-д. трансп. – Ташкент, 2013. – № 3/4. – С. 31 – 34.

10. Абляимов, О. С. К исследованию эксплуатации электровозов на холмисто-горном участке железной дороги [Текст] / О. С. Абляимов, А. П. Вохидов, И. Р. Омонов // Материалы III междунар. науч.-практ. конф. «Локомотивы. Газомоторное топливо (Проблемы. Решения. Перспективы)» / Самарский гос. ун-т путей сообщения. – Самара, 2016. – С. 33 – 37.

References

1. Ablialimov O. S. Analysis of efficiency of use of locomotive traction on the railway section [Analiz effektivnosti ispol'zovaniia lokomotivnoi tiagi na uchastke zheleznoi dorogi]. *Izvestiia Transsiba – The journal of Transsib Railway Studies*, 2014, no. 4 (24), pp. 2 – 9.

2. Ablialimov O. S. Research 3TE10M locomotives operating on hilly – mountainous area of "Uzbekiston Temir Yullari" [Issledovanie ekspluatatsii teplovozov 3TE10M na kholmisto – gornom uchastke AO «Ўзбекистон темір йўллари»]. *Izvestiia Transsiba – The journal of Transsib Railway Studies*, 2016, no. 2 (26), pp. 2 – 10.

3. Ablialimov O. S. To study the effectiveness of the use of diesel traction in the area Marakand – Navoi [K issledovaniyu effektivnosti ispol'zovaniia teplovoznai tiagi na uchastke Marokand – Navoi]. (*Республика илмий – амалий анжумани «Таълимнинг узвийлиги ва узликсизлигини таъминлаш – соҳа тараққиетининг муҳим мезони»*). Tashkent, 2015, pp. 78 – 81.

4. Deev V. V., Il'in G. A., Afonin G. S. *Tiaga poezdov* (Train link). Moscow: Transport, 1987, 264 p.

5. Kuz'mich V. D., Rudnev V. S., Frenkel' S. Ia. *Teoriia lokomotivnoi tiagi* (Locomotive traction theory). Moscow: Marshrut, 2005, 448 p.

6. Ablialimov O. S., Ushakov E. S. *Osnovy upravleniia lokomotivov: Uchebnik* (Fundamentals of locomotive control: Textbook). Tashkent: Davr, 2012, 392 p.

7. Ablialimov O. S., Kudriashov V. S., Kaiumov I. R. To analyze the effectiveness of the use of locomotives in operation 4TE10M [K analizu effektivnosti ispol'zovaniia teplovozov 4TE10M v ekspluatatsii]. *Vestnik TashIIT – Herald Tashiit*, 2012, no. 1, pp. 42 – 45.

8. Ablialimov O. S., Kudriashov V. S., Kaiumov I. R. Research of efficiency of use of locomotive traction operation [Issledovanie effektivnosti ispol'zovaniia lokomotivnoi tiagi v ekspluatatsii]. *Vestnik TashIIT – Herald Tashiit*, 2013, no. 1/2, pp. 50 – 53.

9. 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 teplovoznai tiagi na kholmistom uchastke zheleznoi dorogi]. *Vestnik TashIIT – Herald Tashiit*, 2013, no. 3/4, pp. 31 – 34.

10. Ablialimov O. S., Voxidov A. P., Omonov I. R. To study electric operation on hilly - mountainous area of the railway [K issledovaniyu ekspluatatsii elektrovozov na kholmisto – gornom uchastke zheleznoi dorogi]. *Materialy III-i Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Lokomotivy. Gazomotornoe toplivo (Problemy. Resheniia. Perspektivy)»* (Proceedings of the III-rd International scientific-practical conference «Locomotives. NGV (Challenges. Solutions. Outlook)»). Samara, 2016. pp. 33 – 37.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Абляимов Олег Сергеевич

Ташкентский институт инженеров железнодорожного транспорта (ТашИИТ).

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

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Ablyalimov Oleg Sergeevich

Toshkent Temir Yo'l Muhandislari Instituti (ToshTYMI).

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

Кандидат технических наук, доцент кафедры
«Локомотивы и локомотивное хозяйство», ТашИИТ.
Тел.: (81099871) 299-03-94.
E-mail: icenter@tashiit.uz

Cand. Tech. Sci., Associate Professor of the department
«Locomotives and locomotive economy»,
ToshTYMI.
Phone: (81099871) 299-03-94.
E-mail: icenter@tashiit.uz

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Аблялимов, О. С. Анализ эксплуатации тепловозов 3ТЭ10М на холмисто-горном участке железной дороги [Текст] / О. С. Аблялимов // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2016. – № 3 (27). – С. 2 – 9.

Ablyalimov O. S. Analysis of an exploitation of 3TE10M diesel locomotive on a hilly-mountainous direction of railway. Journal of Transsib Railway Studies, 2016, vol. 27, no. 3, pp. 2 – 9. (In Russian).

УДК621.331

Алтангэрэл Энх-Амгалан

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

ОБОСНОВАНИЕ ЭЛЕКТРИФИКАЦИИ УЛАН-БАТОРСКОЙ ЖЕЛЕЗНОЙ ДОРОГИ С УЧЕТОМ МИРОВОГО ОПЫТА

Аннотация. Рассмотрен опыт электрификации железных дорог различных стран мира. Показатели работы действующих электрифицированных железных дорог и выполненные расчеты свидетельствуют о том, что применение электрической тяги имеет высокую эффективность и позволяет улучшить эксплуатационные показатели Улан-Баторской железной дороги.

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

Altangerel Enkh-Amgalan

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

Abstract. The experience of the electrification of railways around the world. Performance of existing electric railways, and also performed calculations show that the use of electric traction has high efficiency and can improve the operational performance of the Ulaanbaatar Railway.

Keywords: railway electrification, traction, locomotive.

Железные дороги Монголии являются ведущим видом транспорта в стране. Они играют решающую роль в выполнении перевозок важнейших грузов, топлива, промышленного сырья, готовой продукции. Бесперебойное функционирование железнодорожного транспорта служит гарантией возможности развития экономики страны, ее промышленности и сельского хозяйства.

Общая протяженность железных дорог Монголии составляет 1815 км. Крупнейшей железнодорожной линией Монголии является Трансмонгольская магистраль Сухэ – Батор – Улан-Батор – Замын-Ууд протяженностью 1111 км [1].

В настоящее время в Монголии применяется тепловозная тяга. В грузовом и пассажирском движении работают тепловозы российского производства, при этом для вождения грузовых поездов используются тепловозы серии 2ТЭ116(УМ), а вождение пассажирских поездов осуществляется тепловозами серии 2М62, 2ZAGAL (модернизированные 2М62).

Эффективность тяги поездов во многом определяется расходом топливно-энергетических ресурсов. Тепловозы потребляют большое количество дорогостоящего дизельного топлива, приобретаемого за рубежом. Это значительно увеличивает стоимость перевозок на железной дороге. Опыт других стран, прежде всего России, показывает, что стоимость перевозок существенно снижается при электрической тяге. Электрификация железных

дорог позволяет повысить массу и скорость движения поездов, пропускную и провозную способность железных дорог, уменьшить эксплуатационные расходы.

Во всем мире общая протяженность железных дорог к началу XXI в. приблизилась к 1 млн км, из них 25 % электрифицировано, а 75 % работает на тепловозной тяге. Мировой объем перевозок между этими видами тяги распределяется примерно одинаково – по 50 %. Следовательно, при меньшей протяженности электрифицированных железных дорог средняя грузонапряженность на них в три раза выше, чем на линиях с тепловозной тягой.

В Европе (без стран СНГ) протяженность сети электрифицированных железных дорог составляет 47 % общей протяженности сети с объемом перевозок примерно 70 %, т. е. грузонапряженность электрифицированных линий более чем в два раза превышает грузонапряженность линий, обслуживаемых тепловозами при мировом соотношении три раза. Электрификация железных дорог Европы дает возможность реализовать высокие скорости, большие ускорения и, конечно, более благоприятна в отношении экологического воздействия железных дорог на окружающую среду.

На электрифицированных железных дорогах основные эксплуатационные показатели, определяющие эффективность перевозочного процесса (средний вес грузового поезда, средняя участковая скорость, среднесуточный пробег локомотива), на 20 – 30 % выше, чем на линиях с тепловозной тягой; интегральный экономический показатель (себестоимость перевозок) на электрифицированных участках на разных дорогах в 1,5 – 2,5 раза ниже, чем при тепловозной тяге. Электрическая тяга имеет более высокую энергетическую эффективность по экономии топливно-энергетических ресурсов; удельный расход условного топлива на измеритель ниже в 1,6 – 2,0 раза.

Железные дороги России имеют протяженность примерно 85 тыс. км, из них 42 тыс. км электрифицированных железных дорог, в том числе 18 тыс. км на постоянном токе с напряжением в контактной сети 3 кВ и 24 тыс. км на однофазном переменном токе промышленной частоты 50 Гц с напряжением в контактной сети 25 кВ. Следовательно, доля электрифицированных железных дорог в России составляет около 50 %, а выполняют они 85 % объема перевозок. Опыт российских железных дорог показывает, что себестоимость перевозок при электрической тяге в 1,5 – 3,0 раза ниже, чем при тепловозной.

Особый интерес представляет опыт электрификации железных дорог Южно-Африканской Республики (ЮАР), занимающей третье место в мире по абсолютной протяженности электрифицированных линий. Имея потребность в больших объемах угольно-рудных грузоперевозок, ЮАР начала электрификацию железных дорог в 1926 г. и довела их протяженность к настоящему времени до 84 % сети (92,7 % общего объема перевозок). На железных дорогах ЮАР применены три системы электротяги: 25 кВ, 50 Гц переменного тока (3,9 тыс. км), 3 кВ постоянного тока (12 тыс. км) и 50 кВ, 50 Гц переменного тока (955 км).

Последняя система пока единственная в мире на линиях такой протяженности: она обеспечивает угольные перевозки по замкнутому маршруту Сайшен – Салфанья от угольного и рудного месторождений до побережья океана.

Интересен опыт применения в ЮАР частичной электрификации железнодорожных линий с преимущественно тепловозной тягой на основе комбинированных локомотивов – «тепловоз – электровоз». На участках, где используются такие локомотивы, контактной сетью оборудованы только затяжные подъемы, лимитирующие пропускную способность; на них «электровозная» часть локомотива (25% мощности) подключается к «тепловозной», что позволяет преодолеть подъем без снижения скорости.

Приоритетность электрификации железных дорог ЮАР обусловлена низкой себестоимостью перевозок благодаря дешевой электроэнергии. В 2000 г. стоимость электроэнергии здесь была минимальной в мире вследствие низкой себестоимости первичного энергоносителя – угля (открытая разработка, большие запасы) [2].

Кстати, в Монголии имеется много угольных и рудных месторождений с большими запасами и каждый год возрастает объем перевозок на железнодорожном транспорте. Электроэнергия, вырабатываемая электростанциями, достаточно дешевая (таблица 1).

Однако электрификация железных дорог связана с необходимостью создания мощной инфраструктуры – системы тягового электроснабжения (внешнее электроснабжение, тяговые подстанции, контактная сеть, линейные предприятия обслуживания и ремонта устройств электроснабжения). Для Улан-Баторской железной дороги по расчетам в ценах 2013 г. капиталовложения на 1 км однопутной электрифицируемой линии составляют около 450 тыс. долларов.

Преимущества электрической тяги по сравнению с тепловозной тягой следующие:

- большая достигаемая мощность одной секции локомотива – электровозы 4475 – 7350 кВт (6000 – 10000 л. с.), тепловозы 2940 – 4475 кВт (4000 – 6000 л. с.);
- возможность кратковременной перегрузки локомотива на 10 – 40 %;
- более низкие затраты на техническое обслуживание и ремонт;
- меньший расход запасных частей;
- более благоприятное экологическое воздействие – ниже уровень шума, отсутствие загрязнения окружающей среды;
- меньшая потребность железных дорог в жидком углеводородном топливе и смазке;
- меньший парк локомотивов вследствие их большей производительности и как результат – уменьшение числа локомотивных бригад, сокращение количества ремонтируемого оборудования и обслуживающего персонала.

К недостаткам электрификации американские специалисты относят следующее:

- необходимость больших капиталовложений в инфраструктуру;
- необходимость существенного изменения системы сигнализации при внедрении электротяги;
- возможные значительные затраты на реконструкцию тоннелей и мостов для соблюдения необходимого габарита;
- необходимость переучивания обслуживающего персонала;
- исключение возможности перевозки контейнеров в два яруса.

За последние годы (с 2008 по 2014 г.) стоимость дизельного топлива в Монголии постоянно увеличилась с темпом 60 % в год, это показано в таблице 1 и на рисунке 1 [3].

Таблица 1 – Средняя стоимость дизельного топлива и электрической энергии

Средняя стоимость дизельного топлива c_t и электрической энергии $c_{э}$, тугрики, по годам								
Год	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
c_t , тугрик/1 кг	960	1120	1270	1270	1480	1480	1620	1790
$c_{э}$, тугрик/ 1 кВт·ч	87,78	87,78	87,78	96,8	96,8	н/д	н/д	141,35

На Улан-Баторской железной дороге средняя стоимость дизельного топлива возросла на 186,45 % (с 960 до 1790 тугриков за 1 т), а электрической энергии – на 61 % (с 87,781 до 141,35 тугрика за 1 кВт·ч).

В настоящее время на Улан-Баторской железной дороге, как отмечалось выше, применяется тепловозная тяга, основные показатели объема транспортной работы приведены в таблице 2. Ретроспективный анализ показателей работы Улан-Баторской железной дороги свидетельствует о том, что объем транспортной работы ежегодно возрастает (рисунок 2).

Поскольку средняя масса поезда увеличивается, а среднесуточный пробег локомотива находится примерно на одном уровне, то среднесуточная производительность локомотива также возрастает. Из-за ежегодного возрастания средней стоимости дизельного топлива (см. рисунок 1) увеличиваются эксплуатационные расходы.

На юге Монголии в пустыне Гоби в Южно-Гобийском аймаке расположено каменно-угольное месторождение Таван-Толгой. Это одно из крупнейших в мире по размерам запасов месторождений угля (6,5 млрд т угля, около 40 % из которых – высококалорийный коксующийся уголь). Монголия не имеет выхода к морю, а потому единственной возможностью транспортировки добываемого на месторождении угля являются железные дороги [4]. Это

одна из наиболее реальных систем, которые могут быть использованы при создании в перспективе супермощных электрифицированных магистралей для грузонапряженных железнодорожных транспортных коридоров в Монголии (рисунок 3).

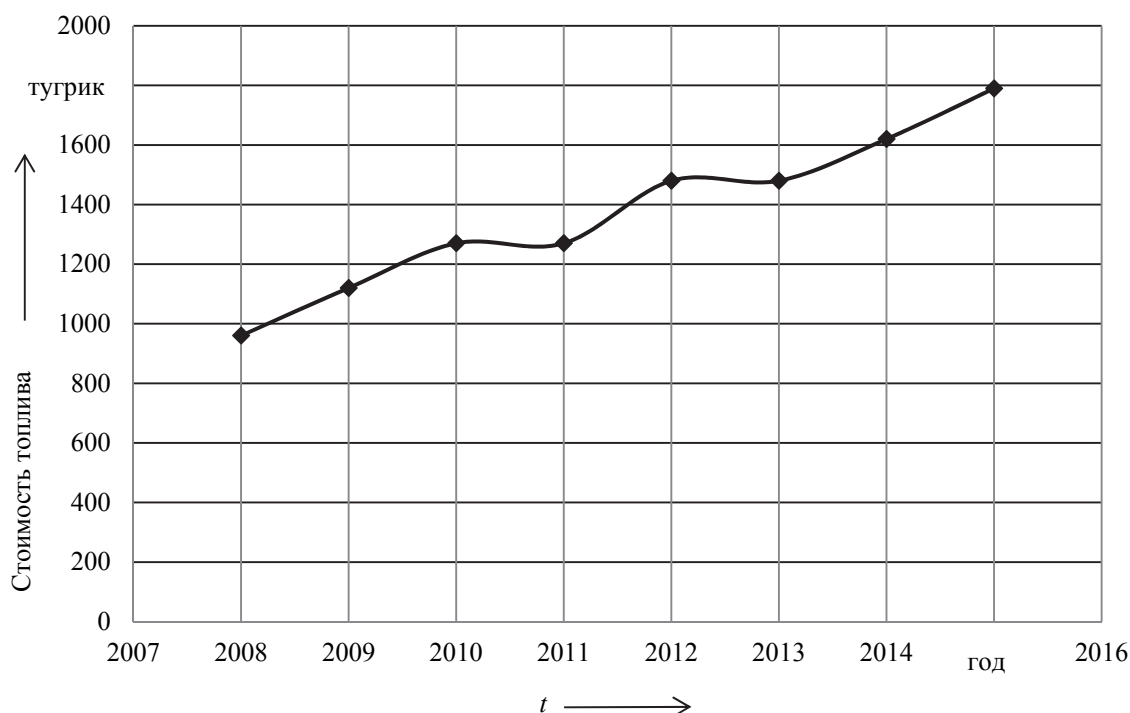


Рисунок 1 – Средняя стоимость 1 кг дизельного топлива по годам

Таблица 2 – Объем транспортной работы на Улан-Баторской железной дороге по видам перевозок за 2013 – 2014 гг. (тыс. т)

Вид перевозок	2013 /факт/	2014 /план/	2014 /факт/	Исполнение плана 2014 г., %	Сравнение 2014/2013 гг., %
Поступление	2484,12	3565,30	2288,73	64,2	92,1
Сдача	6069,45	6931,00	6191,13	89,3	102,0
Внутренний	10725,13	8478,70	10573,57	124,7	98,6
Транзит:	1756,77	2525,00	2065,15	81,8	117,6
Китай-Россия	226,31	280,00	329,34	117,6	145,5
Россия-Китай	1530,46	2245,00	1735,81	77,3	113,4
Итого	21035,47	21500,00	21118,59	98,2	100,4

Максимальная масса состава вагонов определяется по различным условиям, прежде всего по условиям движения с установившейся скоростью на расчетном подъеме и по условиям трогания и разгона. Во всех случаях расчет максимальной массы состава вагонов производится с учетом основных положений теории тяги поездов и рекомендаций [5 – 7].

Согласно рекомендациям [5 – 7] максимальная масса состава вагонов по условию движения поезда с установившейся скоростью в режиме тяги, т,

$$m_c = \frac{F_{кр} \cdot 10^3 - m_{л} g(w_{ол} + i)}{g(w_{ос} + i)}. \quad (1)$$

где $F_{кр}$ – касательная сила тяги локомотива;

$m_{л}$, m_c – массы локомотива и состава вагонов;

g – ускорение свободного падения;

$w_{ол}$, $w_{ос}$ – удельное основное сопротивление движению локомотива и состава вагонов;
 i – крутизна подъема.

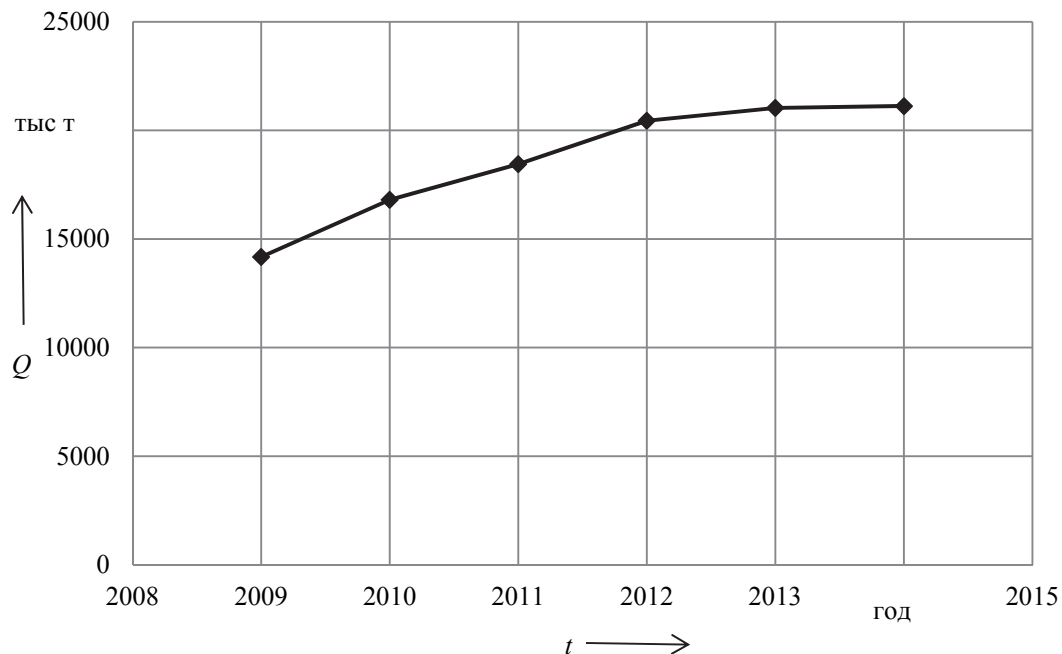


Рисунок 2 – Объем транспортной работы на Улан-Баторской железной дороге

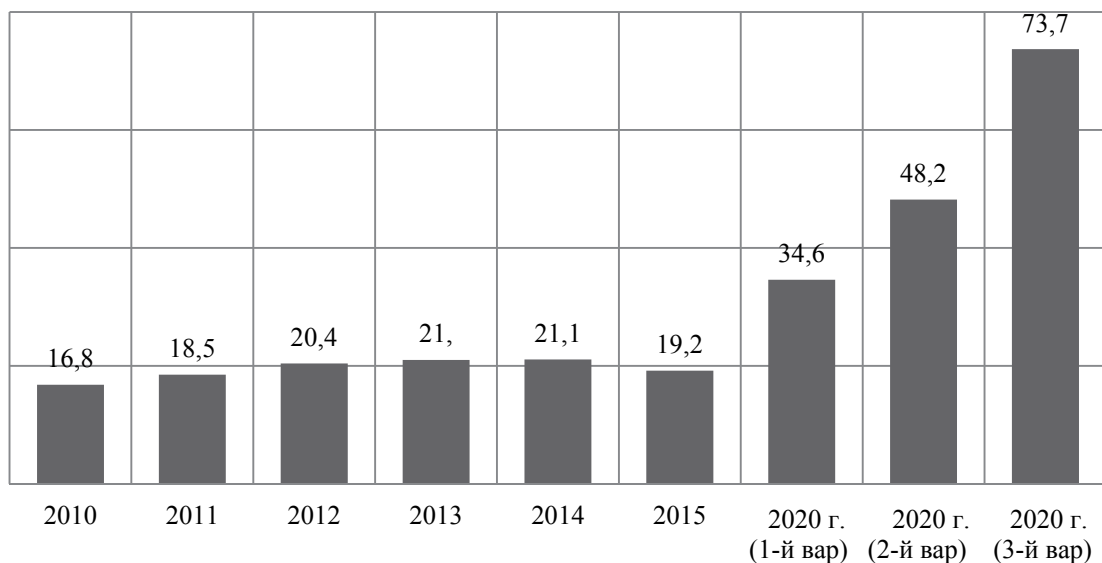


Рисунок 3 – Перспективы объемов перевозок на Улан-Баторской железной дороге, млн т

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

$$w_{ол} = w_{о'} = 1,9 + 0,01V + 0,0003V^2. \quad (2)$$

Удельное основное сопротивление движению 4-осных грузовых вагонов на роликовых подшипниках, Н/кН,

$$w_{ос} = w_{о''} = 0,7 + (3 + 0,1V + 0,0025V^2) / m_{во}, \quad (3)$$

где $m_{во}$ – масса на ось вагона, т.

Количество вагонов состава поезда определяется по выражению

$$n_B = m_c / (4m_{BO}). \quad (4)$$

Исходные данные и результаты расчета максимальной массы поезда, ведомого электровозом 2ЭС5К и тепловозом 2ТЭ116 с установившейся расчетной скоростью и силой тяги на расчетном подъеме, приведены в таблице 3. Расчет максимальной массы поезда выполнен для одного из лимитирующих подъемов крутизной 16 ‰, имеющих на Улан-Баторской железной дороге, на таких подъемах требуется подталкивание тяжелых поездов массой 3000 т и выше.

Таблица 3 – Исходные данные и результаты расчета максимальной массы поезда

Тип и серия локомотива	Электровоз 2ЭС5К	Тепловоз 2ТЭ116
Масса локомотива $m_{л}$, т	192	276
Расчетная скорость V_p , км/ч	43,5	24,2
Расчетная сила тяги локомотива $F_{кр}$, кН	502,3	496,4
Вагоны	Грузовые 4-осные на подшипниках качения	
Масса на ось вагона m_{BO} , т	17,5	
Путь	Звеньевой	
Крутизна расчетного подъема i , ‰	16	
Удельное основное сопротивление движению локомотива под током w_o' , Н/кН	2,88	2,32
Удельное основное сопротивление движению грузовых вагонов w_o'' , Н/кН	1,16	1,09
Масса поезда m_c , т	2772	2665

Результаты расчета показывают, что при движении с расчетной скоростью и силой тяги на лимитирующем подъеме крутизной 16 ‰ максимальная масса поезда для одного электровоза 2ЭС5К составляет 2772 т против 2665 т для одного тепловоза 2ТЭ116, т. е. на 107 т больше, хотя скорость электровоза 43,5 км/ч почти в два раза больше, чем скорость тепловоза 24,2 км/ч.

Оценим энергетическую эффективность применения электрической тяги на участке пути 1 км с подъемом крутизной 16 ‰.

1) Для электровоза 2ЭС5К время прохождения 1 км пути с расчетной скоростью 43,5 км/ч

$$T = L/V; \quad (5)$$

$$T = 1 \cdot 60 / 43,5 = 1,37 \text{ мин.}$$

Удельный расход электроэнергии электровоза 2ЭС5К при движении с расчетной скоростью 43,5 км/ч и силой тяги 502,3 кН согласно рекомендациям [7] $a_3 = 123,4 \text{ кВт} \cdot \text{ч/мин.}$

Тогда полный расход электроэнергии на тягу поезда массой 2772 т на участке пути 1 км с подъемом крутизной 16 ‰

$$A_3 = a_3 T; \quad (6)$$

$$A_3 = 123,4 \cdot 1,37 = 169,0 \text{ кВт} \cdot \text{ч.}$$

Стоимость израсходованной электроэнергии при ее тарифе на Улан-Баторской железной дороге $c_3 = 141,35 : 30 = 4,2 \text{ р./кВт} \cdot \text{ч}$ [8]

$$\Pi_3 = c_3 A_3; \quad (7)$$

$$\Pi_3 = 4,2 \cdot 169,0 = 796,3 \text{ р.}$$

2) Для тепловоза 2ТЭ116 время прохождения 1 км пути с расчетной скоростью 24,2 км/ч

$$T = 1 \cdot 60 / 24,2 = 2,48 \text{ мин.}$$

Удельный расход дизельного топлива тепловоза 2ТЭ116 при движении с расчетной скоростью 24,2 км/ч и силой тяги 496,4 кН согласно выводам [7] $a_t = 8,0$ кг/мин.

Тогда полный расход дизельного топлива на тягу поезда массой 2665 т на участке пути 1 км с подъемом крутизной 16 ‰

$$A_t = 8 \cdot 2,48 = 19,84 \text{ кг.}$$

Стоимость израсходованного дизельного топлива при его тарифе на Улан-Баторской железной дороге $c_t = 1790/30 = 59,7$ р./кг [8]

$$Ц_t = c_t A_t; \quad (8)$$

$$Ц_t = 59,7 \cdot 19,84 = 1183,8 \text{ р.}$$

По результатам расчетов видно, что на 1 км пути лимитирующего подъема крутизной 16 ‰ затраты на топливно-энергетические ресурсы при электрической тяге примерно в 2 раза меньше, чем при тепловозной тяге. На участках с легким профилем пути, т. е. с подъемами меньшей крутизны, энергозатраты при электрической тяге будут еще меньше по сравнению с тепловозной тягой, поскольку при малых нагрузках и на холостом ходу расход электроэнергии электровозов существенно снижается, а расход дизельного топлива тепловозов практически не уменьшается.

На основании изложенного выше можно сделать выводы.

1. Расчеты показывают, что благодаря применению электрической тяги на Улан-Баторской железной дороге финансовые затраты на топливно-энергетические ресурсы сокращаются более чем в два раза.

2. За счет большей массы и скорости движения поездов эффективность применения электрической тяги на Улан-Баторской железной дороге будет еще больше.

3. Энергетическая эффективность применения электрической тяги на Улан-Баторской железной дороге получается высокой, срок окупаемости ее будет непродолжительным.

Обобщая результаты анализа мировых тенденций в развитии электрификации железных дорог и оценивая перспективы электрификации в России, можно сделать следующие выводы.

1. В промышленно развитых странах мира, имеющих устойчивую потребность в грузо- и пассажироперевозках, преимущественно применяется электрическая тяга; грузонапряженность электрифицированных линии в 2 – 4 раза превышает грузонапряженность тепловозных ходов.

2. Электрификация железных дорог позволяет на 20 – 30 % поднять нормы массы и скорости движения поездов, пробег локомотивов, на 20 – 30 % снизить потребность в локомотивах и локомотивных бригадах, уменьшить в 1,4 – 1,5 раза удельный расход условного топлива на измеритель перевозочной работы и в 2 – 3 раза ремонтно-эксплуатационные расходы на содержание локомотивов. Совокупность этих факторов обеспечивает в 1,5 – 2 раза меньшую себестоимость перевозок на электрической тяге, чем при тепловозной тяге. Существенно преимущество электрической тяги в снятии проблем загрязнения окружающей среды, что происходит при тепловозной тяге.

3. Оптимальным, по мнению международных экспертов, для стран с развитой железнодорожной инфраструктурой, к которым относится и Россия, является электрификация 50 – 60 % общей протяженности железнодорожной сети страны с возложением на электрифицированные линии 80 – 90 % общего объема перевозки грузов.

4. В большинстве стран отводится определенная роль и тепловозной тяге; это – транспортное обеспечение слабо загруженных и малодейственных линии, участков, используемых для жизнеобеспечения населения слаборазвитых регионов, участков, на которых отсутствует внешнее электроснабжение.

5. При электрификации Улан-Баторской железной дороги повышаются масса и скорость движения поездов, увеличиваются пропускная и провозная способность железной дороги, сокращаются энергозатраты на тягу поездов.

Список литературы

1. Улан-Баторская железная дорога [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.legendtour.ru/rus/mongolia/informations/ubzd.shtml>
2. Котельнико, А. В. Электрификация железных дорог. Мировые тенденции и перспективы [Текст] / А. В. Котельнико. – М.: Интекст, 2002. – 104 с.
3. Шунхлай [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://shunkhlai.mn/>
4. Монголия: каменноугольное месторождение Таван-Толгой [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://iv-g.livejournal.com/499663.html>
5. Осипов, С. И. Теория электрической тяги [Текст] / С. И. Осипов, С. С. Осипов, В. П. Феоктистов. – М.: Маршрут, 2006. – 434 с.
6. Бакланов, А. А. Теория электрической тяги. Тяговые расчеты: Методические указания по курсовому и дипломному проектированию [Текст] / А. А. Бакланов / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 1999. – 39 с.
7. Правила тяговых расчетов для поездной работы [Текст] / П. Т. Гребенюк, А. Н. Долганов и др. – М.: Транспорт, 1985. – 287 с.
8. Монголбанк [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.mongolbank.mn/>

References

1. Ulan Bator Railway. Website: <http://www.legendtour.ru/rus/mongolia/informations/ubzd.shtml>
2. Kotelnikov A. V. *Elektrifikaciy jeleznihi dorog. Mirovie tendentsi i perspektivi* (Electrification of the railways. Global trends and prospects). Moscow: Intext, 2002, 104 p.
3. Shunhlay. Website: <http://shunkhlai.mn/>
4. Mongolia coal deposit Tavan Tolgoi. Website: <http://iv-g.livejournal.com/499663.html>
5. Osipov S. I., Osipov S. S., Feoktistov V. P. *Teoriya elektricheskoi tyagi* (Theory of electric traction). Moscow: Marshrut, 2006, 434 p.
6. Baklanov A. A. *Teoriya elektricheskoi tyagi. Tyagovie raschyoti. Metodicheskiye ukazaniya po kursovomu i diplomnomu proektirovaniyu* (Theory of electric traction. Traction calculations: Methodological guidelines for course and degree designing). Omsk, 1999, 39 p.
7. 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, 1985, 287 p.
8. Mongolbank. Website: <https://www.mongolbank.mn/>

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 Russian Federation.

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

Phone: (+976) 99192520.

E-mail: amgaa_02_03@yahoo.com

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Энх-Амгалан Алтангэрэл. Обоснование электрификации Улан-Баторской железной дороги с учетом

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Enkh-Amgalan Altangerel Possibility of electrification ulaanbaatar railway with the world experience. Jour-

мирового опыта [Текст] / Алтангэрэл Энх-Амгалан // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2016. – № 3 (27). – С. 9 – 17. / *Journal of Transsib Railway Studies*, 2016, vol. 27, no. 3, pp. 9 – 17. (In Russian).

УДК 626.424.1

Д. Я. Антипин¹, Д. А. Бондаренко¹, О. В. Измеров², М. А. Маслов¹

¹Брянский государственный технический университет (БГТУ),
²администрация губернатора Брянской области и правительства Брянской области,
г. Брянск, Российская Федерация

КЛАССИФИКАЦИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЙ В ТЯГОВОМ ПРИВОДЕ ЛОКОМОТИВА

Аннотация. Проведен анализ причин низкой эффективности накопленных знаний о динамике тягового привода локомотива. Установлено, что использование научной информации затруднено из-за ее противоречивости и недостаточной систематизированности. Предложена классификация динамических явлений в тяговом приводе локомотива, облегчающая поиск новых технических решений. Классификация использована при создании новой конструкции резинокордной муфты, защищенной патентом.

Ключевые слова: тяговый привод, динамические явления, резинокордная муфта, тепловоз.

Dmitry Y. Antipin¹, Denis A. Bondarenko¹, Oleg V. Izmerov², Maksim A. Maslov¹

¹Bryansk State Technical University (BSTU),
²Governor of the Bryansk regional administration and the Government of the Bryansk region, Bryansk, Russia

CLASSIFICATION OF DYNAMIC PHENOMENA IN THE TRACTION DRIVE LOCOMOTIVE

Abstract. The analysis of the causes of low efficiency of existing knowledge about the dynamics of the locomotive traction drive. It was found that the use of scientific information is difficult because of its inconsistency and lack of systematization. The classification of dynamic phenomena in the locomotive traction drive to facilitate the search for new technical solutions. Classification is used to create a new design rubber-cord coupling protected by a patent.

Keywords: traction drive, dynamic phenomena, rubber-clutch locomotive.

Как показывает практика, наличие большого объема информации о динамике тяговых приводов, накопленной за несколько десятилетий исследований и доступной разработчикам, само по себе не гарантирует появления внезапных отказов привода в эксплуатации или других проблем, вызванных динамическими явлениями. Так, в тяговых приводах, созданных в последние 10 лет, обнаруживались такие проблемы, как повреждение шарниров подвесок тяговых электродвигателей (ТЭД), обрывы подвесок, ослабление болтов крепления ТЭД к раме тележки, срез болтов фланцевого соединения ТЭД и тяговой передачи, разрывы компенсирующих муфт. В связи с этим целесообразно проанализировать причины низкой эффективности накопленных знаний о динамике тягового привода.

Проведенный авторами анализ работ по развитию теории динамики тягового привода позволил выявить три основных направления исследовательской деятельности: теоретический анализ, экспериментальные исследования и моделирование. Вследствие того, что большая часть работ посвящена решению конкретных проблем, поиск требуемых данных затруднен вследствие того, что они распределены по значительному числу источников (публикации, отчеты о результатах испытаний). Интерпретация данных также затруднена как из-за того, что приводимые в отчетах и публикациях результаты исследований приводят к противоречивым выводам, так и вследствие различий в динамических явлениях в прототипе и проектируемом приводе, что в свою очередь является следствием многокомпонентности процесса и изменения вида процесса при изменении режимов движения. Так, на рисунке 1 пред-

ставлены осциллограммы динамического момента M в валопроводах тягового привода с осевым редуктором и возмущающего фактора в виде вертикальных перемещений буксы относительно рамы тележки (ВПБ).

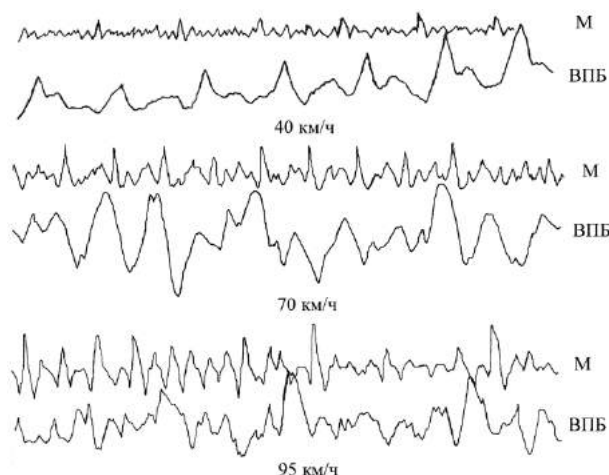


Рисунок 1 – Изменение вида динамических процессов в тяговом приводе при изменении скорости движения

Как видно на рисунке 1, при скорости движения 40 км/ч оба процесса похожи на периодические импульсы, возникающие при прохождении стыковых неровностей пути. При скорости 70 км/ч, когда частота прохождения стыков становится кратной частоте собственных колебаний кузова на рессорах, возмущение приобретает вид узкополосного случайного процесса, а осциллограмма реакции системы сохраняет вид процесса со значительной импульсной составляющей. Наконец, при 95 км/ч на узкополосный случайный процесс становится похожа осциллограмма реакции системы, а осциллограмма возмущения начинает походить на широкополосный случайный процесс. Принятие за основу при анализе разных моделей процесса приводит к разнице принимаемых допущений, и зачастую – к противоречиям рекомендаций различных исследователей в зависимости от режима движения (выбег, под нагрузкой) вследствие влияния зазоров в передаче и нелинейной характеристики упругих элементов. При исследовании тягового привода тепловоза 2ТЭ121 было установлено, что эквивалентная крутильная жесткость валопроводов, определенная путем получения АЧХ на основе спектрального анализа возмущения и реакции системы, при приложении тягового момента меняется в 2 – 3,3 раза по сравнению с режимом выбега, что превышает влияние изменения жесткости валопроводов конструктивным путем (таблица).

Исследование тягового привода тепловоза 2ТЭ121

Вариант	Режим	Расчетная собственная частота f_p , Гц	Экспериментальная собственная частота f_c , Гц	Эквивалентная жесткость $c_{эк}$, Нм/рад	Параметр затухания ξ
Штатное	Выбег	5	3,75	$3,5 \cdot 10^4$	0,27
	15 п.к.		5,75	$8,25 \cdot 10^4$	0,22
«Мягкое»	Выбег	5	3,00	$2,25 \cdot 10^4$	0,14
	15 п.к.		5,5	$7,5 \cdot 10^4$	0,09
ЖЗК	Выбег	6	4,25	$4,5 \cdot 10^4$	0,30
	15 п.к.		6,00	$9 \cdot 10^4$	0,15

Возможности прогнозирования динамических свойств привода методами моделирования ограничены ввиду недостаточной изученности ряда внешних воздействий.

Возникает необходимость дальнейшей систематизации данных о динамических явлениях в тяговом приводе и представления их в интуитивно понятном виде. Авторами предложена классификация динамических факторов, действующих на элементы колесно-моторного блока, представленная в виде сетевой модели (рисунок 2).

Классификация содержит три уровня – физические явления, вызывающие динамические нагрузки, виды конкретных проявлений этих физических явлений и группы деталей и узлов, подвергающихся динамическим нагрузкам. Строгая типологизация динамических эффектов затруднена вследствие многообразия как причин их появления, так и внешних проявлений. Одни и те же процессы, например, динамические моменты в валопроводах при проходе неровностей пути можно рассматривать как случайные стационарные узкополосные процессы, как квазидетерминированные, как нестационарные процессы (одиночные удары), как случайные квазипериодические и т. п.

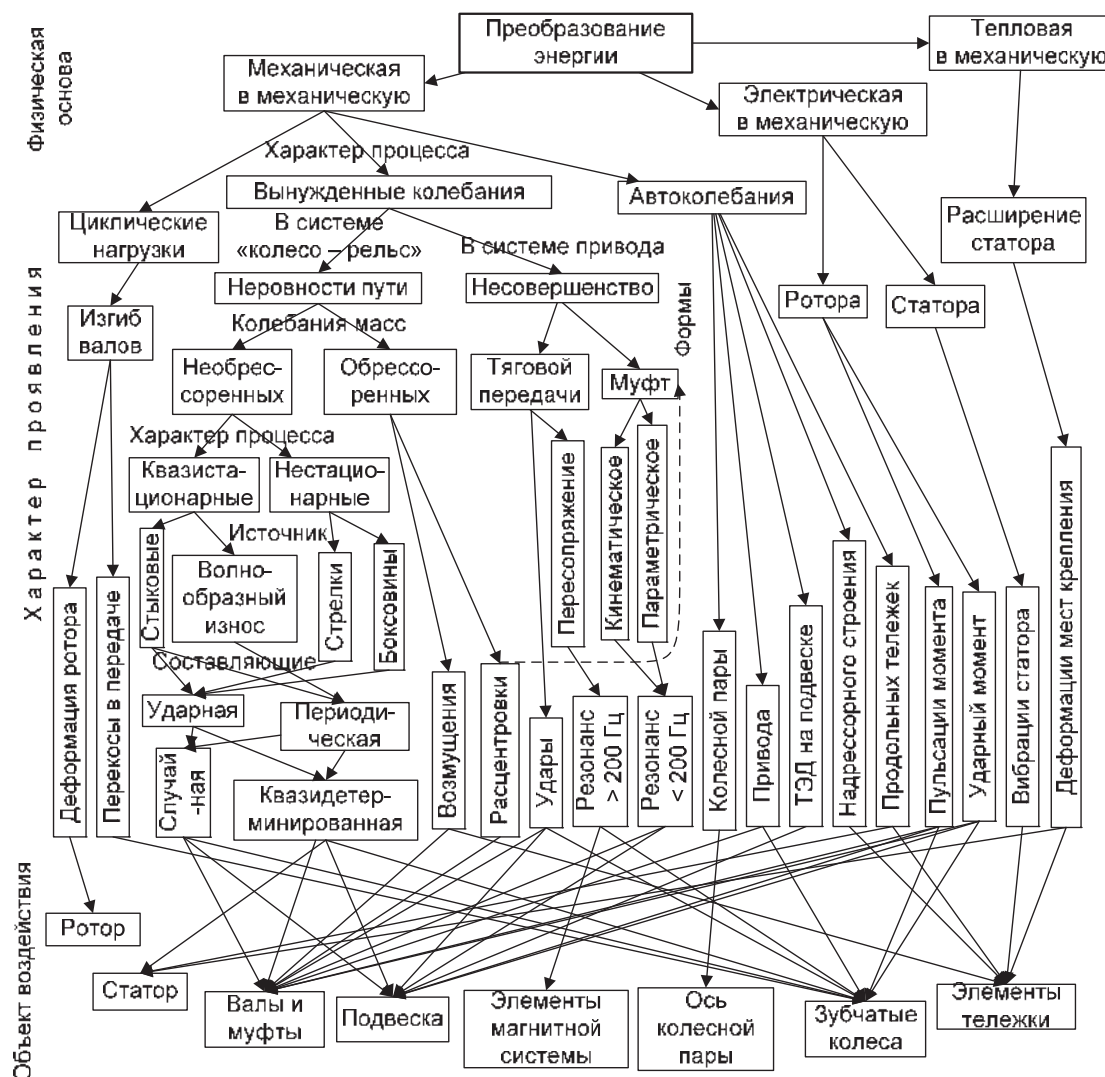


Рисунок 2 – Классификация динамических воздействий на тяговый привод

Корректность модели динамического процесса определяется возможностью в процессе ресурсных испытаний узлов воспроизвести их повреждаемость, соответствующую наблюдаемой в эксплуатации, чтобы прогнозировать технико-экономические показатели локомотива. Повреждаемость вызвана обычно факторами, обусловленными передачей энергии от его источника повреждаемому элементу.

Данная классификация облегчает поиск новых технических решений тягового привода. Например, как отмечено в работе [1], на железных дорогах продолжается использование тяговых приводов с осевым редуктором. Применение в этом типе привода двойной зубчатой муфты для соединения двигателя и редуктора имеет недостаток – как видно из классификации, на валы и муфты привода действуют динамические нагрузки, обусловленные целым рядом процессов, а двойная зубчатая муфта не обладает амортизирующими свойствами. Попытки же использовать в приводе такого типа эластичную дисковую резинокордную муфту

связаны с трудностями монтажа муфты под локомотивом, некачественный монтаж приводит к выходу муфты из строя. В связи с этим авторами предложен вариант резинокордной муфты, где затяжка резинокордных элементов производится до установки на локомотив и может быть автоматизирована.

Муфта (рисунок 3) включает в себя резинокордные элементы 1, нажимные кольца наружные 2 и внутренние 3, соединенные соответственно с наружным фланцем 4 и внутренним фланцем 5 с помощью болтов 6, гаек 7 и дистанционных колец 8, при этом наружный фланец 4 имеет дополнительные отверстия для болтов 9 для связи с деталью привода 11, а внутренний фланец – дополнительные отверстия для болтов 10 и торцевые шлицы для связи с деталью привода 12.

Передача крутящего момента осуществляется за счет трения между резинокордными элементами и фланцами муфты, а также торцевыми шлицами внутреннего фланца и болтовым соединением внешнего фланца. Конструкция муфты защищена патентом РФ на изобретение [2].

В опорно-осевых тяговых приводах замена траверсной подвески на подвеску типа «Серьга» обычно затруднена малыми габаритами размещения подвески, и, как следствие, высокими деформациями перекоса в шарнирах при поперечном перемещении ТЭД. Попытки уменьшить перекося шарнира за счет поперечного скольжения их по осям приводили к заклиниванию втулок на осях и разрушению шарниров. Авторами предложена конструкция подвески, которая лишена этого недостатка (рисунок 4). Она содержит ось колесной пары 1, поводок 2, посредством сайлентблоков 3 и 4 и осей 5 и 6 связанный с кронштейном 7 на корпусе двигателя 8 и рамой тележки 9. Нижний сайлентблок 3 смонтирован на оси с возможностью осевого перемещения в пределах $1 - 1,2$ мм от максимальной амплитуды поперечных перемещений колесной пары относительно рамы тележки. При этом резиновая втулка нижнего сайлентблока 3 имеет сферическую форму, а длина втулки верхнего сайлентблока 4 – не менее $2/3$ от величины межцентрового расстояния по шарнирам подвески L . Пространство между осью 5 и сайлентблоком 3 заполнено смазывающей жидкостью 10 с ферромагнитными наночастицами, а в кольцевой расточке нижнего сферического сайлентблока 3 установлены постоянные магниты 11. При поперечном перемещении кронштейна 7 втулка нижнего сайлентблока 3 скользит по оси 5 без перекоса поводка 2, поскольку длина t_v резиновой втулки верхнего сайлентблока – не менее $2/3$ от длины подвески L . Отсутствие перекоса поводка 2 приводит к отсутствию перекоса нижнего сайлентблока 3, в результате чего давление внутренней обоймы сайлентблока 3 на ось 5 распространяется равномерно по длине контакта сайлентблока 4 и оси 5, что предотвращает разрушение слоя смазочной жидкости 10 и заклинивание сайлентблока 4 на оси 5.

Благодаря сферической форме сайлентблока 3 непараллельность осей 5 и 6 сайлентблоков 3 и 4 также не вызывает неравномерного распределения давления внутренней обоймы сайлентблока 3 на ось 5 по длине контакта сайлентблока 4 и оси 5. Постоянные магниты 11 удерживают смазочную жидкость в зазоре между сайлентблоком 3 и осью 5, не допуская сухого трения и задиров. Таким образом, практически исключаются условия заклинивания внутренней втулки сайлентблока на оси вследствие износа поверхностей втулки и оси, изменения коэффициента трения от высыхания смазки, а также изменения жесткости резины вту-

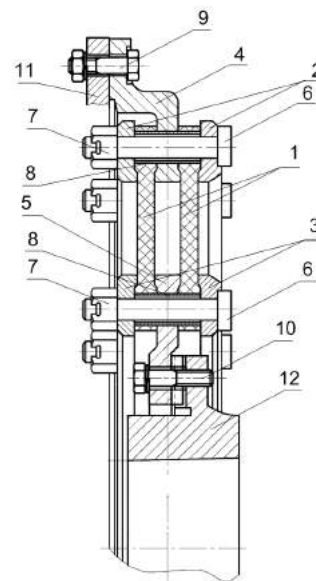


Рисунок 3 – Усовершенствованная конструкция резинокордной муфты

лок сайлентблоков при низкой температуре и вследствие старения резины. Конструкция подвески также защищена патентом РФ на изобретение [3]

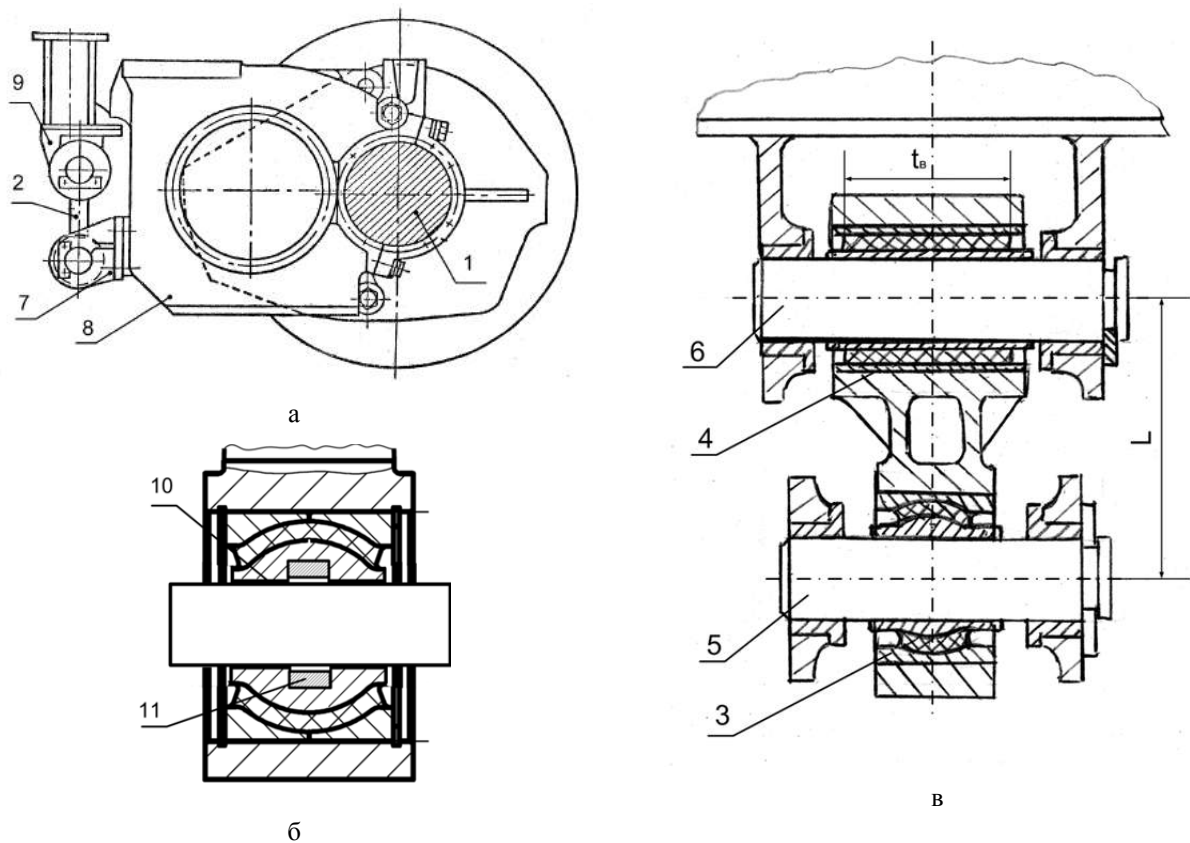


Рисунок 4 – Укороченная подвеска для ТЭД или осевого редуктора

Насущной проблемой после внедрения асинхронных ТЭД стало ослабление болтов крепления ТЭД к раме тележки, которое может возникать из-за температурных деформаций, вибраций и ударов. Как показала практика, достаточно надежно работают узлы крепления, аналогичные применяемым в тяговых приводах с полым валом на оси, но в них обычно затруднена вертикальная регулировка положения ТЭД. В связи с этим авторами предложена следующая конструкция крепления ТЭД (рисунок 5).

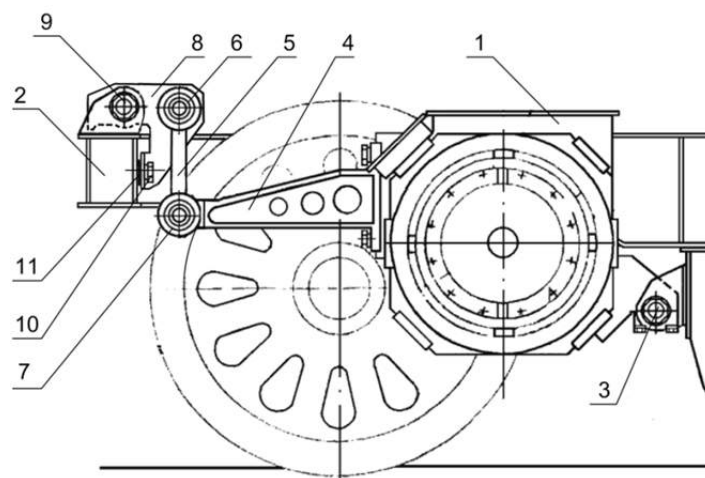


Рисунок 5 – Узел подвешивания ТЭД на тележке с резинометаллическими шарнирами: 1 – ТЭД, 2 – рама тележки; 3, 9 – валики; 4 – кронштейн; 5 – тяга; 6, 7 – резинометаллические шарниры; 8 – рычаг; 10 – болт; 11 – прокладка

При расширении остова ТЭД 1 конец кронштейна 4 свободно перемещается в горизонтальном направлении благодаря возможности закручивания резинометаллических шарниров 6 и 7. При возникновении резонансных колебаний ТЭД на раме тележки их величина снижается вследствие рассеивания энергии колебаний за счет трения резинометаллических шарниров 6 и 7 и на поверхностях валиков 3 и 9.

Регулировка соосности валов ТЭД и зубчатой муфты производится путем подбора толщины прокладки 11. Конструкция защищена патентом на полезную модель № 157051.

В результате проведенного анализа установлено, что использование научно-технической информации о динамических свойствах тягового привода затруднительно ввиду недостаточной систематизированности и противоречивости информации в большом числе источников, в условиях сложности и многообразия динамических процессов в тяговом приводе.

Предложена классификация динамических явлений в тяговых приводах, представляющая информацию об этих явлениях в интуитивно понятном виде. Классификация используется при создании новой конструкции резинокордной муфты тягового привода и узлов подвешивания ТЭД, конструкции которых защищены патентами.

Список литературы

1. Kolar J. Design of a Wheelset Drive [Text] / Josef Kolar // Transactions on Electrical Engineering, 2015. – Vol. 4. – №. 1. – P. 11 – 19.

2. Пат. 2527254 Российская Федерация, МПК F 16 D 3/78. Компенсационная муфта тягового привода локомотива [Текст] / Луков Н. М., Ромашкова О. Н. и др.; заявитель и патентообладатель Московский гос. ун-т путей сообщения. – № 2012154982/11; заявл. 19.12.2012; опубл. 27.08.2014, Бюл. № 24.

3. Пат. 2549427 Российская Федерация, МПК В 61 С 9/50. Узел подвешивания тягового электродвигателя тягового электродвигателя [Текст] / Пугачев А. А., Волохов С. Г. и др.; заявитель и патентообладатель Брянский гос. техн. ун-т. – № 2012154982/11; заявл. 25.02.2014; опубл. 27.04.2015, Бюл. № 12.

References

1. Kolar J. Design of a Wheelset Drive. Transactions on Electrical Engineering, Vol. 4 (2015), no. 1, pp. 11 – 19.

2. Lukow N. M., Romashkova O. N., Kosmodamianskii A. S., Popov Y. V., Strekalov N. N., Serene S. A., Mihalchenko G. S., Vorobiev V. I., Novikov V. G., Measured O. V., Pugachev A.A. Patent RU 2527254 F 16 D 3/78, 27.08.2014.

3. Pugachev A. A., Volohov S. G., Izmerov O. V., Vorobiev V. I., Mihalchenko G. S., Novikov V. G. Patent RU 2549427 B 61 C 9/50, 27.04.2015.

4.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Антипин Дмитрий Яковлевич

Брянский государственный технический университет (БГТУ).

50 лет Октября бульвар, д. 7, г. Брянск, 241035, Российская Федерация.

Кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Подвижной состав железных дорог», БГТУ.

Тел.: +7 (4832) 56-04-66.

E-mail: adya24@rambler.ru

Бондаренко Денис Андреевич

Брянский государственный технический университет (БГТУ).

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Antipin Dmitry Yakovlevich

Bryansk State Technical University (BSTU).

7, 50 years of October boulevard, Bryansk, 241035, Russian Federation.

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, head of the department «Railway rolling stock», BSTU.

Phone: (4832) 56-04-66.

Bondarenko Denis Andreevich

Bryansk State Technical University (BSTU).

7, 50 years of October boulevard, Bryansk, 241035, Russian Federation.

50 лет Октября бульвар, д. 7, г. Брянск, 241035, Российская Федерация.

Ассистент кафедры «Подвижной состав железных дорог», БГТУ.

Измеров Олег Васильевич

Администрация губернатора Брянской области и правительства Брянской области.

Ленина пр., д. 33, г. Брянск, 241002, Российская Федерация.

Главный консультант отдела информационных систем хозяйственного управления администрации губернатора Брянской области и правительства Брянской области.

Маслов Максим Александрович

Брянский государственный технический университет (БГТУ).

50 лет Октября бульвар, д. 7, г. Брянск, 241035, Российская Федерация.

Аспирант кафедры «Подвижной состав железных дорог», БГТУ.

The assistant of the department «Railway rolling stock» of the Bryansk State Technical University.

Izmerov Oleg Vasilevich

Governor of the Bryansk regional administration and the Government of the Bryansk region.

33, Lenin st., Bryansk, 241002, Russian Federation.

Chief consultant of the department of information systems of economic management of the Governor of the Bryansk regional administration and the Government of the Bryansk region.

Maslov Maksim Aleksandrovich

Bryansk State Technical University (BSTU).

7, 50 years of October boulevard, Bryansk, 241035, Russian Federation.

Graduate student of the Department «Railway rolling stock», BSTU.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Классификация динамических явлений в тяговом приводе локомотива [Текст] / Д. Я. Антипин, Д. А. Бондаренко и др. // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2016. – № 3 (27). – С. 17 – 23.

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Antipin D. Y., Bondarenko D. A., Izmerov O. V., Maslov M. A. Classification of dynamic phenomena in the traction drive locomotive. Journal of Transsib Railway Studies, 2016, vol. 27, no. 3, pp. 17 – 23. (In Russian).

УДК 629.4.02:621.01:51-7

В. Е. Гозбенко¹, А. И. Карлина²

¹Иркутский государственный университет путей сообщения (ИрГУПС),

²Иркутский национальный исследовательский технический университет (ИрНТУ),
г. Иркутск, Российская Федерация

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ВАГОНА С ДВУМЯ СТЕПЕНЯМИ СВОБОДЫ, НАХОДЯЩЕГОСЯ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ПЕРИОДИЧЕСКОЙ ВЫНУЖДАЮЩЕЙ СИЛЫ

Аннотация. Рассмотрены вынужденные колебания четырехосного транспортного средства, имеющего двойное рессорное подвешивание. Движение системы с шестью степенями свободы с достаточной точностью можно представить системой с двумя степенями свободы. Поэтому кузов транспортного средства обладает двумя степенями свободы: боковым отсосом и вилянием (подпрыгиванием и галопированием тележек будем пренебрегать). Общее число степеней свободы модели равно двум. Рассмотрен способ, который приводит к замкнутому решению для установившихся вынужденных колебаний. Определено, что при стремлении $\frac{k_1 T}{4}$ и $\frac{k_2 T}{4}$ к $\frac{n\pi}{2}$ ($n = 1, 2, \dots$) амплитуды колебаний будут неограниченными. Поэтому параметры k_1 , k_2 и T необходимо назначать исходя из требуемого значения амплитуд. В результате исследований составлены дифференциальные уравнения движения системы и получено аналитическое решение для случая приложения внешней кусочно-постоянной вынуждающей силы.

Ключевые слова: динамика, динамическая модель, колебания, кузов, модель неровности, колесо, возмущения, уравнения движения, жесткость, демпфирование, дифференциальные уравнения, обобщенное решение, аналитическое решение.

Valery E. Gozbenko¹, Antonina I. Karlina²

¹Irkutsk State Transport University (ISTU),

²Irkutsk National Research Technical University (INRTU), Irkutsk, Russia

THE MATHEMATICAL ACTION OF THE PERIODIC DRIVING FORCE ON A SYSTEM WITH TWO DEGREES OF FREEDOM

Abstract. Considered forced oscillations of four-axle vehicle with dual spring suspension. It is obtained that the movement system with six degrees of freedom with sufficient accuracy can be represented by a system with two degrees of freedom. Therefore, the vehicle body has two degrees of freedom: lateral skidding and wobbling. Bouncing and galloping trucks will be neglected. The total number of degrees of freedom of the model equal to two. The method, which leads to a closed solution of the forced oscillation. Defined. That tends $\frac{k_1 T}{4}$ and $\frac{k_2 T}{4}$ to $\frac{n\pi}{2}$ ($n = 1, 2, \dots$), the amplitude of the oscillations will be unlimited. Therefore, the parameters k_1 , k_2 and T must be selected on the basis of required values of amplitudes. As a result of research compiled by the differential equation of motion of the system and obtained analytical solution for the case of external piecewise constant driving force.

Keywords: dynamics, dynamic model, oscillations, automobile, model roughness, wheel, perturbations, motion equations, stiffness, damping, differential equations, generalized solution, analytical solution.

Исследования вынужденных колебаний на прямолинейном участке пути связаны с тем, что транспортное средство движется по некоторой направляющей, у которой имеются неизбежные неровности [1 – 3]. Колебания транспортного средства, вызванные неровностями, могут оказаться нежелательными в зависимости от частоты проявления этих неровностей по длине пути и от скорости экипажа.

Рассмотрим вынужденные колебания четырехосного транспортного средства, имеющего двойное рессорное подвешивание. Ранее получено, что движение системы с шестью степенями свободы с достаточной точностью можно представить системой с двумя степенями свободы. Поэтому примем, что кузов транспортного средства обладает двумя степенями свободы: подпрыгиванием и галопированием. Боковым отсосом, подергиванием, боковой качкой и вилянием будем пренебрегать. Общее число степеней свободы модели равно двум (рисунок 1).

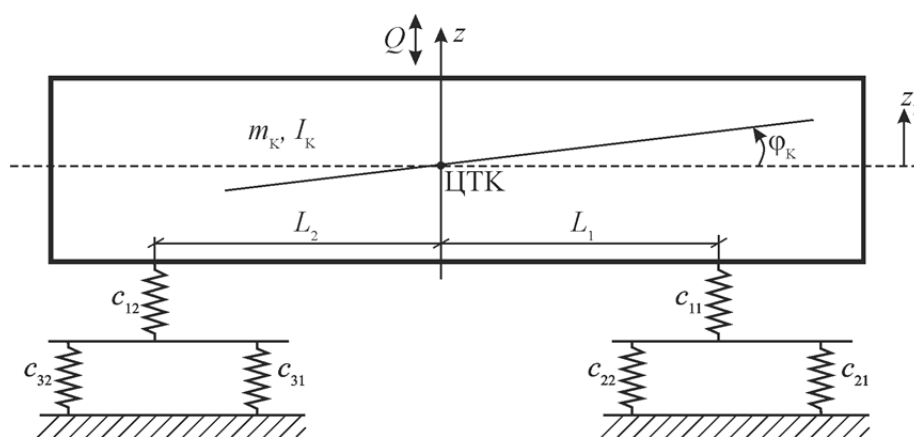


Рисунок 1 – Расчетная схема колебаний транспортного средства с двумя степенями свободы

Для исследования колебаний подрессоренных частей транспортного средства приняты обозначения: m_k , – масса кузова; I_k – момент инерции кузова при галопировании; c_{11} , c_{12} – вертикальная жесткость центрального подвешивания тележки; ϕ_k , – угловые перемещения кузова; $L_1 + L_2$ – база кузова.

Решим задачу определения установившихся вынужденных колебаний, вызываемых периодической кусочно-постоянной вынуждающей силой:

$$Q(t+T) = Q(t), \quad (1)$$

где T – период изменения силы (рисунок 2).

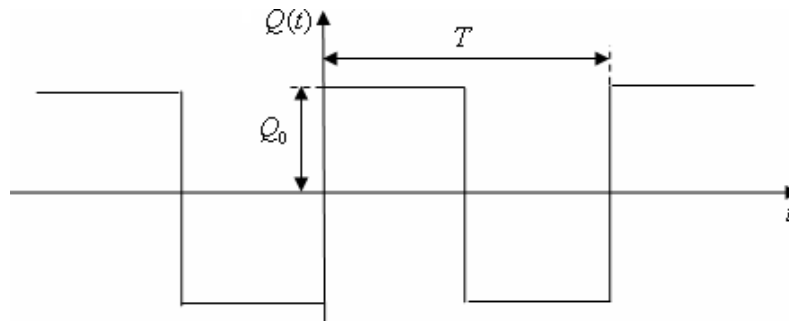


Рисунок 2 – Форма прилагаемой вынуждающей силы:

$$Q(t) = Q_0 \text{ при } 0 < t < \frac{T}{2}, \quad Q(t) = -Q_0 \text{ при } \frac{T}{2} < t < T$$

Рассчитав кинетическую и потенциальную энергию и используя уравнения Лагранжа II рода, получим систему дифференциальных уравнений [4 – 7]:

$$\begin{cases} m_K \ddot{z}_K + (c_{11} + c_{12})z_K + (c_{11}L_1 - c_{12}L_2)\varphi_K = Q(t); \\ I_K \ddot{\varphi}_K + (c_{11}L_1^2 + c_{12}L_2^2)\varphi_K + (c_{11}L_1 - c_{12}L_2)z_K = 0. \end{cases} \quad (2)$$

Для упрощения системы (2) положим $A_{11} = m_K$, $C_{11} = c_{11} + c_{12}$, $C_{12} = C_{21} = c_{11}L_1 - c_{12}L_2$, $A_{22} = I_K$, $C_{22} = c_{11}L_1^2 + c_{12}L_2^2$.

Тогда система (2) примет вид:

$$\begin{cases} A_{11}\ddot{z}_K + C_{11}z_K + C_{12}\varphi_K = Q(t); \\ A_{22}\ddot{\varphi}_K + C_{21}z_K + C_{22}\varphi_K = 0. \end{cases} \quad (3)$$

Перейдя к главным координатам

$$\begin{cases} z_K = q_1 + q_2; \\ \varphi_K = \mu_1 q_1 + \mu_2 q_2, \end{cases} \quad (4)$$

получим систему:

$$\begin{cases} a_1 \ddot{q}_1 + c_1 q_1 = Q(t); \\ a_2 \ddot{q}_2 + c_2 q_2 = Q(t), \end{cases} \quad (5)$$

или

$$\begin{cases} \ddot{q}_1 + k_1^2 q_1 = \frac{Q(t)}{a_1}; \\ \ddot{q}_2 + k_2^2 q_2 = \frac{Q(t)}{a_2}. \end{cases} \quad (6)$$

Здесь

$$\frac{A_2^{(1)}}{A_1^{(1)}} = -\frac{C_{11} - A_{11}k_1^2}{C_{12}} = \mu_1, \quad \frac{A_2^{(1)}}{A_1^{(1)}} = -\frac{C_{11} - A_{11}k_2^2}{C_{12}} = \mu_2; \quad (7)$$

$$\begin{cases} a_1 = A_{11} + A_{22}\mu_1^2; \\ a_2 = A_{11} + A_{22}\mu_2^2; \\ c_1 = C_{11} + 2C_{12}\mu_1 + C_{22}\mu_1^2; \\ c_2 = C_{11} + 2C_{12}\mu_2 + C_{22}\mu_2^2. \end{cases} \quad (8)$$

Собственные частоты k_1 и k_2 колебаний системы в главных координатах определяют по формулам: $k_1 = \sqrt{\frac{c_1}{a_1}}$ и $k_2 = \sqrt{\frac{c_2}{a_2}}$.

Рассмотрим способ, который приводит к замкнутому решению для установившихся вынужденных колебаний [8 – 16]. Рассматривая действие периодической силы (1), будем находить решения $q_1 = q_1(t)$, $q_2 = q_2(t)$, имеющие тот же период T , что и у силы, т. е. оно должно удовлетворять условиям периодичности:

$$q_{10}(0) = q_1(T); \quad \dot{q}_{10}(0) = \dot{q}_1(T); \quad q_{20}(0) = q_2(T); \quad \dot{q}_{20}(0) = \dot{q}_2(T). \quad (9)$$

Движение в интервале $[0, T]$ описывается выражениями:

$$\begin{cases} q_1 = q_{10} \cos k_1 t + \frac{\dot{q}_{10}}{k_1} \sin k_1 t + \frac{1}{a_1 k_1} \int_0^t Q(\xi) \sin k_1(t - \xi) d\xi; \\ q_2 = q_{20} \cos k_2 t + \frac{\dot{q}_{20}}{k_2} \sin k_2 t + \frac{1}{a_2 k_2} \int_0^t Q(\xi) \sin k_2(t - \xi) d\xi. \end{cases} \quad (10)$$

Для дальнейшего решения необходимо вывести выражения скорости $\dot{q}_1$ и $\dot{q}_2$:

$$\begin{cases} \dot{q}_1 = -q_{10} k_1 \sin k_1 t + \dot{q}_{10} \cos k_1 t + \frac{1}{a_1} \int_0^t Q(\xi) \cos k_1(t - \xi) d\xi; \\ \dot{q}_2 = -q_{20} k_2 \sin k_2 t + \dot{q}_{20} \cos k_2 t + \frac{1}{a_2} \int_0^t Q(\xi) \cos k_2(t - \xi) d\xi. \end{cases} \quad (11)$$

Для момента времени $t = T$ выражения (10) и (11) дают следующее:

$$\begin{cases} q_1(T) = q_{10} \cos k_1 T + \frac{\dot{q}_{10}}{k_1} \sin k_1 T + \frac{1}{a_1 k_1} \int_0^T Q(\xi) \sin k_1(T - \xi) d\xi; \\ q_2(T) = q_{20} \cos k_2 T + \frac{\dot{q}_{20}}{k_2} \sin k_2 T + \frac{1}{a_2 k_2} \int_0^T Q(\xi) \sin k_2(T - \xi) d\xi; \end{cases} \quad (12)$$

$$\begin{cases} \dot{q}_1(T) = -q_{10} k_1 \sin k_1 T + \dot{q}_{10} \cos k_1 T + \frac{1}{a_1} \int_0^T Q(\xi) \cos k_1(T - \xi) d\xi; \\ \dot{q}_2(T) = -q_{20} k_2 \sin k_2 T + \dot{q}_{20} \cos k_2 T + \frac{1}{a_2} \int_0^T Q(\xi) \cos k_2(T - \xi) d\xi. \end{cases} \quad (13)$$

Введем сокращенные обозначения для величин:

$$\int_0^T Q(\xi) \cos k_1 \xi d\xi = C_{01}, \quad \int_0^T Q(\xi) \sin k_1 \xi d\xi = S_{01}; \quad (14)$$

$$\int_0^T Q(\xi) \cos k_2 \xi d\xi = C_{02}, \quad \int_0^T Q(\xi) \sin k_2 \xi d\xi = S_{02}. \quad (15)$$

Учитывая условия (9) перепишем выражения (12), (13) в виде:

$$\begin{cases} q_{10} = q_{10} \cos k_1 T + \frac{\dot{q}_{10}}{k_1} \sin k_1 T + \frac{\sin k_1 T}{a_1 k_1} C_{01} - \frac{\cos k_1 T}{a_1 k_1} S_{01}; \\ q_{20} = q_{20} \cos k_2 T + \frac{\dot{q}_{20}}{k_2} \sin k_2 T + \frac{\sin k_2 T}{a_2 k_2} C_{02} - \frac{\cos k_2 T}{a_2 k_2} S_{02}; \end{cases} \quad (16)$$

$$\begin{cases} \dot{q}_1 = -q_{10} k \sin k_1 T + \dot{q}_{10} \cos k_1 T + \frac{\cos k_1 T}{a_1} C_{01} + \frac{\sin k_1 T}{a_1} S_{01}; \\ \dot{q}_2 = -q_{20} k \sin k_2 T + \dot{q}_{20} \cos k_2 T + \frac{\cos k_2 T}{a_2} C_{02} + \frac{\sin k_2 T}{a_2} S_{02}. \end{cases} \quad (17)$$

Из систем (16) и (17) найдем:

$$q_{10} = \frac{1}{2a_1 k_1} \left[C_{01} \operatorname{ctg} \frac{k_1 T}{2} + S_{01} \right], \quad \dot{q}_{10} = \frac{1}{2a_1} \left[S_{01} \operatorname{ctg} \frac{k_1 T}{2} - C_{01} \right]; \quad (18)$$

$$q_{20} = \frac{1}{2a_2 k_2} \left[C_{02} \operatorname{ctg} \frac{k_2 T}{2} + S_{02} \right], \quad \dot{q}_{20} = \frac{1}{2a_2} \left[S_{02} \operatorname{ctg} \frac{k_2 T}{2} - C_{02} \right]. \quad (19)$$

С помощью выражения (10) можно окончательно получить:

$$\begin{cases} q_1(t) = \frac{1}{2a_1 k_1} \left[\left(C_{01} \operatorname{ctg} \frac{k_1 T}{2} + S_{01} \right) \cos k_1 t + \right. \\ \left. + \left(S_{01} \operatorname{ctg} \frac{k_1 T}{2} - C_{01} \right) \sin k_1 t + 2 \int_0^t Q(\xi) \sin k_1 (t - \xi) d\xi \right]; \\ q_2(t) = \frac{1}{2a_2 k_2} \left[\left(C_{02} \operatorname{ctg} \frac{k_2 T}{2} + S_{02} \right) \cos k_2 t + \right. \\ \left. + \left(S_{02} \operatorname{ctg} \frac{k_2 T}{2} - C_{02} \right) \sin k_2 t + 2 \int_0^t Q(\xi) \sin k_2 (t - \xi) d\xi \right]. \end{cases} \quad (20)$$

После вычисления по формулам (14) и (15) получим:

$$C_{01} = \frac{2Q_0}{k_1} \sin k_1 T \left(1 - \cos \frac{k_1 T}{2} \right), \quad S_{01} = -\frac{2Q_0}{k_1} \cos k_1 T \left(1 - \cos \frac{k_1 T}{2} \right); \quad (21)$$

$$C_{02} = \frac{2Q_0}{k_2} \sin k_2 T \left(1 - \cos \frac{k_2 T}{2} \right), \quad S_{02} = -\frac{2Q_0}{k_2} \cos k_2 T \left(1 - \cos \frac{k_2 T}{2} \right). \quad (22)$$

Выражение (20) примет вид:

если $0 < t < \frac{T}{2}$ –

$$\begin{cases} q_1(t) = \frac{Q_0}{c_1} \left(1 - \cos k_1 t - \operatorname{tg} \frac{k_1 T}{4} \sin k_1 t \right); \\ q_2(t) = \frac{Q_0}{c_2} \left(1 - \cos k_2 t - \operatorname{tg} \frac{k_2 T}{4} \sin k_2 t \right), \end{cases} \quad (23)$$

если $\frac{T}{2} < t < T$ –

$$\begin{cases} q_1(t) = -\frac{Q_0}{c_1} \left[1 - \cos k_1 \left(t - \frac{T}{2} \right) - \operatorname{tg} \frac{k_1 T}{4} \sin k_1 \left(t - \frac{T}{2} \right) \right]; \\ q_2(t) = -\frac{Q_0}{c_2} \left[1 - \cos k_2 \left(t - \frac{T}{2} \right) - \operatorname{tg} \frac{k_2 T}{4} \sin k_2 \left(t - \frac{T}{2} \right) \right]. \end{cases} \quad (24)$$

При стремлении $\frac{k_1 T}{4}$ и $\frac{k_2 T}{4}$ к $\frac{n\pi}{2}$ ($n = 1, 2, \dots$) амплитуды колебаний будут неограниченными. Поэтому параметры k_1 , k_2 и T необходимо назначать исходя из требуемого ограниченного значения амплитуд.

В результате исследований составлены дифференциальные уравнения движения системы и получено аналитическое решение для случая приложения внешней кусочно-постоянной вынуждающей силы.

Список литературы

1. Ахмадеева, А. А. Рациональное задание числа степеней свободы динамической модели грузового вагона [Текст] / А. А. Ахмадеева, В. Е. Гозбенко // Системы. Методы. Технологии / Братский гос. ун-т. – Братск. – 2011. – № 12. – С. 25 – 28.
2. Вериго, М. Ф. Динамика вагонов [Текст] / М. Ф. Вериго. – М.: Транспорт, 1988. – 174 с.
3. Вершинский, С. В. Динамика вагона [Текст] / С. В. Вершинский, В. Н. Данилов, В. Д. Хусидов. – М.: Транспорт, 1991. – 360 с.
4. Гарг, В. К. Динамика подвижного состава [Текст] / В. К. Гарг, Р. В. Дуккипати. – М.: Транспорт, 1988. – 391 с.
5. Николаев, В. А. Разработка методов аналитического конструирования квазиинвариантных систем рессорного подвешивания железнодорожных экипажей: диссертация ... докт. техн. наук. – Омск, 2003. – 371 с.
6. Воротилкин, А. В. Математическая модель динамического взаимодействия в системе «колесо-рельс» с учетом их смазки [Текст] / А. В. Воротилкин, С. К. Каргапольцев, В. Е. Гозбенко; Иркутский гос. ун-т путей сообщения. – М., 2006. – 24 с. – Деп. в ВИНТИ. 13.02.2006. №152. В2006.
7. Оленцевич, В. А. Анализ причин нарушения безопасности работы железнодорожной транспортной системы [Текст] / В. А. Оленцевич, В. Е. Гозбенко // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование / Иркутский гос. ун-т путей сообщения. – Иркутск. – 2013. – № 1. – С. 180 – 183.
8. Ахмадеева, А. А. Динамические свойства вагона с двухступенчатым рессорным подвешиванием [Текст] / А. А. Ахмадеева, В. Е. Гозбенко // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование // Иркутский гос. ун-т путей сообщения. – Иркутск, 2010. – № 3. – С. 60 – 69.

9. Ахмадеева, А. А. Определение главных координат вагона с двухступенчатым рессорным подвешиванием [Текст] / А. А. Ахмадеева, В. Е. Гозбенко // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование / Иркутский гос. ун-т путей сообщения. – Иркутск. – 2011. – № 4. – С. 71 – 76.
10. Ахмадеева, А. А. Вертикальные колебания экипажа с упруго-подвешенным грузом [Текст] / А. А. Ахмадеева, В. Е. Гозбенко, С. К. Каргапольцев // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование / Иркутский гос. ун-т путей сообщения. – Иркутск. – 2012. – № 1. – С. 42 – 46.
11. Цисовски, Т. Совершенствование систем управления колебаниями подвижного состава железных дорог: диссертация ... докт. техн. наук. М., 2001. – 334 с.
12. Ахмадеева, А. А. Колебания экипажа с упруго-подвешенным грузом при силовом возмущении [Текст] / А. А. Ахмадеева, В. Е. Гозбенко, Е. М. Лыткина // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование / Иркутский гос. ун-т путей сообщения. – Иркутск. – 2012. – № 4 (36). – С. 47 – 50.
13. Гозбенко, В. Е. Вертикальные колебания экипажа с учетом неровностей пути [Текст] / В. Е. Гозбенко, А. А. Ахмадеева // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование / Иркутский гос. ун-т путей сообщения. – Иркутск. – 2013. – № 3 (39). – С. 56 – 59.
14. Пановко, Я. Г. Введение в теорию механических колебаний [Текст] / Я. Г. Пановко. – М.: Наука, 1989. – 252 с.
15. Хоменко, А. П. Особенности моделирования динамических процессов в задачах управления колебаниями сложных технических объектов [Текст] / А. П. Хоменко, С. В. Елисеев, В. Е. Гозбенко, В. И. Соболев, А. В. Димов, М. А. Драч, А. А. Титов, М. Ю. Богатов, Г. С. Солодов, Н. В. Банина, Е. Ю. Донская, А. В. Лукьянов, А. А. Засядко, Н. К. Кузнецов. 2005. – 218 с. – Деп. в ВИНТИ 22.02.2005, № 255-B2005.
16. Гозбенко, В. Е. Изменение динамического состояния упругосвязанных систем / В. Е. Гозбенко, А. П. Хоменко. 2002. – 37 с. – Деп. в ВИНТИ 23.07.2002, № 1379-B02.

References

1. Akhmadeeva A. A., Gozbenko V. E. Rational assignment of degrees of freedom dynamic fashion-whether freight car [Ratsional'noe zadanie chisla stepenei svobody dinamicheskoi modeli gruzovogo vagona]. Sistemy. Metody. Tekhnologii – Systems. Methods. Technologies, 2011, no. 12, pp. 25 – 28.
2. Verigo M. F. *Dinamika vagonov. Konspekt lektsii* (Dynamics wagons). Moscow: Transport, 1988, 174 p.
3. Vershinskii S. V., Danilov V. N., Khusidov V. D. *Dinamika vagona* (Dynamics wagon). Moscow: Transport, 1991, 360 p.
4. Garg V. K., Dukkipati R. V. *Dinamika podvizhnogo sostava*. (Dynamics of rolling stock). Moscow: Transport, 1988, 391 p.
5. Nikolaev V. A. *Razrabotka metodov analiticheskogo konstruirovaniia kvaziinvariant-nykh sistem resornogo podveshivaniia zhelezodorozhnykh ekipazhei* (Development of methods for analytical design of quasi-invariant systems of spring suspension of railway vehicles). Doctor's thesis, Omsk, OSTU, 2003, 371 p.
6. Vorotilkin A. V., Kargapol'tsev S. K., Gozbenko V. E. *Matematicheskaya model' dinamicheskogo vzaimodeistviia v sisteme «koleso-rel's» s uchetom ikh lubrikatsii* (Mathematical model of dynamic cooperation in the «wheel-rail» system, based on their lubrication). Irkutsk: ISTU, 2006, 24 p.
7. Olentsevich V. A., Gozbenko V. E. Analysis of the causes of security breaches in rail transport system [Analiz prichin narusheniia bezopasnosti raboty zhelezodorozhnoi transportnoi sistemy]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie – Modern technologies. System analysis. Simulation*, 2013, no. 1. pp. 180 – 183.

8. Akhmadeeva A. A., Gozbenko V. E. The dynamic properties of the car with two-spring suspension [Dinamicheskie svoistva vagona s dvukhstupenchatym ressonnym podveshivaniem]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie – Modern technologies. System analysis. Simulation*, 2010, no. 3, pp. 60 – 69.
9. Akhmadeeva A. A., Gozbenko V. E. Determination of the main coordinates of the car with two-stage springs nym suspending [Opredelenie glavnykh koordinat vagona s dvukhstu-penchatym ressonnym podveshivaniem]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie – Modern technologies. System analysis. Simulation*, 2011, no. 4, pp. 71 – 76.
10. Akhmadeeva A. A., Gozbenko V. E., Kargapol'tsev S. K. Vertical oscillations of the crew with an elastically-suspended load [Vertikal'nye kolebaniia eki-pazha s uprugo-podveshennym gruzom]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie – Modern technologies. System analysis. Simulation*, 2012, no. 1, pp. 42 – 46.
11. Tsisovski T. *Sovershenstvovanie sistem upravleniia kolebaniiami podvizhnogo sostava zheleznykh dorog* (Improved vibration control systems, railway rolling stock). Moscow: MSTU, 2001, 334 p.
12. Akhmadeeva A. A., Gozbenko V. E., Lytkina E. M. Crew oscillations with uprugopodveshennym load when the power perturbations [Kolebaniia ekipazha s uprugo-podveshennym gruzom pri silovom vozmushchenii]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie – Modern technologies. System analysis. Simulation*, 2012, no. 4 (36), pp. 47 – 50.
13. Gozbenko V. E., Akhmadeeva A. A. Vertical oscillations of the crew, taking into account the rough ways [Vertikal'nye kolebaniia ekipazha s uchetom nerovno-stei puti]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie – Modern technologies. System analysis. Simulation*, 2013, no. 3 (39), pp. 56 – 59.
14. Panovko Ia. G. *Vvedenie v teoriyu mekhanicheskikh kolebaniy* (Introduction to the theory of mechanical oscillations). Moscow: Nauka, 1989, 252 p.
15. Khomenko A. P., Eliseev S. V., Gozbenko V. E., Sobolev V. I., Dimov A. V., Drach M. A., Titov A. A., Bogatov M. Iu., Solodov G. S., Banina N. V., Donskaia E. Iu., Luk'ianov A. V., Zasiadko A. A., Kuznetsov N. K. *Features simulation of dynamic processes in the problem-chah vibration control of complex technical objects* [Osobennosti modelirovaniia dinamicheskikh protsessov v zada-chakh upravleniia kolebaniiami slozhnykh tekhnicheskikh ob"ektov]. 2005, 218 p.
16. Gozbenko V. E., Khomenko A. P. *Changing the dynamic state uprugosvyazannykh systems* [Izmenenie dinamicheskogo sostoiianiia uprugosviazannykh system]. 2002, 37 p.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Гозбенко Валерий Ерофеевич

Иркутский государственный университет путей сообщения (ИрГУПС).

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

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

Тел.: +7 (3952) 63-83-57.

E-mail: vgozbenko@yandex.ru

Карлина Антонина Игоревна

Иркутский национальный исследовательский технический университет (ИрНТУ).

Лермонтова ул., д. 83, г. Иркутск, 664074, Российская Федерация.

Заместитель начальника управления научной деятельностью.

E-mail: karlinat@mail.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Gozbenko Valery Erofeyvich

Irkutsk State Transport University (ISTU).

15, Chernishevsky str., Irkutsk, 664074, Russia.

Dr. Sci. Tech, professor of department «Mathematics», ISTU.

Phone: +7 (3952) 63-83-57.

E-mail: vgozbenko@yandex.ru

Karlina Antonina Igorevna

Irkutsk National Research Technical University (INRTU).

83, Lermontov st., Irkutsk, 664074, Russia/

Deputy Head of the research activities.

E-mail: karlinat@mail.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Гозбенко, В. Е. Математическая модель вагона с двумя степенями свободы, находящегося под действием периодической вынуждающей силы [Текст] / В. Е. Гозбенко, А. И. Карлина // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2016. – № 3 (27). – С. 23 – 31.

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Gozbenko V. E., Karlina A. I. The mathematical action of the periodic driving force on a system with two degrees of freedom. Journal of Transsib Railway Studies, 2016, vol. 27, no. 3, pp. 23 – 31. (In Russian).

УДК 629.4.025

А. В. Жебанов

Самарский государственный университет путей сообщения (СамГУПС), г. Самара, Российская Федерация

ПУТИ СНИЖЕНИЯ ТЕПЛОПOTЕРЬ ВЯЗКИХ НЕФТЕГРУЗОВ ПРИ ТРАНСПОРТИРОВКЕ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫМ ТРАНСПОРТОМ

Аннотация. Перевозка застывающих грузов железнодорожным транспортом, а именно вагонами-цистернами, сопровождается рядом трудностей. К их числу относятся понижение температуры перевозимого нефтепродукта, вызывающее повышение его вязкости, невозможность быстрой разгрузки, изменение эксплуатационных характеристик перевозимых нефтепродуктов, увеличение простоя вагонов-цистерн. Приведен анализ скорости охлаждения перевозимых грузов в зависимости от размеров и толщины теплоизолирующего слоя. Введенные формулы показывают, что наличие теплоизолирующей оболочки вызывает отклонение радиуса цилиндрической емкости от оптимального значения. При этом тепловая изоляция существенно снижает коэффициент теплопередачи в окружающее пространство и способствует ускорению процесса выгрузки.

Ключевые слова: перевозка застывающих грузов, вагон-цистерна, сохранение температуры, изменение эксплуатационных характеристик топлива, теплоизоляционные материалы.

Alexander V. Zhebanov

Samara State Transport University (SSTU), Samara, the Russian Federation

WAYS TO REDUCE A HEAT LOSS VISCOUS OIL CARGO DURING RAILWAY TRANSPORTATION

Abstract. Solidifying transportation of goods by rail, namely, tank wagons is accompanied a number of difficulties. These include: lowering the temperature of the transported oil, accompanied by the growth of its viscosity, the inability to quickly discharge, change in performance of transported oil products, an increase in idle tank cars. The analysis of the cooling rate of the goods transported, depending on the size and thickness of the insulating layer. Introduced formulas show that the presence of the heat-insulating sheath is cylindrical vessel radius deviation from the optimum value. When this thermal insulation reduces considerably the heat transfer coefficient in the surrounding area and to accelerate the discharge process.

Keywords: transportation of solidifying cargo, tank-wagon, temperature preservation, change of operational characteristics of the fuel, thermal insulation materials.

Вязкие, застывающие и затвердевающие нефтепродукты (мазуты, масла, парафинистые нефти, битум и др.) при транспортировке железнодорожным транспортом погружают, как правило, в вагоны-цистерны в разогретом состоянии с температурой 60 – 80 °С.

При транспортировке нефтепродукты охлаждаются, переходят в вязкое состояние, затрудняющее, а в некоторых случаях даже делающее невозможным их выгрузку без предварительного разогрева различными способами.

В данной статье рассмотрены вопросы по оценке влияния размеров и толщины теплоизолирующей оболочки транспортной емкости на скорость охлаждения нефтегруза, а также во-

просы по определению его оптимальной температуры, обеспечивающей минимальные затраты тепловой энергии на разогрев, но достаточной для обеспечения его выгрузки самотеком.

Теоретически цистерну заданной вместимости можно изготовить в различных вариантах по диаметру и длине с учетом допустимых габаритов подвижного состава, но оптимальные ее размеры определяются еще при взятии во внимание потери теплоты транспортируемого продукта в процессе перевозки и выгрузки.

Сделаем оценку размеров цилиндрической емкости радиуса R и длины L с горячим нефтепродуктом, имеющим температуру T , осуществляющим теплопередачу в окружающее пространство, где температура воздуха составляет T_g . Оценим условия, при которых обеспечиваются минимальные потери теплоты.

Обозначим через V объем цистерны, через F – площадь теплоотдающей поверхности:

$$V = \pi R^2 L; \quad (1)$$

$$F = 2\pi R^2 + 2\pi RL = 2\pi R(R + L). \quad (2)$$

Из равенств (1), (2) следует:

$$\frac{F}{V} = \frac{2}{L} + \frac{2}{R}. \quad (3)$$

Стенка цистерны может быть однослойной и многослойной. В простейшем случае стенку цистерны образует один слой – обечайка котла. Стенку теплоизолированной цистерны образуют три слоя – стальной корпус котла толщиной $h_{ст}$, слой тепловой изоляции толщиной $h_{ти}$ и стальной внешний лист толщиной h_3 , защищающий тепловую изоляцию от повреждений и атмосферных осадков. Обозначим коэффициенты теплопроводности стальных слоев через $\lambda_{ст}$, а слоя тепловой изоляции – через $\lambda_{ти}$, Вт/м °С.

Каждый слой создает свое термическое сопротивление h_i/λ_i . Термическое сопротивление многослойной стенки равно сумме термических сопротивлений слоев.

Количество теплоты, теряемое нефтепродуктом за время t , можно определить по формуле:

$$Q = kF(T - T_g)t, \quad (4)$$

здесь k – коэффициент теплопередачи от горячего нефтепродукта в окружающее пространство через многослойную стенку цистерны,

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \sum_{i=1}^n \frac{h_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_2}}. \quad (5)$$

В равенстве (5) записаны коэффициенты внешней теплоотдачи α_1 от стенки в окружающее пространство и внутренней теплоотдачи α_2 от жидкого нефтепродукта к стенке емкости, Вт/м² °С.

Величины $1/\alpha_1$ и $1/\alpha_2$ называются соответственно термическими сопротивлениями внешней и внутренней теплоотдачи.

Коэффициент внешней α_1 теплоотдачи определяется коэффициентом теплопроводности воздуха λ_g , Вт/м °С, максимальным размером емкости (длиной котла) L и критерием Рейнольдса Re :

$$\alpha_1 = 0,056 \frac{\lambda_g}{L} Re^{0,8}. \quad (6)$$

Критерий Рейнольдса является безразмерным комплексом, который образуют значения скорости ветра u , м/с, кинематической вязкости воздуха ν_g , м²/с, и радиуса емкости R :

$$Re = \frac{uR}{\nu_g}. \quad (7)$$

Коэффициент внутренней теплоотдачи α_2 от жидкости, движущейся за счет естественной конвекции, к стенке определяется по формуле [1]:

$$\alpha_2 = 0,38 \frac{\lambda_{ж}}{R} Ra_{ж}^{0,25} \cdot \left(\frac{Pr_{ж}}{Pr_{ст}} \right)^{0,25}; \quad n = \frac{1}{4} \quad \text{при} \quad Ra_{ж} < 10^9, \quad (8)$$

здесь Ra и Pr – соответственно критерии Релея и Прандтля – безразмерные комплексы, которые кроме перечисленных образуют следующие физические величины: g – ускорение свободного падения, м/с², а также характеристики жидкого нефтепродукта: β – коэффициент объемного теплового расширения, 1/°C; ν – кинематическая вязкость, м²/с; a – теплопроводность, м²/с.

$$Ra = \frac{8R^3 g \beta (T - T_{ст})}{\nu a}; \quad (9)$$

$$Pr = \frac{\nu}{a}. \quad (10)$$

Индексы «ж» и «ст» означают, что данные, характеризующие значения критериев Релея и Прандтля, берутся при средней температуре нефтепродукта и стенки емкости.

Численные значения коэффициента α_1 и термические сопротивления внешней теплоотдачи при различных скоростях воздушного потока представлены в таблице 1, аналогичные величины для внутренней теплоотдачи стенке цистерны даны в таблице 2.

Таблица 1 – Значения коэффициента и термического сопротивления внешней конвективной теплоотдачи при различных скоростях воздушного потока

Скорость потока		α_1	$1/\alpha_1$
м/с	км/ч	Вт/м ² °C	м ² °C/Вт
10	36	25,4	0,0384
15	54	35,5	0,0282
20	72	48,7	0,0205

Таблица 2 – Значения коэффициента и термического сопротивления внутренней теплоотдачи от циркулирующего нефтепродукта стенке котла цистерны

Нефтепродукт	Pr (безразм.)	$Ra \cdot 10^9$ (безразм.)	α_2 (Вт/м ² °C)	$1/\alpha_2$ (м ² °C/Вт)
Мазут флотский	1320 – 60	109,8 – 40,75	6,00 – 9,32	0,167 – 0,107
Мазут М40	13500 – 1440	5,75 – 15,70	6,00 – 8,56	0,166 – 0,112
Мазут М100	141000 – 3300	1,62 – 7,00	4,83 – 8,00	0,207 – 0,126

Котел изготавливается из стали 09ГС по ГОСТ 5520-79 с коэффициентом теплопроводности $\lambda_{ст} = 40$ Вт/м°С и имеет толщину $h_{ст1} \approx 10^{-2}$ м, толщина внешнего, защитного листа $h_{ст3} \approx 2 \cdot 10^{-3}$ м. При этом термическое сопротивление первого и третьего слоев стенки составляет: $h_{ст}/\lambda_{ст} = 1,72 \cdot 10^{-4}$ м²°C/Вт и $h_{ст}/\lambda_{ст} = 0,34 \cdot 10^{-4}$ м²°C/Вт соответственно.

Слой тепловой изоляции имеет коэффициент теплопроводности $\lambda_{т.и} = 0,03$ Вт/м°С. При толщине слоя $h_{т.и} \approx 6 \cdot 10^{-2}$ м его термическое сопротивление $h_{ст}/\lambda_{ст} = 2,0$ м²°C/Вт, т. е. в 10000 раз больше, чем у двух других слоев вместе взятых.

Сравнивая данные таблиц 1 и 2, видим, что термическое сопротивление внешней теплоотдачи тоже существенно меньше термического сопротивления внутренней теплоотдачи, т. е. $1/\alpha_2 > 1/\alpha_1$.

Пренебрегая названными малыми величинами, упростим равенство (5):

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_2} + \frac{h_{из}}{\lambda_{из}}}. \quad (11)$$

Определяем радиус емкости R , при котором потери теплоты в окружающее пространство будут минимальными. В равенстве (3) от этого радиуса зависит лишь произведение kF . Экстремальное значение этого произведения находим, приравнявая производную к нулю:

$$\frac{\partial(kF)}{\partial R} = 0. \quad (12)$$

Очевидно, что это равенство можно записать так:

$$\frac{\partial(kF)}{\partial R} = \frac{\partial k}{\partial R} F + \frac{\partial F}{\partial R} k = 0. \quad (13)$$

Используя уравнения (3) – (6) и выполняя дифференцирование, получим:

$$\frac{\partial k}{\partial R} F = \frac{1}{k^2} \left(\frac{1}{\alpha_2^2} \frac{\partial \alpha_2}{\partial R} \right) F; \quad (14)$$

$$\frac{\partial F}{\partial R} k = 2\pi(2R + L)k. \quad (15)$$

Для нахождения производной $\frac{\partial \alpha_2}{\partial R}$ подставим формулу (9) в (8) и выделим радиус R из получаемого соотношения:

$$\alpha_2 = 0,075 \frac{\lambda_i}{R} \left(\frac{Pr_{ж}}{Pr_{ст}} \right)^{0,25} \cdot \left[\frac{8g\beta(T - T_{ст})}{\nu a} \right]^{0,25} \cdot R^{\frac{3}{4}} = YR^{-0,25}, \quad (16)$$

где

$$Y = w\lambda \cdot \left(\frac{Pr_{ж}}{Pr_{ст}} \right)^{1/4} \cdot \left[\frac{8g\beta(T - T_{ст})}{\nu a} \right]^{0,25}, \quad (17)$$

при этом

$$\frac{1}{\alpha_2^2} \frac{\partial \alpha_2}{\partial R} = \frac{1}{Y^2 R^{6n-2}} \cdot Y \left((3n-1)R^{3n-2} \right) = \frac{1}{Y} \frac{3n-1}{R^{3n}}. \quad (18)$$

Подстановка соотношений (3) и (17) в (12) дает:

$$\frac{\partial k}{\partial R} F = \frac{2\pi}{k^2} \left(\frac{3n-1}{YR^{3n-1}} \right) \cdot (R + L). \quad (19)$$

Второе слагаемое в равенстве (12) будет таким:

$$\frac{\partial F}{\partial R} k = 2\pi(2R + L)k. \quad (20)$$

Подставляя равенства (3), (18) и (19) в (12) и приравнявая полученное соотношение к нулю согласно условию (11), после несложных преобразований получим:

$$\frac{2\pi}{k^2} \left(\frac{3n-1}{YR^{3n-1}} \right) \cdot (R + L) + 2\pi(2R + L)k = 0 \quad (21)$$

или

$$\left(\frac{3n-1}{YR^{3n-1}} \right) (R + L) + (2R + L)k^3 = 0. \quad (22)$$

Введенные формулы показывают, что наличие теплоизолирующей оболочки вызывает отклонение радиуса цилиндрической емкости от оптимального значения, обеспечивающего минимальные потери теплоты в окружающее пространство, но это отклонение незначительно. При этом тепловая изоляция существенно снижает коэффициент теплопередачи в окружающее пространство k .

Рассмотрим влияние толщины тепловой изоляции на сокращение потерь теплоты в зависимости от заданного темпа охлаждения.

Пусть в момент времени t_1 перепад температур между средней температурой нефтепродукта и окружающей среды равен ΔT_1 , а в момент времени t_2 он составляет ΔT_2 .

Темпом охлаждения нефтепродукта называется величина [2]

$$m = \frac{\ln \left(\frac{\Delta T_1}{\Delta T_2} \right)}{t_1 - t_2}. \quad (23)$$

Темп охлаждения определяется равенством:

$$m = \frac{kF}{VC\rho}, \quad (24)$$

где C – удельная теплоемкость охлаждаемой емкости с нефтепродуктом, Дж/кг °С; ρ – плотность нефтепродукта, кг/м³.

Из выражения (10) следует, что при наличии теплоизолирующего слоя коэффициент теплопередачи

$$k \approx \frac{\lambda_{из}}{h_{из}}. \quad (25)$$

Подставляя соотношения (25) в (24), получаем равенство, устанавливающее связь между толщиной теплоизолирующей оболочки $h_{из}$ и темпом охлаждения цистерны с нефтегрузом:

$$m = 2 \frac{\lambda_{из}}{h_{из}} \cdot \frac{1}{C\rho} \left(\frac{1}{R} + \frac{1}{L} \right). \quad (26)$$

Рассмотрим вариант пенополиуретановой тепловой изоляции, установленной на 60-тонной цистерне, для которой коэффициент теплопроводности $\lambda_{из} = 0,03$ Вт/м °С с нефтепродуктом (удельная теплоемкость $C = 2000$ Дж/кг °С, плотность $\rho = 950$ кг/м³).

Предложено нанести на поверхность железнодорожной цистерны слой теплоизоляционного покрытия специального состава пенополиуретана (срок службы – 30 лет), чтобы использовать его для транспортировки груза без застывания (рисунок). При этом стоимость модифицированной цистерны возрастает на 5 – 10 %, а затраты на выгрузку и простой вагонов снижаются в несколько раз [3].

Способность сохранять тепло – основная функция теплоизоляционного материала – оценивается коэффициентом теплопроводности.

Сравнение коэффициентов теплопроводности – стеклянной ваты 0,033 – 0,042; минеральной ваты 0,032 – 0,056; вспененного полиэтилена 0,032 – 0,038; вспененного каучука 0,034 – 0,038; пенополиуретана 0,028 – 0,040 – позволяет сделать выбор в пользу пенополиуретана (по данному критерию).



Теплоизоляционный слой на опытном образце

Качество любого утеплителя определяют коэффициент теплопроводности, срок службы и т. д. По таким важным показателям, как теплопроводность, влагопоглощение, срок эксплуатации пенополиуретана (ППУ), превосходит все существующие в настоящее время утеплители [4].

Структурная характеристика пенополиуретана отличается от других теплоизолирующих материалов своей пористостью, выражающейся в создании ячеек, минимального размера, которые в свою очередь заполнены газообразным веществом. Оставшуюся часть материала составляет твердая часть (1 – 2 % от всего объема нанесенного слоя), сформированная тонкими стенками данных ячеек. В качестве основы материала применяются продукты нефтехимической переработки, такие как полиолы и полиизоцианаты. Существует также технологии производства пенополиуретана из масел на основе растительного сырья.

В зависимости от пропорции используемых исходных компонентов при производстве материала есть возможность подбора конкретных качеств пенополиуретана (повышенная жесткость, мягкого типа, вязкоэластичный, высокоэластичный и др.), при этом образовавшиеся ячейки будут иметь различные геометрические параметры и прочностные характеристики [5].

Используя формулу (26), вычислим зависимость между толщиной теплоизолирующей оболочки и темпом охлаждения нефтегруза в цистерне.

При рассмотрении темпа охлаждения примем, что разность температур между горячим нефтепродуктом, нагретым до плюс 90 °С, и окружающей средой с температурой минус 30 °С $\Delta T = 120$ °С.

Данные выполненных расчетов представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Зависимость между толщиной теплоизолирующей оболочки на цистерне и темпом охлаждения нефтегруза, перевозимого в ней

Цистерна				Толщина изоляции $h_{из}$, см	Темп охлаждения $m \cdot 10^4$, град/ч	Охлаждение в сутки
Вместимость, m^3	Длина, м	Диаметр, м	$\frac{F}{V}$	49,00	3,5	на 1 °С
61,2	10,3	3,00		24,10	7,1	на 2 °С
				16,20	10,5	на 3 °С
				9,80	17,5	на 4,8 °С
				4,80	36,0	на 10 °С

Из данных таблицы 3 следует, что на железнодорожной цистерне с горячим нефтепродуктом, перевозимым в течение пяти суток, должна быть установлена пенополиуретановая теплоизолирующая оболочка толщиной 5 см.

Нефтепродукт, налитый в цистерну при температуре 80 – 90 °С, будет прибывать в пункт выгрузки с ориентировочной средней температурой 40 – 50 °С. При такой температуре слив нефтегруза самотеком можно производить без дополнительного предварительного разогрева.

Список литературы

1. Михеев, М. А. Основы теплопередачи [Текст] / М. А. Михеев, И. М. Михеева. – М.: Энергия, 1977. – 344 с.
2. Антипов, В. Н. Хранение нефти и нефтепродуктов [Текст] / В. Н. Антипов. – М.: Нефть и газ, 2003. – 556 с.
3. Бахтизин, Р. Н. Транспорт и хранение высоковязких нефтей и нефтепродуктов. Применение электроподогрева [Текст] / Р. Н. Бахтизин. – М.: Химия, 2004. – 193 с.
4. Коршак, А. А. Ресурсосберегающие методы и технологии при транспортировке и хранении нефти и нефтепродуктов [Текст] / А. А. Коршак. – Уфа: Дизайн Полиграф-Сервис, 2006. – 191 с.
5. Жебанов, А. В. Взаимодействие теплоизоляционного слоя цистерны с окружающей средой с точки зрения экологической безопасности и с учетом утилизации отходов [Текст] / А. В. Жебанов // Вестник транспорта Поволжья / Самарский гос. ун-т путей сообщения. – Самара. – 2012. – № 4. – С. 19 – 23.
6. Жебанов, А. В. Исследование и основные критерии выбора теплоизоляционного материала в применении для подвижного состава железных дорог [Текст] / А. В. Жебанов // Материалы региональной науч.-практ. конф. «Образование, наука, транспорт в XXI в.: опыт, перспективы, инновации» / Оренбургский гос. ин-т путей сообщения. – Оренбург, 2010. – С. 17, 18.
7. Жебанов А. В. Полный цикл работы цистерны с теплоизоляцией: от нанесения покрытия, эксплуатации, ремонта до утилизации [Текст] / А. В. Жебанов // Транспорт Урала / Уральский гос. ун-т путей сообщения. – Екатеринбург. – 2012. – № 1. – С. 51 – 54.

References

1. Mikheyev M. A., Mikheyeva I. M. *Osnovy teploperedachi* (Heat transfer bases). Moscow: Energy, 1977, 344 p.
2. Antipov V. H. *Khranenie nefiti i nefteproduktov* (Storage of oil and oil products). Moscow: Oil and Gas, 2003, 556 p.
3. Bakhtizin R. N. *Transport i khranenie vysokoviazkikh neftei i nefteproduktov. Primenenie elektropodogreva* (Transport and storage of high-viscosity oils and petroleum products. The use of electrical heating). Moscow: Chemistry, 2004, 193 p.
4. Korshak A. A. *Resursosberegaiushchie metody i tekhnologii pri transportirovke i khranении nefiti i nefteproduktov* (Resource-saving techniques and technologies in the transportation and storage of oil and oil products). Ufa: Design Polygraph-Service, 2006, 191 p.
5. Zhebanov A. V. Interaction of a heat-insulation layer of the tank with environment from the point of view of ecological safety and taking into account recycling [Vzaimodeistvie teploizoliatsionnogo sloia tsisterny s okruzhaiushchei sredoi s tochki zreniia ekologicheskoi bezopasnosti i s uchetom utilizatsii otkhodov]. *Vestnik transporta Povolzh'ia – Messenger of transport of the Volga region*, 2012, no. 4, pp. 19 – 23.
6. Zhebanov A. V. Research and the main criteria of the choice of heat-insulating material in application for a rolling stock of the railroads. [Issledovanie i osnovnye kriterii vybora teploizoliatsionnogo materiala v primenenii dlia podvizhnogo sostava zheleznykh dorog]. *Materialy regional'noi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Obrazovanie, nauka, transport v KhKhI v.: opyt per-*

spektivy innovatsii» (Education, science, transport in the XXI century: experience of prospect of an innovation: Materials of regional scientific and practical conference). Orenburg, 2010, pp. 17 – 18.

7. Zhebanov A. V. Full cycle of operation of the tank with thermal insulation: from drawing a covering, operation, repair before utilization [Polnyi tsikl raboty tsisterny s teploizoliatsiei: ot naneseniia pokrytiia, ekspluatatsii, remonta do utilizatsii]. *Transport Urala – The Transport of the Urals*, 2012, pp. 51 – 54.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Жебанов Александр Владимирович

Самарский государственный университет путей сообщения (СамГУПС).

1-й Безымянный пер., д. 18, г. Самара, 443066, Российская Федерация.

Старший преподаватель кафедры «Вагоны», СамГУПС.

E-mail: zhebanov @inbox.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Zhebanov Aleksandr Vladimirovich

Samara State Transport University (SSTU).

18, Unnamed 1st st., Samara, 443066, the Russian Federation.

Senior lecturer of the department «Cars», SSTU.

E-mail: zhebanov @inbox.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Жебанов, А. В. Пути снижения теплотерь вязких нефтегрузов при транспортировке железнодорожным транспортом [Текст] / А. В. Жебанов // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2016. – № 3 (27). – С. 31 – 38.

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Zhebanov A. V. Ways to reduce a heat loss viscous oil cargo during railway transportation. *Journal of Transsib Railway Studies*, 2016, vol. 27, no. 3, pp. 31 – 38. (In Russian).

УДК 621.316.722.076.12

В. Н. Ли, Н. К. Шурова

Дальневосточный государственный университет путей сообщения (ДВГУПС), г. Хабаровск, Российская Федерация

ОСОБЕННОСТИ ВЫБОРА КОМПЕНСИРУЮЩИХ УСТРОЙСТВ В ТЯГОВОЙ СЕТИ ПО КРИТЕРИЯМ ОПТИМАЛЬНОСТИ

Аннотация: В работе представлена методика выбора мест установки и мощности компенсирующих устройств в тяговой сети с учетом роста объемов перевозок. Обозначены подходы к нахождению критериев оптимальности управления потоками реактивной энергии установкой компенсации реактивной мощности. Предложены к рассмотрению три критерия для оценки оптимальности установки компенсирующих устройств в тяговой сети: снижение потерь активной энергии, повышение уровня напряжения у потребителя, разгрузка питающих линий электропередач. Приведена методика оценки оптимальности такого выбора.

Ключевые слова: оптимальность, критерии, реактивная энергия, компенсация реактивной мощности.

Valerii N. Li, Natalia K. Shurova

Far Eastern State Transport University (FESTU), Khabarovsk, Russian Federation

FEATURES OF COMPENSATING DEVICES CHOICE IN TRACTION POWER SUPPLY SYSTEM WITH USING OPTIMALLY CRITERION

Abstract. Method of installation places and power choice of reactive power compensation devises in traction power supply system in condition of increase freight miles are introduced in this article. Approaches to definition of reactive power optimal criteria with reactive power compensation installation are denoted. Three criteria for estimation of reactive power compensation installation are offer to review. There is provided method of optimality assessment of this choice.

Keywords: optimality, criterion, reactive power, reactive power compensation.

В последние годы на российских железных дорогах наблюдается тенденция к увеличению массы грузовых поездов. В настоящее время средняя масса грузовых поездов составляет 6300 т, но к 2020 г. планируется увеличение массы поездов до 7 – 9 тыс. т и более [1]. Масса грузовых поездов, следующих в четном направлении по Дальневосточной железной дороге, уже сейчас достигает 12000 т. При этом инфраструктура железной дороги требует усиления для пропуска поездов с повышенными нагрузками. В частности, необходимо усиление действующей системы тягового электроснабжения. Одним из способов усиления системы тягового электроснабжения (СТЭ) является установка компенсации реактивной мощности (КРМ), позволяющей не только снизить потребление реактивной энергии, но и повысить уровень напряжения на шинах тяговой подстанции.

Выбор необходимой мощности устройств КРМ в тяговой сети с учетом роста объемов перевозок требует изучения в теоретическом и практическом плане трех задач.

Первая задача – подбор метода прогнозирования электропотребления (ЭП) на тягу поездов. Решением первой задачи является следующая последовательность действий: сбор и обработка статистической информации об электропотреблении и влияющих на него факторах; составление прогностического уравнения с использованием собранных данных; определение прогнозных значений электропотребления на расчетный год. Влияющими на электропотребление факторами могут быть грузооборот, количество поездов, проследовавших по участку, средняя масса поезда и средняя участковая скорость. Обработка информации заключается в выявлении двух факторов, которые оказывают наибольшее влияние на электропотребление конкретной тяговой подстанции. Выбор осуществляется на основании расчетных значений коэффициента парной корреляции, стандартной ошибки коэффициента парной корреляции, расчетных критериев Стьюдента и Фишера. Прогнозные значения на требуемый период определяются путем подстановки значений влияющих факторов на расчетный год в прогностическое уравнение [2]. Прогностические уравнения и прогнозные значения электропотребления на 2030 г., рассчитанные по предлагаемой методике, представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Результаты расчета прогнозных значений ЭП в 2030 г.

Подстанция	Прогностическое уравнение	Прогнозное значение ЭП, квар·ч
1	2	3
Икура	$W = -75738858 + 0,6 \cdot \sum(pL) + 3108 \cdot N$	99755539
Ин	$W = -71596553 + 0,56 \cdot \sum(pL) + 3048 \cdot N$	103540069
Волочаевка	$W = -6291355 + 2,07 \cdot \sum(pL) - 45,36 \cdot M_{cp}$	85632479
Хабаровск	$W = -93280164 + 3,67 \cdot \sum(pL) - 109,41 \cdot N$	200728253
Кругликово	$W = -17283915 + 2,46 \cdot \sum(pL) + 1023 \cdot N$	125356481
Дормидонтовка	$W = -66285508 + 1414649 \cdot V_{cp} + 635 \cdot N$	23621018
Аван	$W = -7216178 + 5,09 \cdot \sum(pL) - 1899 \cdot N$	111153718
Розенгартровка	$W = -48166605 + 8,24 \cdot \sum(pL) + 1438 \cdot N$	67465892
Бикин	$W = -14056534 + 6,83 \cdot \sum(pL) - 495 \cdot N$	44400674

В таблице 1 применяются следующие обозначения: $\sum(pL)$ – грузооборот за год; N – количество поездов за год; V_{cp} – средняя участковая скорость; M_{cp} – средняя масса грузового поезда.

Вторая задача – расчет необходимого усиления действующей системы тягового электроснабжения с использованием устройств КРМ. Для решения этой задачи переходят от значений энергии к мощности, составляют расчетные графы на основе схемы внешнего электроснабжения. Для каждого графа составляется уравнение для определения мест установки и

мощности компенсирующих устройств. В результате решения этих уравнений делают заключение о необходимости КРМ в тяговой сети [2].

Требуемые мощности КРМ для участка Дальневосточной железной дороги, включающего в себя девять тяговых подстанций, были рассчитаны в предыдущих работах по реальным данным за 2013 г. и спрогнозированным значениям электропотребления на 2030 г.

В результате получено, что для 2015 г. (без учета установленных компенсирующих устройств) необходимо компенсировать 13,79 Мвар на подстанции Хабаровск-II, 5,67 на подстанции Дормидонтовка, 6,64 на подстанции Аван и 1,36 Мвар на подстанции Бикин. Для 2030 г. потребуются следующие мощности КРМ, Мвар: Хабаровск-II – 18,08, Дормидонтовка – 1, Аван – 4,96. Расчет всех критериев будем производить для этих данных.

В соответствии с проектом электрификации на сегодняшний день на нескольких тяговых подстанциях рассматриваемого участка установлены компенсирующие устройства: Хабаровск-II – 5,760 Мвар (отключено), Дормидонтовка – 6,048, Бикин – 1,320 Мвар.

Как видно, между мощностями КРМ, предлагаемыми проектом электрификации и рассчитанными авторами имеются разночтения. В связи с этим определилась третья задача – нахождение варианта оптимального управления потоками реактивной энергии. Этот вариант должен оценивать полезный эффект от установки КРМ как в питающей, так и в тяговой сети, и он должен соответствовать ряду критериев.

Целью данной работы является непосредственно определение критериев для оценки оптимального управления потоками реактивной энергии в тяговой сети при установке компенсации реактивной мощности. Предлагаемые критерии с методикой их определения приведены ниже.

Первый критерий – это уменьшение потерь активной мощности в питающих линиях электропередачи и трансформаторах. На первом этапе для примерной оценки, без учета распределения мощностей по фазам, можно воспользоваться формулой [3]:

$$\delta P = \frac{Q_c \cdot (2Q - Q_c) \cdot R_\Sigma}{U_{\text{ном}}^2}, \quad (1)$$

где Q_c – мощность КРМ, квар;

Q – потребляемая реактивная мощность, квар;

R_Σ – активное сопротивление электропередачи, Ом;

$U_{\text{ном}}$ – номинальное напряжение сети, кВ.

Расчетные схемы для определения активного сопротивления электропередачи приведены на рисунке 1.

Для расчета по формуле 1 принимаем напряжение питающей сети равным 110 кВ для подстанции Хабаровск-II и 220 кВ для подстанций Дормидонтовка и Аван. Мощности КРМ, необходимые для расчета, приведены выше. По расчетным схемам (см. рисунок 1) определяются эквивалентные активные сопротивления электропередачи (с учетом сопротивлений трансформаторов) до тяговой подстанции с установленной КРМ. Результаты расчетов снижения потерь активной мощности приведены в таблице 1.

Определенная на основе данных таблицы 1 экономия электрической энергии в питающей энергосистеме за счет снижения потерь активной мощности на 2015 г. составит 554,25 тыс. кВтч/год, на 2030 г. – 735,998 тыс. кВтч/год, что в ценах 2015 г. составляет 2 277 947,772 р./год и 3 024 951,78 р./год соответственно.

Второй критерий – повышение уровня напряжения у потребителя. Для предварительных расчетов без учета напряжений по фазам можно воспользоваться приближенной формулой [3]:

$$\delta U \cong \frac{Q_c \cdot X_\Sigma}{U_n}, \quad (2)$$

где Q_c – мощность КРМ, квар;

X_Σ – реактивное сопротивление электропередачи до точки установки КУ, Ом;

U_n – номинальное напряжение сети потребителя (железной дороги), кВ.

Однако для большей наглядности результатов предлагается рассчитывать повышение напряжения в процентах от номинального (3):

$$\delta U \cong \frac{Q_c \cdot X_\Sigma}{U_n^2} \cdot 100 \%. \quad (3)$$

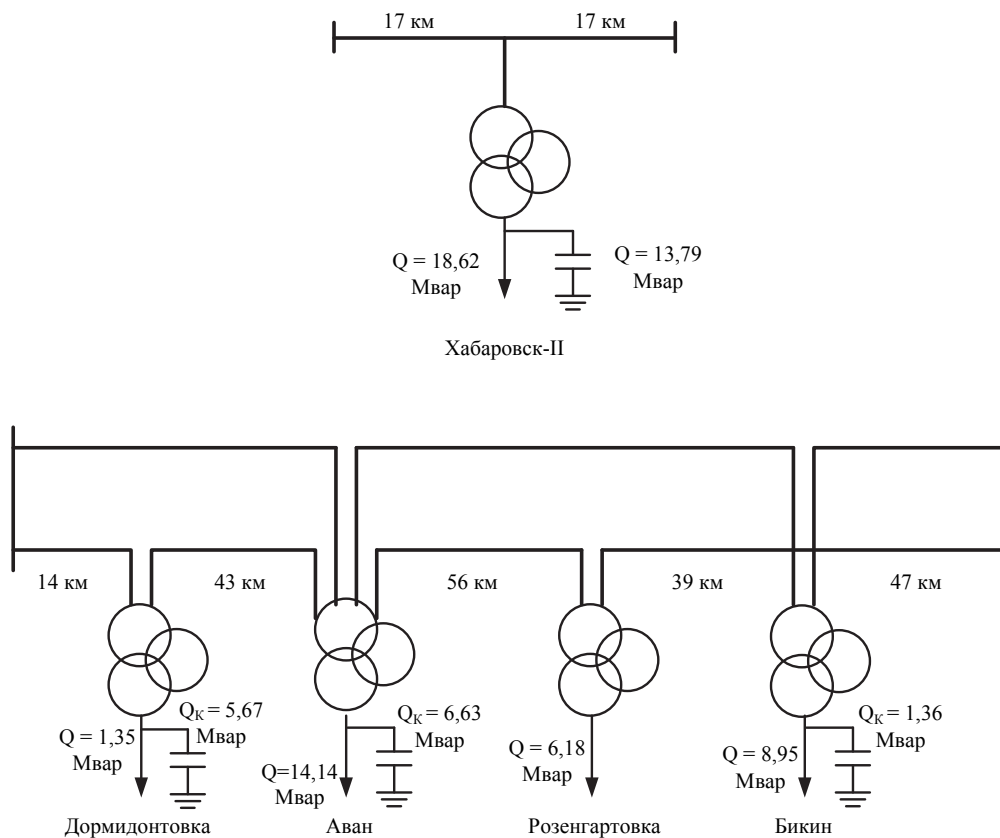


Рисунок 1 – Расчетные схемы

Таблица 2 – Результаты расчета снижения потерь активной мощности

Подстанция	R_Σ , Ом	Q_c , Мвар, на 2015 г.	δP , кВт, на 2015 г.	Q_c , Мвар, на 2030 г.	δP , кВт, на 2030 г.
Хабаровск-2	1,753	13,79	46,77	18,08	72,5
Дормидонтовка	4,83	5,67	-1,67	1	0,438
Аван	5,43	6,63	16,1	4,96	11,08
Бикин	4,46	1,36	2,07	0	0

Для расчета эквивалентного реактивного сопротивления можно воспользоваться расчетной схемой, приведенной на рисунке 1. Результаты расчетов повышения уровня напряжения в результате установки компенсирующих устройств на шинах 27,5 кВ приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Результаты расчета повышения уровня напряжения

Подстанция	X_{Σ} , Ом	δU , % на 2015 г.	δU , % на 2030 г.
Хабаровск-II	2,88	5,25	5,2
Дормидонтовка	2,69	2,02	0,4
Аван	2,93	2,57	1,9
Бикин	2,42	0,43	–

Таким образом, установка устройств КРМ, рассчитанных по предложенной методике, позволяет повысить уровень напряжения на подстанциях на 0,4 – 5,25 % без использования устройств РПН силовых трансформаторов.

Третий предлагаемый критерий – разгрузка питающей линии электропередачи (ЛЭП). Здесь необходимо произвести расчет распределения полной мощности по участкам внешней энергосистемы. Для этого на расчетную схему, приведенную на рисунке 1, добавляется распределение мощностей по ее участкам. Расчетная схема с распределением мощностей по участкам приведена на рисунке 2. На расчетных схемах над стрелками приведены значения полной мощности до установки устройств КРМ, а под стрелками – после компенсации реактивной мощности.

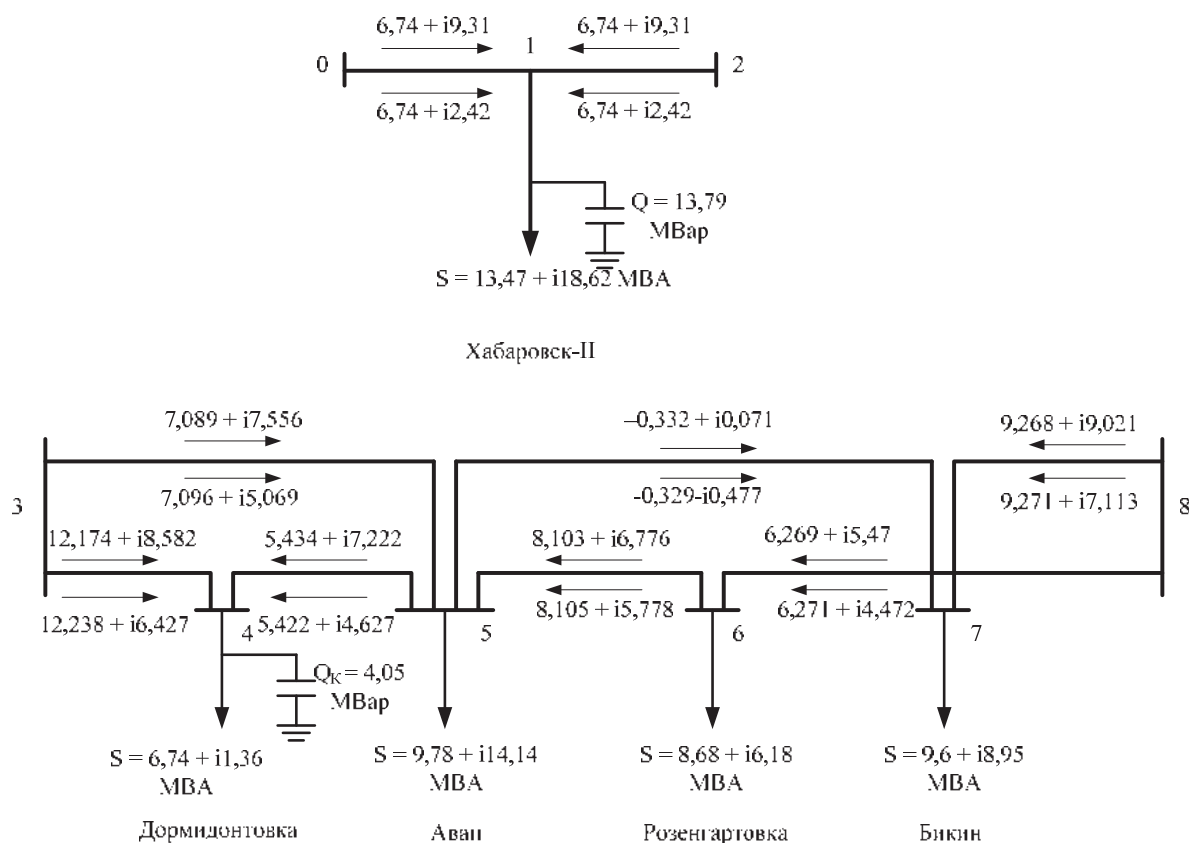


Рисунок 2 – Распределение мощности по ветвям питающей энергосистемы

Расчет средних значений мощностей на участках ЛЭП системы внешнего электроснабжения может выполняться методом узловых потенциалов или методом преобразования электрической сети. После определения значений полной мощности по участкам схемы до и после компенсации реактивной мощности находят величину снижения полной мощности. Снижение полной мощности после установки компенсирующих устройств по отношению к исходному режиму по данным за 2015 г. приведено в таблице 4.

Исходя из данных, приведенных в таблице 4, можно сделать вывод о том, что установка компенсирующих устройств (КУ) в тяговой сети позволит снизить полную мощность по участкам электрической сети и даже произвести перераспределение мощности по участкам схемы.

На основании изложенного можно сделать следующие выводы.

1. Наиболее показательным для определения степени оптимальности установки компенсирующих устройств в тяговой сети является третий критерий – разгрузка питающей ЛЭП. По результатам расчета этого показателя можно сделать вывод о наличии резерва мощности для подключения дополнительной нагрузки.

2. При правильном выборе мест установки и мощности компенсирующих устройств создается резерв мощности в питающей энергосистеме до 30 %.

3. Второй по наглядности показатель – увеличение уровня напряжения в тяговой сети. Установка устройств КРМ, рассчитанных по предложенной методике, позволяет повысить уровень напряжения на подстанциях на 0,4 – 5,25 % без использования устройств РПН силовых трансформаторов.

4. Выбор мощности и мест установки компенсирующих устройств в тяговой сети по критерию уменьшения потерь активной мощности в питающих линиях электропередачи и трансформаторах не дает желаемого эффекта.

5. В предложенной методике по оптимальному выбору мест установки и мощности компенсирующих устройств в тяговой сети в качестве критериев оптимальности рекомендуется использовать разгрузку питающей ЛЭП и увеличение уровня напряжения у потребителя. В качестве экономического критерия можно использовать величину снижения потерь активной мощности в данной энергосистеме.

Таблица 4 – Снижение величины протекающей энергии после установки КУ

Участок схемы (см. рисунок 2)	Снижение мощности, %
РЦ – Хабаровск-II	37,3
РЦ – Хабаровск-II	37,3
РЦ – Дормидонтовка	7,2
РЦ – Аван	15,84
Дормидонтовка – Аван	21,14
Аван – Розенгартровка	5,76
Аван – Бикин	-70,93
Розенгартровка – РЦ	7,42
РЦ – Бикин	9,65

Список литературы

1. Белоглазова, Д. ОАО «РЖД» скорректировало программу развития тяжеловесного движения [Электронный ресурс] // Gudok.ru. – Электронная газета. – Режим доступа: <http://www.gudok.ru/freighttrans/?ID=1302199>

2. Ли, В. Н. Методические подходы к определению оптимального потребления электрической энергии из питающей энергосистемы [Текст] / В. Н. Ли, Н. К. Шурова // Электротехника / Департамент машиностроения Минпрома РФ. – М. – 2016. – № 2. – С. 42 – 44.

3. Грунин, О. М., Электрические сети и системы в примерах и задачах [Текст] / О. М. Грунин, С. А. Филиппов / Забайкальский ин-т ж.-д. транспорта. – Чита, 2010. – 251 с.

Referenses

1. Beloglazova D. Russian railways has made adjustments to mission of heavy haul development (ОАО «РЖД» skorrektirovalo programmu razvitiya tyazhelovesnogo dvizheniya). Gudok.ru. Access mode: <http://www.gudok.ru/freighttrans/?ID=1302199>

2. Li V. N., Shurova N. K. Methodic approaches to definition of optimal consumption of electric power from electric system (Metodicheskie podhody k opredeleniyu optimalnogo potrebleniya

elektricheskoy energii iz pitayuschey energosistemi). *Elektrotehnika – Electrotechnics journal*, 2016, no.2, pp. 42 – 44.

3. Grunin O. M., Philipov C. A. *Elektricheskie seti i sistemi v primerah i zadachah* (Electrical grid and schemes with examples and questions). Chita, 251 p.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Ли Валерий Николаевич

Дальневосточный государственный университет путей сообщения (ДВГУПС).

Серышева ул., д. 47, г. Хабаровск, 680021, Российская Федерация.

Доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Системы электроснабжения», ДВГУПС.

Тел.: +7 (4212) 40-70-87

E-mail: livn@festu.khv.ru

Шурова Наталья Константиновна

Дальневосточный государственный университет путей сообщения (ДВГУПС).

Серышева ул., д. 47, г. Хабаровск, 680021, Российская Федерация.

Аспирант, преподаватель кафедры «Системы электроснабжения», ДВГУПС.

Тел.: +7 (4212) 40-70-87

E-mail: lunor92@mail.ru

INFORMATION ABOUT AUTHORS

Li Valerii Nikolaevich

Far Eastern State Transport University (FESTU).

47, Serysheva st. Khabarovsk, 680021, the Russian Federation.

Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the department «Power-supply system», FESTU.

Phone: +7 (4212) 40-70-87.

E-mail: livn@festu.khv.ru

Shurova Natalia Konstantinovna

Far Eastern State Transport University (FESTU).

47, Serysheva st. Khabarovsk, 680021, the Russian Federation.

Postgraduate student, Lecturer of the department «Power-supply system», FESTU.

Phone: +7 (4212) 40-70-87.

E-mail: lunor92@mail.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Ли, В. Н. Особенности выбора компенсирующих устройств в тяговой сети по критериям оптимальности [Текст] / В. Н. Ли, Н. К. Шурова // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2016. – № 3 (27). – С. 38 – 44.

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Li V. N., Shurova N. K. Features of compensating devices choice in traction power supply system with using optimally criterion. *Journal of Transsib Railway Studies*, 2016, vol. 27, no. 3, pp. 38 – 44. (In Russian).

УДК 629.4

В. А. Нехаев

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

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ВЫНУЖДЕННЫХ И ПАРАМЕТРИЧЕСКИХ ВОЗБУЖДЕННЫХ КОЛЕБАНИЙ ПОДВИЖНОГО СОСТАВА ПРИ ДВИЖЕНИИ ПО НЕРАВНОУПРУГОМУ ПО ПРОТЯЖЕННОСТИ ПУТИ С НЕРОВНОСТЯМИ НА ПОВЕРХНОСТИ КАТАНИЯ РЕЛЬСОВ

Аннотация. В статье рассмотрена проблема учета продольной неравноупругости железнодорожного пути, приводящая к тому, что вынужденные колебания необрессоренной массы экипажа взаимодействуют с мультипликативным возмущением, усиливая амплитуду подпрыгивания колесной пары либо уменьшая ее. Это зависит от фазового соотношения между указанными внешними воздействиями.

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 DYNAMICS FOR NON-SPRING MASS OF ROLLING STOCK IN ITS MOTION ON NON-EQUAL-ELASTICITY OF RAILWAY TRACK WITH BUMPS; THE INTERACTION FOR FORCED AND PARAMETRIC OSCILLATIONS

Abstract. The article is devoted to the accounting problem of longitudinal non-equal-elasticity of railway track which led to forced vibrations for non-spring mass of rolling stock are interacting with multiplicative perturbation, that is increasing the amplitude of the bouncing wheel pair, or reducing it. This depends on the phase relationship between these influences.

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

В предыдущих работах автора были представлены методики вычисления границ простых и комбинационных параметрических резонансов, нахождения аддитивного возмущающего фактора, действующего на подвижной состав, от продольной неравноупругости железнодорожного пути. В настоящей статье изучаются два момента.

Первый состоит в том, что сначала изучается влияние указанной неравноупругости пути на ускорение колесной пары экипажа, второй заключается в том, что еще в шестидесятые годы прошлого столетия В. В. Болотин [1] обратил внимание на возможность взаимодействия вынужденных и параметрически возмущаемых колебаний.

Пусть неравноупругость железнодорожного пути описывается следующей формулой, полученной на основании обработки эмпирического материала о жесткости пути, измеренной сотрудниками кафедры «Взаимодействие подвижного состава и пути и динамики локомотивов» Омского института инженеров железнодорожного транспорта (ОмИИТа):

$$ж_n(x) = ж_0 \left[1 + 2 \sum_{k=1}^5 \mu_k \cos \left(2\pi \frac{x}{l_k} + \varphi_k \right) \right], \quad (1)$$

где $ж_0 = 7800$ – средняя на звене жесткость пути, тс/м, $\mu_1 = 0,035$, $\mu_2 = 0,046$, $\mu_3 = 0,054$, $\mu_4 = 0,036$, $\mu_5 = 0,073$ – коэффициенты параметрического возбуждения для первой, второй, третьей, четвертой и пятой гармоник жесткости, б/р, $l_1 = 15,62$, $l_2 = 3,57$, $l_3 = 2,67$, $l_4 = 1,43$, $l_5 = 0,544$ – длины волн с первой по пятую гармонику, м, $\varphi_1 = -1,248$, $\varphi_2 = 1,281$, $\varphi_3 = 0,738$, $\varphi_4 = -0,364$, $\varphi_5 = 1,570$ – сдвиг фазы с первой по пятую гармонику, рад. График изменения жесткости пути представлен на рисунке 1, здесь отметим, что спектр этой переменной чрезвычайно богат, но у остальных гармоник, кроме учтенных, коэффициенты параметрического возбуждения весьма малы. Кстати, нетрудно видеть, что составляющая с длиной волны, равной междушпальному расстоянию 0,544 м, хорошо просматривается на этом рисунке. В работах профессора М. Ф. Вериги можно встретить утверждение о том, что колесная пара совершает 25 колебаний на рельсе длиной 12,5 м и 50 колебаний на рельсе длиной 25 м. Следовательно, это указывает на тот факт, что основным источником колебаний необрессоренной массы экипажа является наличие шпал. Жесткость пути под шпалой составляет порядка 8369 тс/м, а в междушпальном ящике – 7230 тс/м, т. е. ее изменение составляет около 1000 тс/м, а статический прогиб пути меняется всего на 0,471 мм.

При расчетах принималось: $m_{к.п} = 0,294$ тс·с²/м, $m_{п} = 0,056$ тс·с²/м, $ж_6 = 304$ тс/м, $ж_0 = 7800$ тс/м, $\beta_6 = 0,27$ тс·с/м, $\beta_{п} = 27,8$ тс·с/м и $f_0 = 2,838$ мм.

Учитывая, что собственные частоты колебаний подпрыгивания и галопирования кузова и тележек существенно меньше, чем частота подпрыгивания колесной пары, то согласно тихоновской теореме о разделении движений механической системы на «быстрые» и «медленные» составляющие можно, конечно же, построить предельную математическую модель

только для быстрой переменной – подпрыгивание колесной пары, но мы пойдем стандартным путем, следуя курсу динамики подвижного состава, в котором существует раздел «Динамика неподрессоренных масс экипажей».

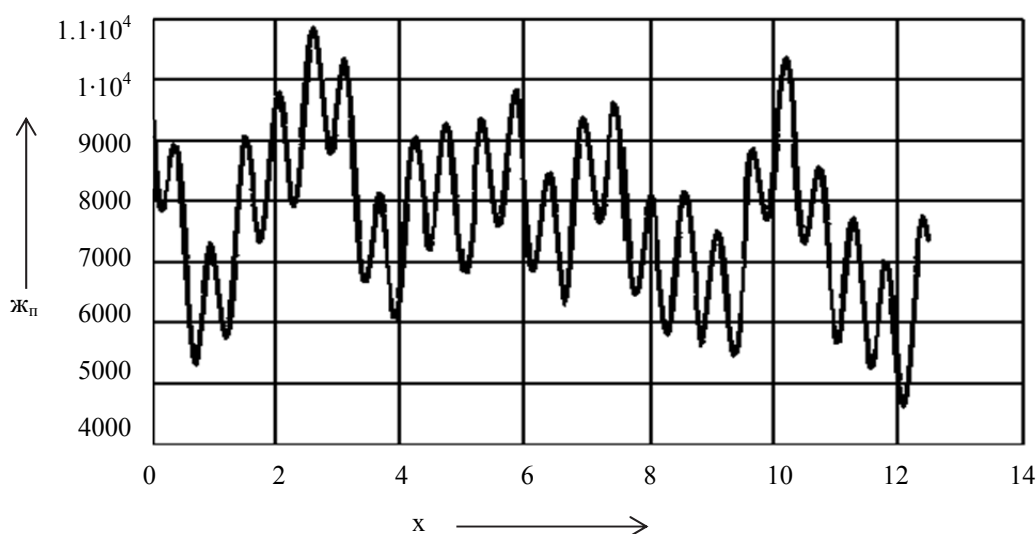


Рисунок 1 – График изменения жесткости пути (тс/м) в Сибирском регионе летом

Следовательно, дифференциальное уравнение колебаний подпрыгивания колесной пары экипажа имеет вид:

$$m\ddot{q} + b\dot{q} + ж(t)q = -m\ddot{f} - b\dot{f}, \quad (2)$$

где q – обобщенная координата, отсчитываемая от положения равновесия колесной пары в данный момент времени; f – так называемый статический прогиб пути, который изменяется от сечения к сечению и поэтому является функцией времени; $m = m_{кп} + m_n$ – «приведенная» масса колесной пары; $b = b_б + b_n$ – «приведенный» коэффициент вязкого трения в системе «экипаж – путь»; $ж(t) = ж_б + ж_n(t)$, $ж(t) = (ж_б + ж_0) \left[1 + 2\varepsilon \sum_{k=1}^5 \alpha_k \cos(2\Omega_k t + \varphi_k) \right]$ – «приведенная» жесткость рассматриваемой механической системы; $\varepsilon = \mu_1$ – малый параметр; $\alpha_1 = 1$, $\alpha_2 = \mu_2/\mu_1$, $\alpha_3 = \mu_3/\mu_1$, $\alpha_4 = \mu_4/\mu_1$, $\alpha_5 = \mu_5/\mu_1$ – вспомогательные переменные; б/р, $\Omega_k = \pi V/l_k$ – частота k -й гармоники изменения жесткости пути, рад/с; V – скорость движения экипажа, м/с.

Данное дифференциальное уравнение описывает, если допустимо так выразиться, свободные колебания подпрыгивания колесной пары при ее качении по неравноупругому по протяженности пути при отсутствии на поверхностях рельсов геометрических неровностей. Заметим, что если бы путь был равноупругим по протяженности, а начальные условия – тривиальными, то колесная пара просто бы перемещалась вдоль пути без колебаний, но это совершенно идеалистический случай, в действительности так не бывает, ибо всегда найдется какое-либо несовершенство.

Примем обычное допущение о том, что экипаж движется вдоль железнодорожного пути с постоянной скоростью, тогда имеем, что $x = Vt$, здесь V – скорость экипажа, м/с. Следовательно, получим такое уравнение:

$$f(t) = -\frac{P}{ж_б + ж_0} \frac{1}{1 + 2\varepsilon \frac{ж_0}{ж_б + ж_0} \sum_{k=1}^5 \alpha_k \cos(2\Omega_k t + \varphi_k)}. \quad (3)$$

Введем новые обозначения: $f_0 = P/(\mathcal{K}_\delta + \mathcal{K}_0)$ – модуль среднего статического прогиба железнодорожного пути под постоянным давлением колесной пары, м; $\Omega_k = \pi V/l_k$ – частота параметрического возбуждения k -й гармоники изменения жесткости пути, рад/с; $\mu = \varepsilon \mathcal{K}_0/(\mathcal{K}_\delta + \mathcal{K}_0)$ – новый малый параметр, б/р, и перепишем уравнение (3) так:

$$f(t) = -\frac{f_0}{1 + 2\mu \sum_{k=1}^5 \alpha_k \cos(2\Omega_k t + \varphi_k)}. \quad (4)$$

Учитывая, что $\mu \ll 1$ – малый параметр, воспользуемся биномом Ньютона и получим приближенное уравнение для возмущающего фактора (здесь в разложении бинома учтено три слагаемых):

$$f(t) \approx -f_0 \left\{ 1 - \mu \sum_{k=1}^5 \alpha_k \cos(2\Omega_k t + \varphi_k) + \frac{3}{8} \mu^2 \left[\sum_{k=1}^5 \alpha_k \cos(2\Omega_k t + \varphi_k) \right]^2 \right\}. \quad (5)$$

Статический прогиб неравноупругого железнодорожного пути (здесь имеется в виду, что колесная пара мгновенно перемещается по сечениям) представлен на рисунке 2, откуда не сложно установить, что по модулю он не превышает 3,458 мм.

Определим необходимые нам величины, опустив третье слагаемое в формуле (5), ввиду их малости:

$$\begin{cases} \dot{f}(t) = -2\mu f_0 \sum_{k=1}^5 \alpha_k \Omega_k \sin(2\Omega_k t + \varphi_k); \\ \ddot{f}(t) = -4\mu f_0 \sum_{k=1}^5 \alpha_k \Omega_k^2 \cos(2\Omega_k t + \varphi_k). \end{cases} \quad (6)$$

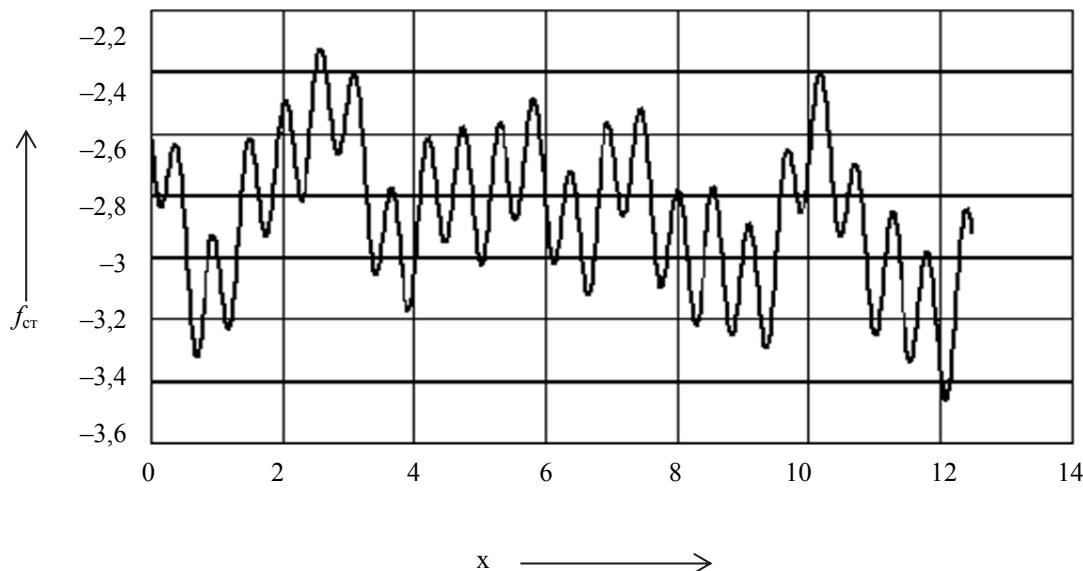


Рисунок 2 – Статический прогиб железнодорожного пути, мм

Изменение второй производной от статического прогиба пути в долях g показано на рисунке 3.

Установлено, что с ростом скорости движения экипажа максимальный модуль ускорения возрастает от 0,012 до 0,12g (первое значение для $V = 40$ км/ч, второе – для $V = 120$ км/ч).

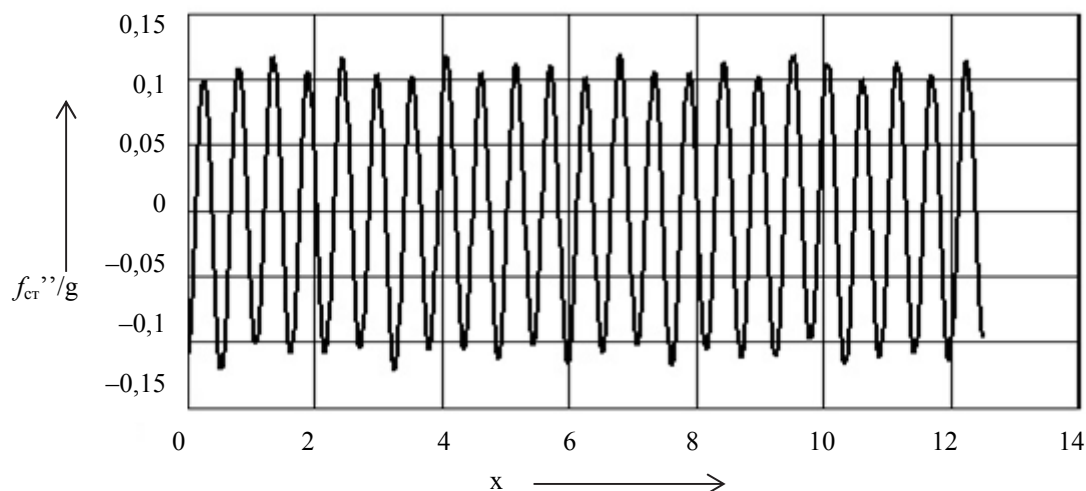


Рисунок 3 – Вторая производная от статического прогиба в долях g при $V = 120$ км/ч

Результаты численного интегрирования дифференциального уравнения (2), полученные методом Рунге – Кутты четвертого порядка с фиксированным шагом, представлены на рисунке 4.

В относительном движении ускорение колесной пары определяется скоростью движения подвижного состава вдоль пути и составляет приблизительно 0,012g при $V = 40$ км/ч, $-0,05g$ при $V = 80$ км/ч и $-0,12g$ при $V = 120$ км/ч. Указанные величины нужно добавить к соответствующим максимумам ускорения подпрыгивания колесной пары в переносном движении. Следовательно, выполнив необходимые действия, получим такие абсолютные ускорения подпрыгивания колесной пары экипажа: 1,212g при $V = 40$ км/ч, 1,25g при $V = 80$ км/ч и $\approx g$ при $V = 120$ км/ч. Нетрудно установить, что где-то в районе скорости движения экипажа 80 км/ч должно находиться значение скорости V , при котором достигается максимум ускорения подпрыгивания колесной пары, но называть эту скорость резонансной мы не будем, зная о том, что при параметрических колебаниях это целые области.

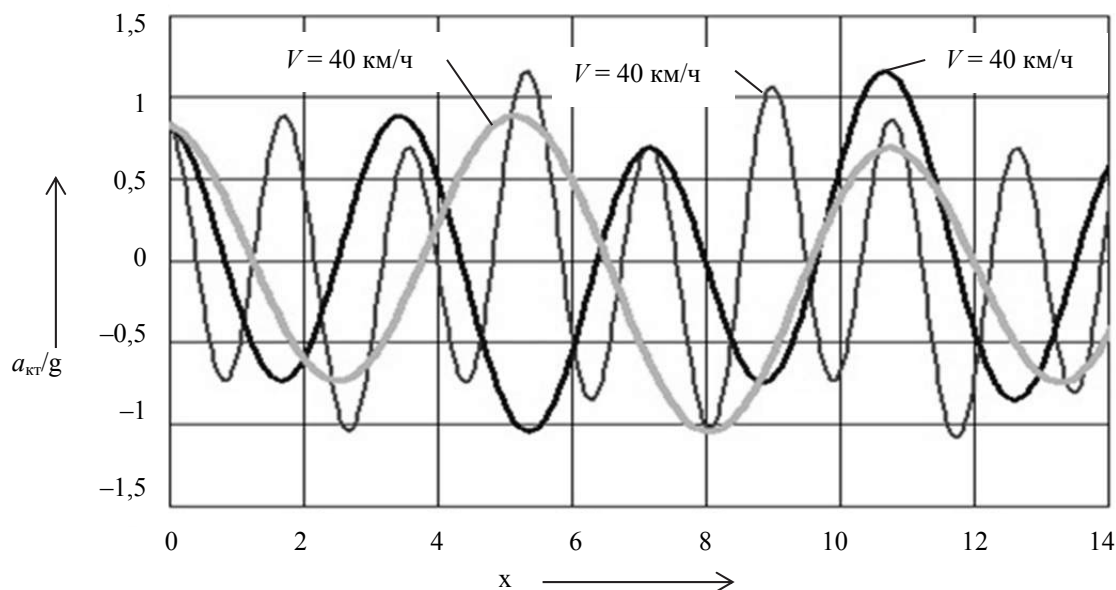


Рисунок 4 – Ускорение подпрыгивания колесной пары экипажа (в долях g) при движении по железнодорожному пути в Сибирском регионе

Дифференциальное уравнение (2) обладает как мультипликативным возмущением (это изменение, в нашем случае гармоническое, жесткости механической системы, т. е. пути), так и аддитивным воздействием, стоящим в правой части уравнения (2), характеризующим переносное движение системы. Подчеркнем еще раз, что обобщенная координата q отсчитывается от положения статического равновесия системы в каждой точке железнодорожного пути, которое постоянно изменяется от сечения к сечению. А так как у дифференциального уравнения появилась правая часть, то в механической системе неизбежно будут развиваться как вынужденные, так и параметрические колебания.

Чтобы отразить свойство взаимодействия вынужденных и параметрических колебаний, отбросим все гармоники, кроме той, которая обладает длиной волны, равной междушпальному расстоянию. Итак, математическая модель системы, о которой говорилось выше, имеет такой вид:

$$\ddot{q} + 2n\dot{q} + k_0^2(1 - 2\mu \cos 2\Omega t)q = k_0^2 q_{ct} \cos(\Omega t + \varphi), \quad (7)$$

где $q_{ct} = P_0/j_0$ – статический прогиб пружины, на которой подвешен груз при среднем ее значении; P_0 – амплитуда силового возмущения. Здесь мы считаем, что частота параметрического воздействия в два раза больше частоты внешнего силового возмущения (это обстоятельство упростит решение задачи). Хотя в принципе можно ввести малую расстройку системы по частоте.

Решение дифференциального уравнения (7) будем искать согласно общей теории таких систем в следующей форме:

$$q = a \sin \Omega t + b \cos \Omega t, \quad (8)$$

что приведет нас после несложных преобразований к СЛАУ:

$$\begin{cases} (k_0^2 + \mu k_0^2 - \Omega^2)a - 2n\Omega b = -k_0^2 q_{ct} \sin \varphi; \\ 2n\Omega a + (k_0^2 - \mu k_0^2 - \Omega^2)b = k_0^2 q_{ct} \cos \varphi \end{cases} \quad (9)$$

или

$$\begin{cases} (1 + \mu - \lambda^2)a - 2\delta\lambda b = -q_{ct} \sin \varphi; \\ 2\delta\lambda a + (1 - \mu - \lambda^2)b = q_{ct} \cos \varphi, \end{cases} \quad (10)$$

здесь $\lambda = \Omega/k_0$ – расстройка системы по частоте; $\delta = n/k_0$ – безразмерный коэффициент, характеризующий вязкое трение в системе (обычно он находится в диапазоне от 0 до 0,7). Решая систему линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) (10) и вычисляя амплитуду колебания по формуле $A^2 = a^2 + b^2$, получим передаточную функцию системы в виде:

$$\left(\frac{A}{q_{ct}} \right) = \sqrt{\frac{(1 - \lambda^2)^2 + 4\delta^2 \lambda^2 + \mu 4\delta\lambda \sin 2\varphi + 2\mu(1 - \lambda^2) \cos 2\varphi + \mu^2}{[(1 - \lambda^2)^2 + 4\delta^2 \lambda^2 - \mu^2]^2}}. \quad (11)$$

Графики изменения этого соотношения показаны на рисунке 5.

Из представленного рисунка легко установить, что если сдвиг фазы φ между силовым и параметрическим возбуждениями равен $\pi/4$, то параметрическое возмущение усиливает амплитуду вынужденных колебаний на 20,9 %, если угол $-\varphi = -\pi/4$, то амплитуда вынужденных колебаний уменьшается на 52,5 %. Впрочем, указанные проценты получены в так называемой зоне резонанса, когда собственная частота совпадает с частотой силового внешнего воздействия.

Следовательно, создавая в механической системе, подверженной внешнему силовому или кинематическому возмущению, параметрическое воздействие, обеспечив нужный сдвиг фазы между возмущениями, мы можем строить виброзащитную систему.

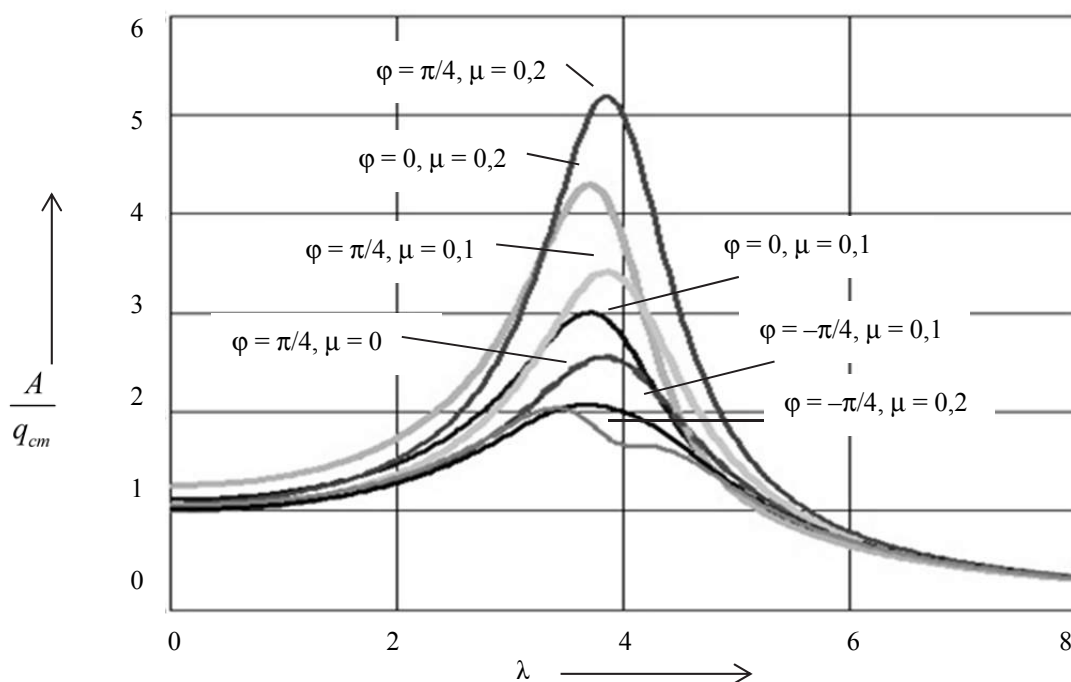


Рисунок 5 – Передаточная функция системы по перемещению

Рассмотренный выше пример параметрической системы, на которую воздействует силовое внешнее возмущение, позволил нам установить некоторые характерные их свойства. Далее обратимся к частному случаю, когда длина геометрической неровности в два раза больше или близка к междупальному расстоянию, составляющему в среднем 0,544 м (в зависимости от эпюры шпал, в данном варианте – 1840 шт./км). В этот диапазон волн попадает средневолновый волнообразный износ рельсов, следовательно, рассматриваемый случай не так уж далек от реальности. Кроме того, в правой части математической модели взаимодействия колесной пары и неравноупругого по протяженности пути будут стоять дополнительные слагаемые, характеризующие аддитивное действие неравножесткости на экипаж. Это обстоятельство, разумеется, несколько усложнит нашу задачу.

Перепишем уравнение (7), дополнив его внешним возмущением от пути, так:

$$\begin{aligned}
 m\ddot{q} + b\dot{q} + \kappa(1 - 2\varepsilon \sin 2\Omega t)q = m8f_0\varepsilon\Omega^2 \sin 2\Omega t - b4f_0\varepsilon\Omega \cos 2\Omega t + \\
 + m_n\eta_0\Omega^2 \sin(\Omega t + \varphi) - b_n\eta_0\Omega \cos(\Omega t + \varphi) - \kappa_0\eta_0\{\sin(\Omega t + \varphi) - \\
 - \varepsilon[\cos(\Omega t - \varphi) - \cos(3\Omega t + \varphi)]\},
 \end{aligned}
 \quad (12)$$

здесь φ – угол сдвига фазы между параметрическим и внешним возмущениями; η_0 – амплитуда геометрической неровности на рельсах. Первые два члена в правой части выражения (12) – это аддитивная составляющая возмущения от продольной неравноупругости пути, а следующие – характеризуют действие волнообразного возмущения на колесную пару экипажа. Согласно математике установившееся решение нужно искать в виде (в дальнейшем пренебрегаем четвертой, пятой гармониками):

$$\begin{aligned}
 q = \frac{1}{2}a_0 + a_1 \sin \Omega t + b_1 \cos \Omega t + a_2 \sin 2\Omega t + b_2 \cos 2\Omega t + \\
 + a_3 \sin 3\Omega t + b_3 \cos 3\Omega t.
 \end{aligned}
 \quad (13)$$

Отметим, что здесь мы несколько упростили решение задачи, предположив точное выполнение частотного соотношения между вынуждающей силой и параметрическим возмущением, т. е. $\omega = \Omega$. В действительности указанное соотношение выполняется приблизительно, но отличаются они друг от друга мало, что почти не сказывается на амплитуде колебаний. Продифференцируем это соотношение два раза по времени, т. е. найдем скорость и ускорения обобщенной координаты q :

$$\begin{cases} \dot{q} = \Omega(a_1 \cos \Omega t - b_1 \sin \Omega t) + 2\Omega(a_2 \cos 2\Omega t - b_2 \sin 2\Omega t) + \\ + 3\Omega(a_3 \cos 3\Omega t - b_3 \sin 3\Omega t); \\ \ddot{q} = -\Omega^2(a_1 \sin \Omega t + b_1 \cos \Omega t) - 4\Omega^2(a_2 \sin 2\Omega t + b_2 \cos 2\Omega t) - \\ - 9\Omega^2(a_3 \sin 3\Omega t + b_3 \cos 3\Omega t). \end{cases} \quad (14)$$

Стандартные действия, связанные с подстановкой выражений (13), (14) и тригонометрическими преобразованиями, приводят нас к следующей системе уравнений относительно амплитуд колебаний:

$$D\vec{X} = F, \quad (15)$$

где D – матрица коэффициентов, стоящих при неизвестных амплитудах колебаний, подлежащих определению; F – вектор свободных членов, их выражения приведены ниже, ибо они очень громоздки. Кроме того, была предварительно найдена постоянная a_0 :

$$\frac{1}{2} \mathcal{J} a_0 - \varepsilon \mathcal{J} a_2 = 0$$

или

$$a_0 = 2\varepsilon a_2. \quad (16)$$

Постоянная a_0 была подставлена в систему, что позволило сократить ее порядок до 6.

Угол сдвига фазы φ примем равным 0 либо $\pi/4$, либо $-\pi/4$, что позволит выявить взаимосвязь между параметрически возбуждаемыми и вынужденными колебаниями механической системы. Внимательный анализ уравнения (15) указывает на то, что четные и нечетные гармоники решения формулы (13) не связаны между собой, следовательно, можно отдельно рассматривать две задачи, одна из которых описывается следующей системой уравнений (такое возможно только потому, что рассматриваемая механическая система является линейной):

$$\begin{cases} [\mathcal{J}(1 - 2\varepsilon^2) - 4m\Omega^2] a_2 - 2b\Omega b_2 = 8\varepsilon f_0 m\Omega^2; \\ 2b\Omega a_2 + (\mathcal{J} - 4m\Omega^2) b_2 = -4\varepsilon f_0 b\Omega, \end{cases} \quad (17)$$

а другая имеет вид:

$$\begin{cases} [\mathcal{J}(1 - \varepsilon) - m\Omega^2] a_1 - b\Omega b_1 + \varepsilon \mathcal{J} b_3 = f_1; \\ b\Omega a_1 + [\mathcal{J}(1 - \varepsilon) - m\Omega^2] b_1 - \varepsilon \mathcal{J} a_3 = f_2; \\ -\varepsilon \mathcal{J} a_1 + (\mathcal{J} - 9m\Omega^2) a_3 - 3b\Omega b_3 = f_3; \\ \varepsilon \mathcal{J} b_1 + 3b\Omega a_3 + (\mathcal{J} - 9m\Omega^2) b_3 = f_4, \end{cases} \quad (18)$$

здесь имеем:

$$\vec{f} = \eta_0 \begin{cases} (m_n \Omega^2 - \mathcal{K}_0) \cos \varphi - (b_n \Omega - \varepsilon \mathcal{K}_0) \sin \varphi; \\ (m_n \Omega^2 - \mathcal{K}_0) \sin \varphi - (b_n \Omega - \varepsilon \mathcal{K}_0) \cos \varphi; \\ \varepsilon \mathcal{K}_0 \sin \varphi; \\ -\varepsilon \mathcal{K}_0 \cos \varphi. \end{cases} \quad (19)$$

Матрица D и вектор F алгебраического уравнения (15) после указанного выше преобразования имеют вид:

$$D(\varepsilon) = \begin{pmatrix} \mathcal{K}(1-\varepsilon) - m\Omega^2 & -b\Omega & 0 & 0 & 0 & \varepsilon \mathcal{K} \\ b\Omega & \mathcal{K}(1-\varepsilon) - m\Omega^2 & 0 & 0 & -\varepsilon \mathcal{K} & 0 \\ 0 & 0 & \mathcal{K}(1-2\varepsilon^2) - m4\Omega^2 & -b2\Omega & 0 & 0 \\ 0 & 0 & b2\Omega & \mathcal{K} - m4\Omega^2 & 0 & 0 \\ -\varepsilon \mathcal{K} & 0 & 0 & 0 & \mathcal{K} - m9\Omega^2 & -b3\Omega \\ 0 & \varepsilon \mathcal{K} & 0 & 0 & b3\Omega & \mathcal{K} - m9\Omega^2 \end{pmatrix}; \quad (20)$$

$$F(\varepsilon) = \begin{pmatrix} [(m_n \Omega^2 - \mathcal{K}_0) \cos \varphi - (b_n \Omega - \varepsilon \mathcal{K}_0) \sin \varphi] \eta_0 \\ [(m_n \Omega^2 - \mathcal{K}_0) \sin \varphi - (b_n \Omega - \varepsilon \mathcal{K}_0) \cos \varphi] \eta_0 \\ 8\varepsilon f_0 m \Omega^2 \\ -4\varepsilon f_0 b \Omega \\ \varepsilon \mathcal{K}_0 \eta_0 \sin \varphi \\ -\varepsilon \mathcal{K}_0 \eta_0 \cos \varphi \end{pmatrix}. \quad (21)$$

Исходные данные локомотива приняты следующими: $m_{\text{кп}} = 0,22 \text{ тс} \cdot \text{с}^2/\text{м}$, $m_{\text{п}} = 0,056 \text{ тс} \cdot \text{с}^2/\text{м}$, $P_{\text{ст}} = 23 \text{ тс}$, $\mathcal{K}_6 = 304 \text{ тс/м}$, $\mathcal{K}_0 = 7800 \text{ тс/м}$, $b_6 = 1 \text{ тс} \cdot \text{с/м}$, $b_{\text{п}} = 27,3 \text{ тс} \cdot \text{с/м}$, $l_{\text{ш}} = 0,54 \text{ м}$, $l_{\text{н}} = 1,08 \text{ м}$, $f_0 = 2,84 \text{ мм}$, $\eta_0 = 0,2 \text{ мм}$. На рисунке 6 представлен график изменения амплитуды колебаний колесной пары от неравноупругости пути по протяженности.

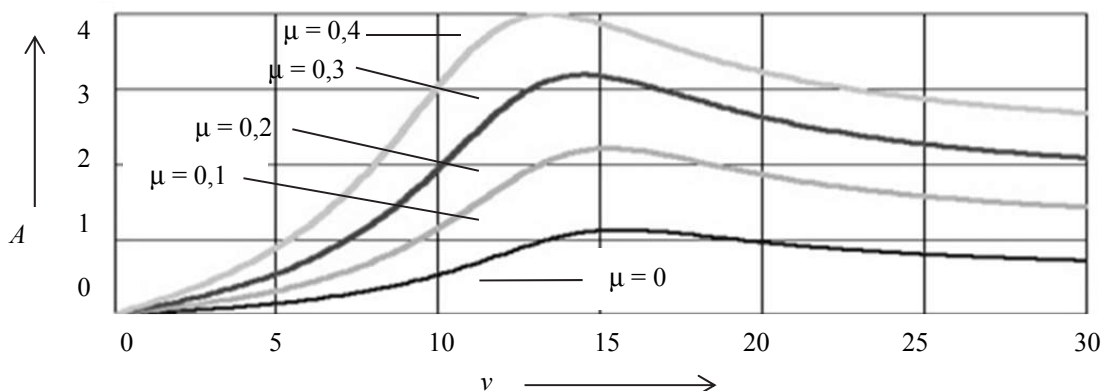


Рисунок 6 – Изменение амплитуды колебаний колесной пары (в мм)
от скорости движения экипажа и неравноупругости пути

Если коэффициент параметрического возмущения $\mu = 0,4$, то резонансная амплитуда подпрыгивания колесной пары не превышает 4 мм, причем резонанс развивается **в районе 15 м/с (54 км/ч)**. В дальнейшем амплитуда уменьшается, но не очень существенно.

Составляющая ускорения колесной пары экипажа от продольной неравноупругости пути приведена на рисунке 7, из которого нетрудно видеть, что максимальное ускорение может достигать около $8g$ при скорости движения экипажа около 100 км/ч и $\mu = 0,4$. Причем ускорение возрастает как с увеличением скорости движения колесной пары, так и с ростом коэффициента параметрического возбуждения.

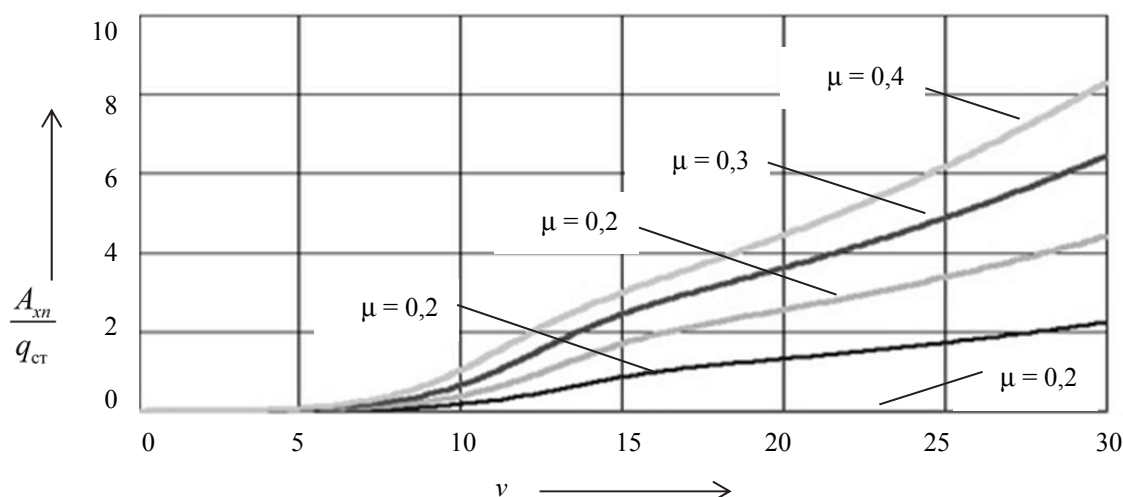


Рисунок 7 – Ускорение колесной пары (в долях g) от скорости движения экипажа и продольной неравноупругости железнодорожного пути

Первая и третья гармоники подпрыгивания колесной пары от действия геометрических неровностей на поверхности катания рельсов показаны на рисунках 8 и 9.

Из анализа рисунков 8 и 9 следует сделать важный вывод о том, что третья гармоника составляет около 50 % от первой и поэтому ее необходимо учитывать в расчетах. Так как рассматриваемая система является линейной, а возмущение представлено лишь одной гармоникой, то **появление третьей гармоники нужно приписать действию параметрического (мультипликативного) возмущения.**

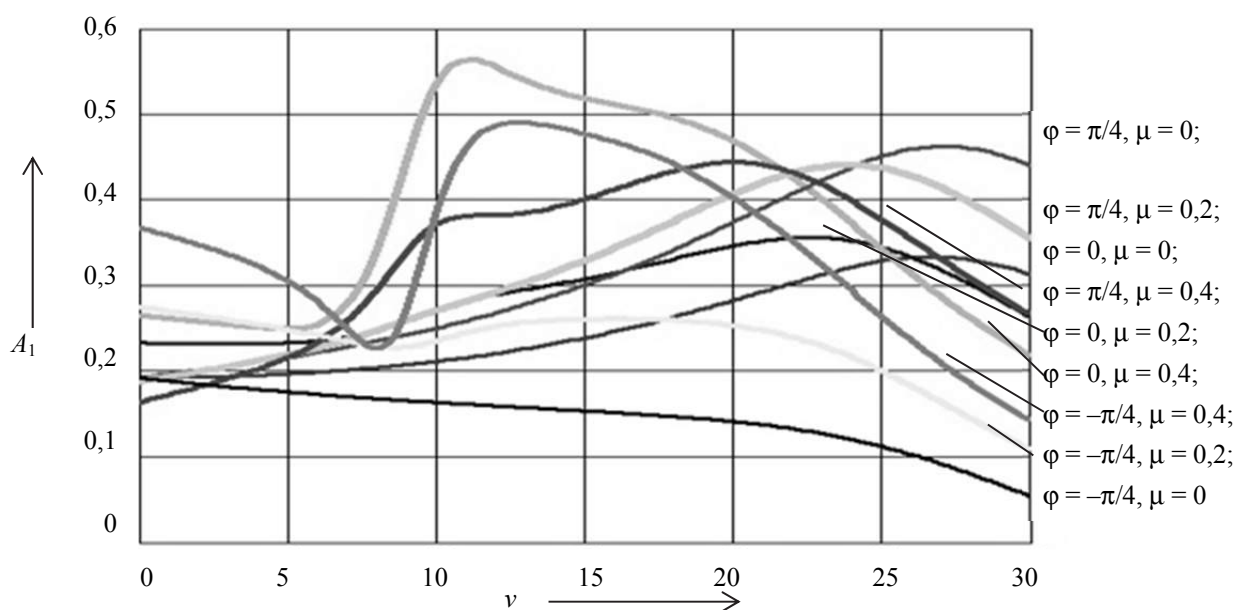


Рисунок 8 – Амплитуда первой гармоники подпрыгивания колесной пары (в мм) от действия геометрической неровности на поверхности катания рельсов

Ускорение колесной пары от действия гармонической геометрической неровности приведено на рисунке 10. Оно с увеличением скорости движения экипажа возрастает, хотя не трудно обнаружить резонанс, который размыт и развивается в диапазоне скоростей от 20 до 30 м/с (от 72 до 108 км/ч) и далее убывает.

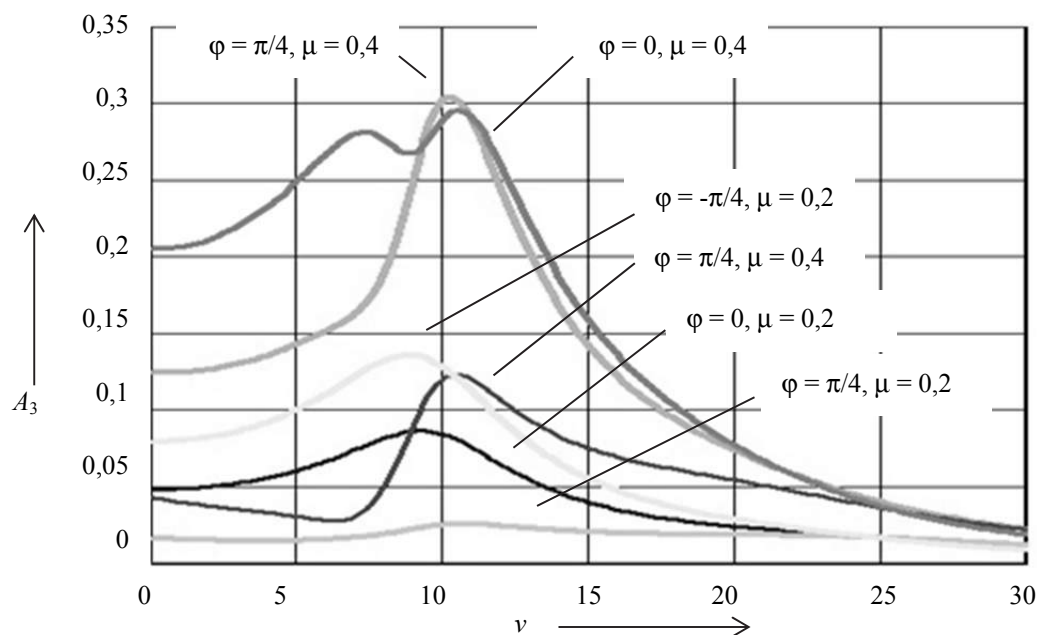


Рисунок 9 – Амплитуда третьей гармоники подпрыгивания колесной пары (в мм) от действия геометрической неровности на поверхности катания рельсов

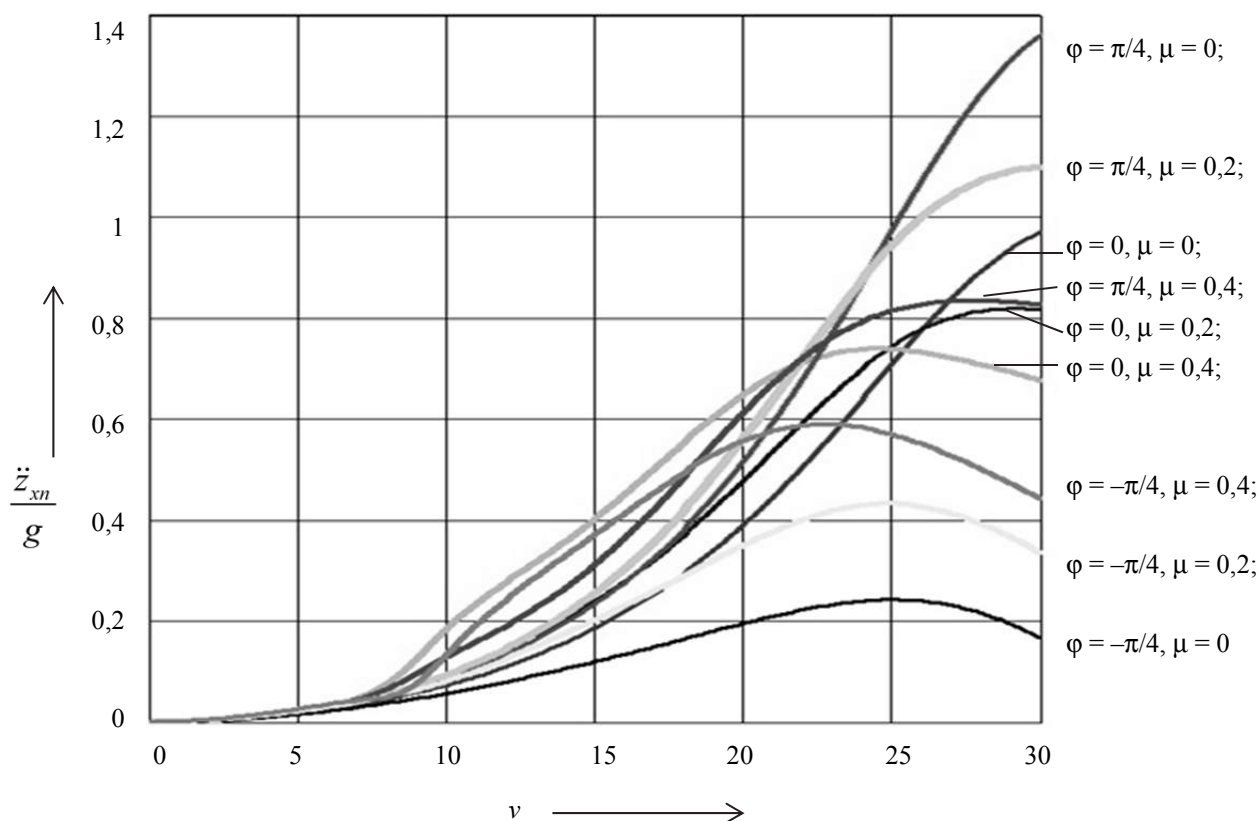


Рисунок 10 – Ускорение колесной пары экипажа (в долях g) по первой гармонике от действия гармонической геометрической неровности на поверхности катания рельсов

Заметим, что на рисунках выше 10-го представлена только первая гармоника решения (8). Результаты вычислений для третьей гармоники даны на рисунке 11. Максимальное уско-

рение колесной пары по третьей гармонике не превышает 1,2g при скорости движения 12 м/с (43,2 км/ч). Несложно обнаружить на этом рисунке и другие резонансные пики.

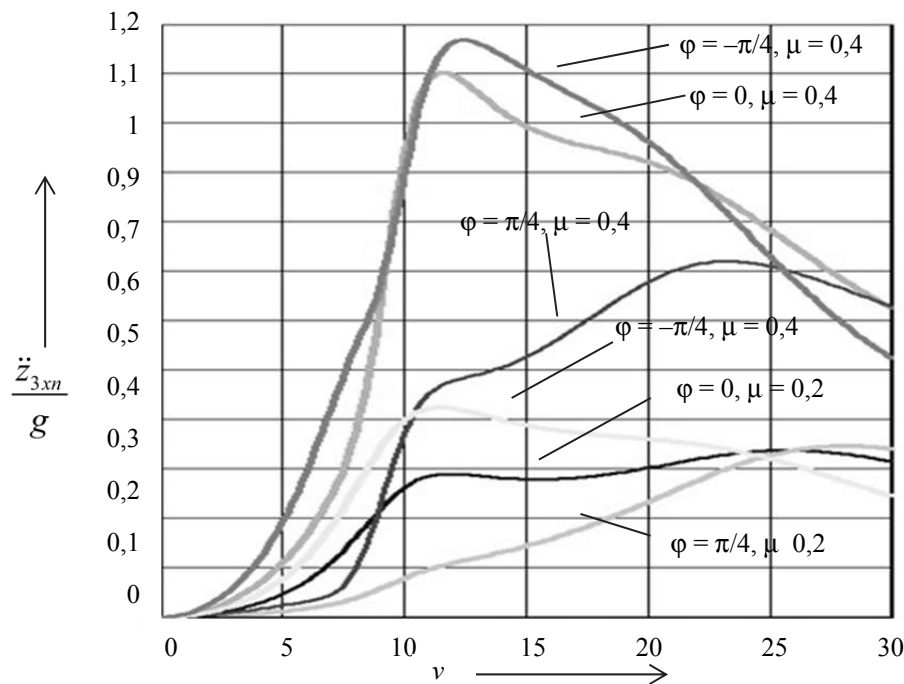


Рисунок 11 – Ускорение колесной пары экипажа (в долях g) по третьей гармонике от действия геометрической неровности на поверхности катания рельсов

На рисунках 12, 13 приведены интегральные графики подпрыгивания и ускорения подпрыгивания колесной пары экипажа от действия всех возмущений для трех скоростей движения – 10, 20 и 30 м/с, двух коэффициентов мультипликативного воздействия – 0,2 и 0,4 и двух сдвигов фазы между возмущениями – 45° и -45° .

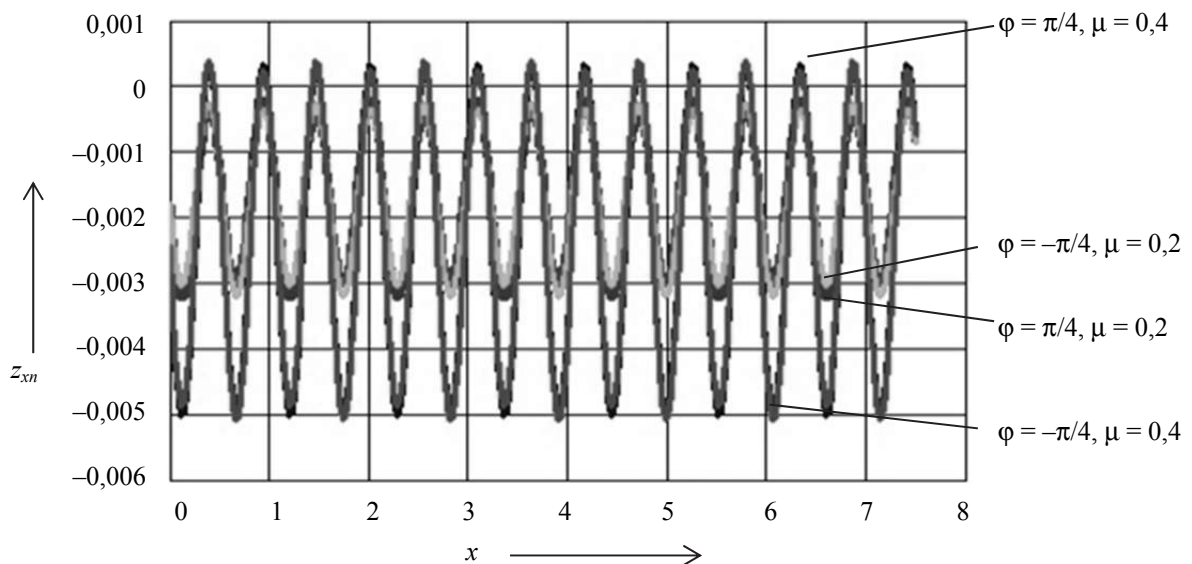


Рисунок 12 – График подпрыгивания колесной пары экипажа (в м) при скорости его движения 30 м/с (108 км/ч) (абсциссой является перемещение экипажа вдоль пути, м)

Таким образом, учет продольной неравноупругости железнодорожного пути (хотя бы под шпалой и в междушпальном ящике) позволяет более точно установить резонансные области, оценить уменьшение или увеличение уровня ускорения и амплитуд подпрыгивания

неподдрессоренной массы подвижного состава, что в итоге сказывается на силах воздействия на путь в вертикальной плоскости со всеми вытекающими отсюда последствиями.

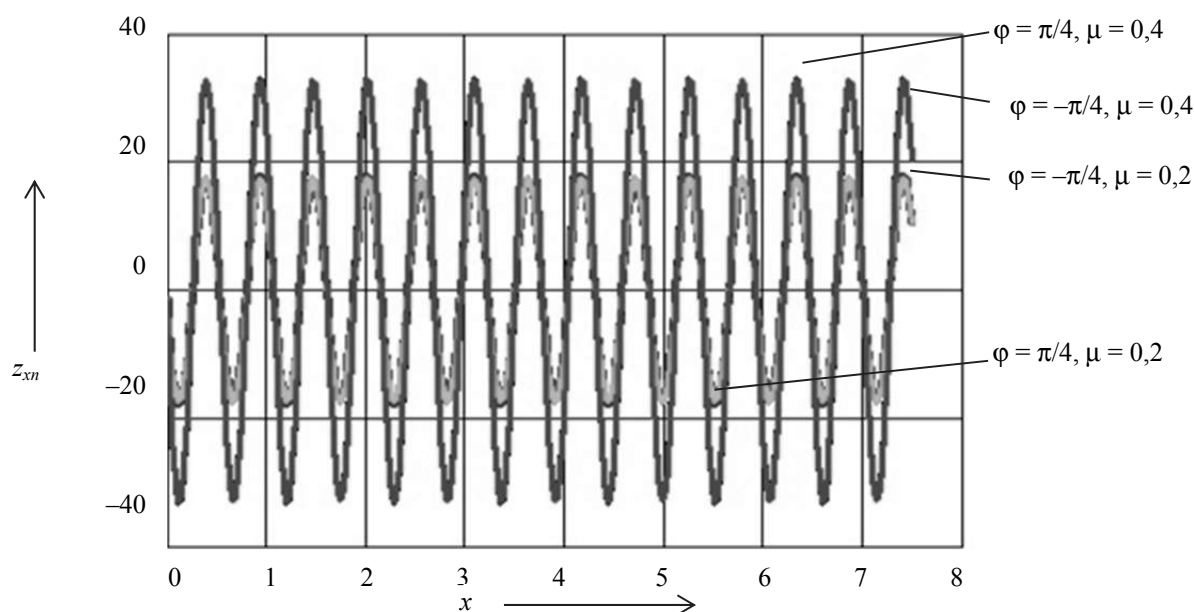


Рисунок 13 – График ускорения подпрыгивания колесной пары экипажа при скорости его движения 30 м/с (108 км/ч) (абсциссой является перемещение экипажа вдоль пути, м)

Следовательно, во-первых, **параметрическая система в некотором смысле напоминает своим поведением нелинейную систему.**

Во-вторых, угол сдвига фазы между возмущениями играет существенную роль, ибо либо увеличивает, либо уменьшает амплитуду колебаний подпрыгивания колесной пары.

В-третьих, резонирует основная гармоника на скоростях от 10 до 27 м/с (от 36 до 97,2 км/ч), а третья гармоника – в районе 10 м/с (36 км/ч).

В-четвертых, максимальная амплитуда подпрыгивания колесной пары от продольной неравноупругости пути на порядок превышает этот же показатель от геометрической неровности на поверхности катания рельсов. Поэтому, видимо, **неравноупругость пути должна обязательно учитываться в расчетных схемах подвижного состава и их математических моделях.**

Далее приведем главную и вторую зоны параметрического резонанса как функцию скорости (в километрах в час) от коэффициента параметрического возмущения μ , которые изображены на рисунке 14. Они обе находятся в диапазоне эксплуатационных скоростей современных поездов.

В заключение статьи сопоставим основные свойства обычного (возбуждаемого силовым или кинематическим внешним воздействием) и параметрического резонансов.

1) Обычный резонанс возникает при $\omega \approx k_0$ или $n\omega \approx k_0$ (что возможно только в нелинейной системе), но вынужденные колебания существуют при любой частоте воздействия ω .

2) В случае параметрического резонанса существуют лишь ограниченные частотные интервалы вблизи соотношения $[\omega = 2\omega_k/p \quad k = 1, 2, \dots, n; p = 1, 2, \dots \text{ или } \omega = |\omega_j \pm \omega_k|/p \quad j, k = 1, 2, \dots, n; p = 1, 2, \dots]$, внутри которых возникают и развиваются параметрически возбужденные колебания.

3) Любая по величине внешняя сила может вызвать обычный резонанс (важно лишь выполнение частотного соотношения).

4) Для возникновения параметрического резонанса в диссипативной системе величина возмущения, т. е. коэффициент параметрического возбуждения, должна быть больше некоторого порогового значения.

5) В силу существования порогового значения амплитуды параметрического воздействия в неконсервативной системе существует ограниченное число частотных интервалов, внутри которых осуществляется параметрический резонанс.

6) Для линейной диссипативной системы при обычном резонансе всегда характерна ограниченная амплитуда колебаний, ибо потери растут быстрее притока энергии.

7) В линейной неконсервативной системе при параметрическом резонансе происходит неограниченный рост амплитуды, так как и приток, и потери энергии пропорциональны квадрату амплитуды и только в нелинейной системе происходит ограничение колебаний.

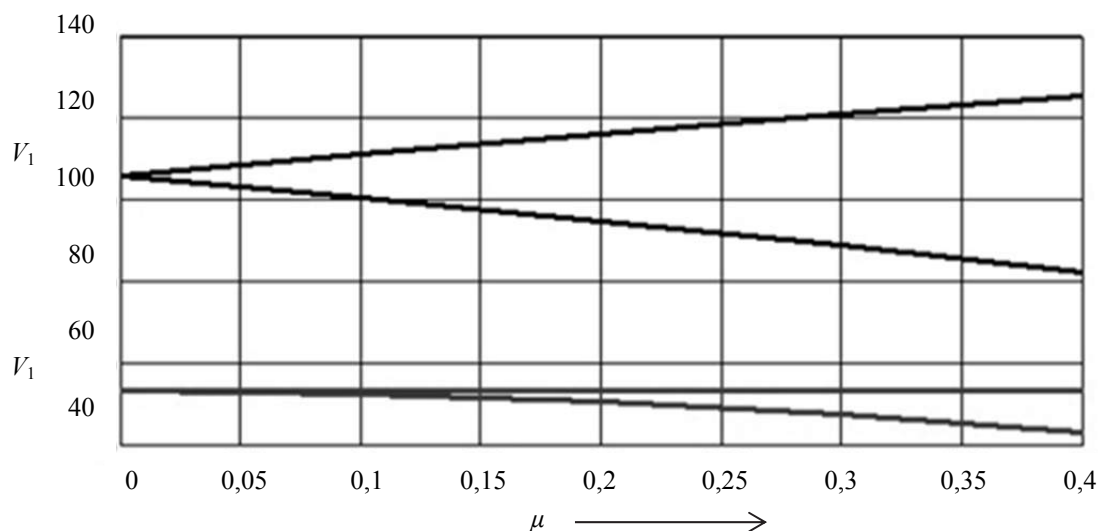


Рисунок 14 – Главная (первая) V_1 и вторая V_2 области динамической неустойчивости колесной пары экипажа, рассчитанные для исходных данных, представленных выше

В заключение необходимо сделать такой вывод: учет неравноупругости железнодорожного пути из-за наличия шпал в расчетных схемах подвижного состава и его математических моделях обязателен, особенно при исследовании динамики необрессоренных частей экипажа, причем нельзя заменять неравноупругость геометрической неровностью, ибо теряется качество процесса – возможность взаимодействия параметрически возбуждаемых и вынужденных колебаний экипажа.

Разумеется, ввод неравноупругости железнодорожного пути существенным образом усложняет решение задачи исследования динамических свойств подвижного состава особенно тогда, когда аддитивное внешнее возмущение является случайным процессом. Об этом пойдет речь в следующей статье, но не нужно забывать о методе статистических испытаний, который достаточно трудоемкий, однако легко реализуется на вычислительных машинах и позволяет анализировать практически любые динамические системы.

Если исследуемая механическая система является нелинейной и находится под действием мультипликативного и аддитивного возмущений, то всегда требуется провести анализ устойчивости найденных решений, хотя бы по первому приближению, но наличие мультипликативного возбуждения существенным образом усложняет изучение данной задачи.

Очевидно, что говорить о резонансной скорости движения железнодорожного экипажа как о какой-то конкретной величине совершенно невозможно, так как реальный железнодорожный путь всегда в продольном направлении неравноупруг. Речь может идти только о зонах резонансных скоростей подвижного состава. Причем нужно находить области не только простых, но и комбинационных параметрических резонансов разностного типа (что характерно для диссипативных динамических систем).

Список литературы

1. Болотин, В. В. Динамическая устойчивость упругих систем [Текст] / В. В. Болотин. – М.: Гостехиздат, 1956. – 600 с.

2. Гуляев, В. И. Прикладные задачи теории нелинейных колебаний механических систем [Текст] / В. И. Гуляев, В. А. Баженов, С. Л. Попов. – М.: Высшая школа, 1989. – 383 с.
3. Болотин, В. В. Вибрации в технике: Справочник. Т. 1. Колебания линейных систем [Текст] / В. В. Болотин. – М.: Машиностроение, 1978. – 352 с.
4. Шмидт, Г. Параметрические колебания / Г. Шмидт. – М.: Мир, 1978. – 336 с.

References

1. Bolotin V. V. *Dinamicheskaya ustoychivost' uprugikh system* (Dynamic stability of elastic systems). Moscow: Gostekhizdat, 1956, 600 p.
2. Guliaev V. I. Bazhenov V. A., Popov S. L. *Prikladnye zadachi teorii nelineynykh kolebaniy mekhanicheskikh sistem* (Applications of the theory of nonlinear oscillations of mechanical systems). Moscow: Vysshaya shkola, 1989, 383 p.
3. Bolotin V. V. *Vibratsii v tekhnike: Spravochnik. T. 1. Kolebaniya lineynykh sistem* (Vibration Technique: A Handbook. T. 1. Vibrations of linear systems). Moscow: Mashinostroenie, 1978, 352 p.
4. Shmidt G. *Parametricheskie kolebaniya* (Parametric oscillations). Moscow: Mir, 1978, 336 p.

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

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Nekhaev Victor Alekseevich

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

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Нехаев, В. А. Взаимодействие вынужденных и параметрических возбужденных колебаний подвижного состава при движении по неравноупругому по протяженности пути с неровностями на поверхности катания рельсов [Текст] / В. А. Нехаев // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2016. – № 3 (27). – С. 44 – 58.

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Nekhaev V. A. The dynamics for non-spring mass of rolling stock in its motion on non-equal-elasticity of railway track with bumps; the interaction for forced and parametric oscillations. Journal of Transsib Railway Studies, 2016, vol. 27, no. 3, pp. 44 – 58. (In Russian).

УДК 629.488.27; 629.4.018

В. В. Харламов, Д. И. Попов, А. В. Литвинов

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

УНИВЕРСАЛЬНЫЙ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫЙ СТЕНД ДЛЯ НАГРУЗОЧНЫХ ИСПЫТАНИЙ ТЯГОВЫХ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ И ДВИГАТЕЛЕЙ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Аннотация. В статье представлен универсальный энергоэффективный стенд для нагрузочных испытаний тяговых асинхронных двигателей и двигателей постоянного тока. Предлагается использование двух вариантов схем для проведения испытаний тяговых двигателей постоянного тока с последовательным возбуждением и асинхронных двигателей, а также тяговых двигателей постоянного тока с параллельным (независимым) возбуждением и асинхронных двигателей, каждый из которых позволяет реализовать энергоэффективный метод испытаний – метод взаимной нагрузки. Приводятся преимущества применения предлагаемого стенда. Расчет основных параметров, фиксируемых в процессе испытаний (токов, напряжений и мощности),

предлагается выполнить с помощью математических моделей. Каждая из математических моделей учитывает работу испытуемых асинхронных тяговых двигателей и тяговых двигателей постоянного тока (последовательного или параллельного (независимого) возбуждения) по методу взаимной нагрузки: электрическая и механическая связь. В заключении статьи приводятся предполагаемые результаты от внедрения универсального энергоэффективного стенда для нагрузочных испытаний тяговых асинхронных двигателей и двигателей постоянного тока.

Ключевые слова: универсальный стенд, асинхронный тяговый двигатель, тяговый двигатель постоянного тока, нагрузочные испытания, математическая модель.

V. V. Kharlamov, D. I. Popov, A. V. Litvinov

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

ENERGY EFFICIENT UNIVERSAL STAND FOR LOAD TESTING OF ASYNCHRONOUS TRACTION MOTORS AND DC MOTORS

Abstract. The article presents a universal energy-efficient stand for load testing of asynchronous traction motors, and DC motors. It is proposed to use two options of schemes for testing of traction DC motors with serial excitation and asynchronous motors, and traction motors DC parallel (independent) excitation and asynchronous motors, each of which allows you to implement energy-efficient test method – the method of mutual loading. Given the advantages of the use of the proposed stand. The calculation of the main parameters recorded during the test: currents, voltages and power are invited to perform with the help of mathematical models. Each of the mathematical models takes into account the work of the subjects of the asynchronous traction motors and traction motors DC series or parallel (independent) excitation) by the method of mutual loading: electrical and mechanical link. In conclusion, the article sets out the intended results from the implementation of energy-efficient universal stand for load testing of asynchronous traction motors, and DC motors.

Keywords: universal stand, asynchronous traction motor, traction DC motor, load test, mathematical model.

Одним из ключевых направлений развития страны является использование потенциала по энергосбережению и повышению энергетической эффективности. Утвержденная Правительством Российской Федерации государственная программа «Энергосбережение и повышение энергетической эффективности на период до 2020 года» включает в себя ряд подпрограмм: «Энергосбережение и повышение энергетической эффективности в электроэнергетике», «Энергосбережение и повышение энергетической эффективности в теплоснабжении и системах коммунальной инфраструктуры», «Энергосбережение и повышение энергетической эффективности в промышленности», «Энергосбережение и повышение энергетической эффективности в сельском хозяйстве», «Энергосбережение и повышение энергетической эффективности на транспорте». Одно из общих направлений приведенных программ – это внедрение энергоэффективного электропривода [1].

В настоящее время в рамках «Стратегии развития железнодорожного транспорта в Российской Федерации до 2030 года» деятельность ОАО «РЖД» направлена на обновление инфраструктуры и подвижного состава, повышение энергетической эффективности предприятий и др. Одной из задач является внедрение инновационных материалов, технических средств и технологий в области эксплуатации и ремонта инфраструктуры и подвижного состава, обеспечивающих снижение стоимости их жизненного цикла и повышение надежности [2].

Замена и обновление локомотивного парка на локомотивы с повышенной энергоэффективностью, улучшенными тяговыми свойствами и рекуперацией энергии возможна при использовании как тягового привода постоянного тока, так и в случае применения асинхронного тягового привода. Использование того или иного типа привода зависит от многих факторов, из которых можно выделить условия эксплуатации и технико-экономические показатели локомотива. Так, ОАО «РЖД» в настоящее время приобретает локомотивы всех типов: электровозы (2ЭС4К, 2ЭС5К, ЭП2К, 2ЭС5, 2ЭС6, 2ЭС7, 2ЭС10, ЭП20 и др.), тепловозы (2ТЭ25К, 2ТЭ25А, ТЭМ18ДМ, ТЭМ31, ТЭМ9Н, ТЭМ14 и др.), электропоезда («Ласточка», «Сапсан», ЭД4М и др.), газотурбовоз (ГТ1h), а также промышленный железнодорожный транспорт.

Однако введение в эксплуатацию новых локомотивов требует наличия соответствующей ремонтной базы. Как известно, качество ремонта во многом обусловлено наличием необходимой оснастки, автоматизированных и механизированных ремонтных комплексов, испытательных станций и лабораторий [3].

Примерно четверть отказов оборудования локомотивов приходится на тяговые двигатели. Устранение отказов требует, как правило, выкатки электродвигателей, что приводит к значительным простоям локомотивов и существенным затратам на их ремонт.

Авторами статьи предлагается универсальный энергоэффективный стенд для проведения нагрузочных испытаний тяговых асинхронных двигателей и тяговых двигателей постоянного тока. Проведение нагрузочных испытаний позволит выполнить настройку тяговых двигателей с выводом на необходимый режим работы, установить соответствие параметров, заявленных заводом-изготовителем, оценить качество проведенного ремонта.

Предлагаемый стенд позволяет отказаться от тиристорных преобразователей, осуществляющих поддержание напряжения и вольтодобавку в цепи нагрузочной машины, как это реализовано на существующих испытательных станциях [4]. Замена таких преобразователей произведена устройствами, выполненными на базе неуправляемых выпрямителей. В качестве устройства для регулирования параметров испытуемой и нагрузочной машин использованы преобразователи частоты. Стенд позволяет проводить испытания наиболее экономичным методом – методом взаимной нагрузки – двигателей постоянного и переменного тока. При этом в процессе испытаний одна машина работает под нагрузкой в режиме двигателя, а другая – в режиме генератора, вырабатывая электрическую мощность, которая идет на питание первой машины. Таким образом, из сети потребляется мощность, равная суммарным потерям в обеих работающих машинах.

Использование преобразователей частоты в составе стенда позволяет не только осуществить наиболее экономичный способ регулирования режимов работы асинхронных тяговых двигателей, но и приблизить условия питания асинхронных двигателей к условиям эксплуатации за счет питания от локомотивных тяговых преобразователей частоты.

Универсальность стенда позволит сократить капитальные затраты на проектирование испытательных станций в случае строительства станций для тяговых асинхронных двигателей и двигателей постоянного тока по отдельности.

В статье приведены два варианта схемы универсального стенда для проведения нагрузочных испытаний асинхронных тяговых двигателей и тяговых двигателей постоянного тока. Первый вариант – испытание асинхронных двигателей и двигателей постоянного тока с параллельным (независимым) возбуждением, второй – испытание асинхронных двигателей и двигателей постоянного тока с последовательным возбуждением.

Стенд для испытания асинхронных двигателей и двигателей постоянного тока с параллельным (независимым) возбуждением (рисунок 1) состоит из следующих элементов: 1 и 2 – частотные преобразователи; 1.1, 2.1 – неуправляемые выпрямители; 1.2, 2.2 – звенья постоянного тока; 1.3, 2.3 – управляемые инверторы; 3 – общая шина постоянного тока, соединяющая звенья постоянного тока двух частотных преобразователей; 4 – блок питания обмоток возбуждения; 4.1, 4.2 – управляемые источники постоянного тока; 5, 6, 7, 8 – контакторы; 9, 10 – испытуемый и нагрузочный асинхронные двигатели; 13, 14 – испытуемый и нагрузочный двигатели постоянного тока; 11, 15 – муфты; 12 – неуправляемый выпрямитель для питания цепей якоря двигателей постоянного тока; 16 – неуправляемый выпрямитель в качестве вольтодобавочного преобразователя; 17 – группа контактов для переключения машин на режим двигателя или нагрузки.

Следует отметить, что часть схемы, предназначенная для проведения испытаний асинхронных тяговых двигателей, состоит из следующих элементов: 1 – 3, 6, 7, 9 – 11, а часть схемы, предназначенная для проведения испытаний тяговых двигателей постоянного тока, включает в себя следующий набор элементов: 1 – 5, 8, 12 – 17.

В случае необходимости испытания асинхронных двигателей и двигателей постоянного тока с последовательным возбуждением схема должна быть изменена и должна иметь вид, представленный на рисунке 2.

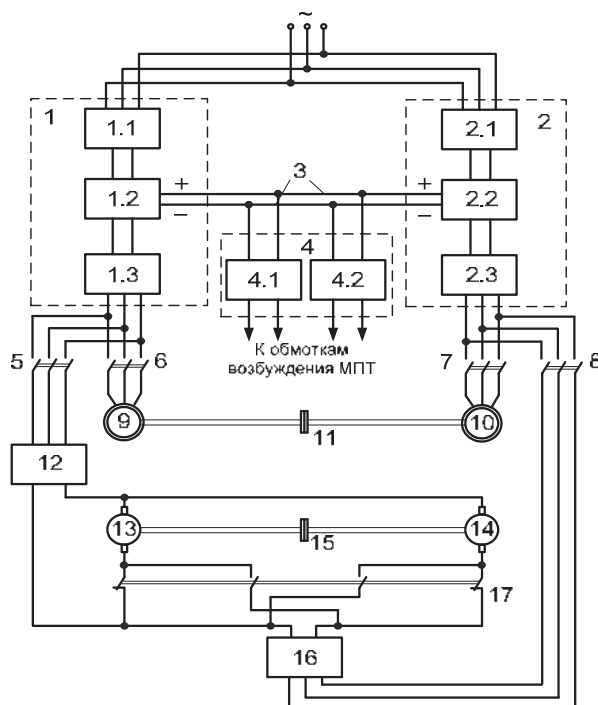


Рисунок 1 – Стенд для нагрузочных испытаний асинхронных двигателей и двигателей постоянного тока с параллельным (независимым) возбуждением

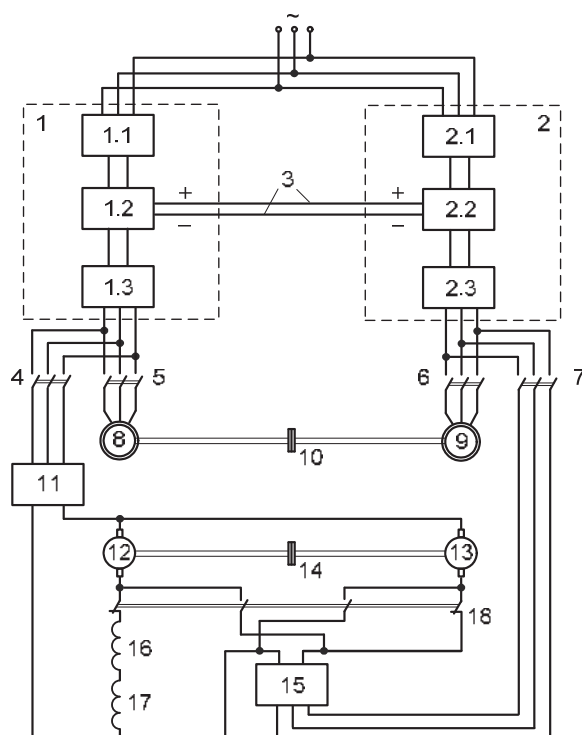


Рисунок 2 – Стенд для нагрузочных испытаний асинхронных двигателей и двигателей постоянного тока с последовательным возбуждением

Стенд для испытания асинхронных двигателей и двигателей постоянного тока с последовательным возбуждением (см. рисунок 2) состоит из тех же элементов, что и стенд, представленный на рисунке 1, за исключением управляемых источников постоянного тока для

питания обмоток возбуждения. В схеме данного стенда обмотки возбуждения включены последовательно с обмоткой якоря испытуемой машины. В соответствии с этим нумерация элементов схемы несколько изменена по сравнению с предыдущей схемой (см. рисунок 1).

В процессе проектирования стенда необходимо согласовать его параметры (потребляемые токи по всем фазам сети и мощность) с параметрами питающей сети. При этом следует учитывать не только установившиеся режимы работы в процессе испытаний, но и переходные процессы при пуске двигателей и выводе их на режим нагрузки.

Линейные токи, потребляемые стендом при испытании асинхронных двигателей, могут быть найдены при решении системы уравнений [5]:

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{d\dot{i}_{1a}}{dt} &= \frac{1}{\sigma_1 \cdot L_{l1}} \cdot \left[u_{1a}(t) - \dot{i}_{1a} \cdot R_{l1} + k_{l1} \cdot \left[\dot{i}'_{2a} \cdot R'_{l2} + \frac{p}{\sqrt{3}} \cdot \omega \cdot (L_{l12} \cdot (\dot{i}_{1b} - \dot{i}_{1c}) + L_{l2} \cdot (\dot{i}'_{2b} - \dot{i}'_{2c})) \right] \right]; \\ \frac{d\dot{i}_{1b}}{dt} &= \frac{1}{\sigma_1 \cdot L_{l1}} \cdot \left[u_{1b}(t) - \dot{i}_{1b} \cdot R_{l1} + k_{l1} \cdot \left[\dot{i}'_{2b} \cdot R'_{l2} + \frac{p}{\sqrt{3}} \cdot \omega \cdot (L_{l12} \cdot (\dot{i}_{1c} - \dot{i}_{1a}) + L_{l2} \cdot (\dot{i}'_{2c} - \dot{i}'_{2a})) \right] \right]; \\ \frac{d\dot{i}_{1c}}{dt} &= \frac{1}{\sigma_1 \cdot L_{l1}} \cdot \left[u_{1c}(t) - \dot{i}_{1c} \cdot R_{l1} + k_{l1} \cdot \left[\dot{i}'_{2c} \cdot R'_{l2} + \frac{p}{\sqrt{3}} \cdot \omega \cdot (L_{l12} \cdot (\dot{i}_{1a} - \dot{i}_{1b}) + L_{l2} \cdot (\dot{i}'_{2a} - \dot{i}'_{2b})) \right] \right]; \\ \frac{d\dot{i}'_{2a}}{dt} &= -\frac{1}{\sigma_1 \cdot L_{l2}} \cdot \left[k_{l1} \cdot (u_{1a}(t) - \dot{i}_{1a} \cdot R_{l1}) + \left[\dot{i}'_{2a} \cdot R'_{l2} + \frac{p}{\sqrt{3}} \cdot \omega \cdot (L_{l12} \cdot (\dot{i}_{1b} - \dot{i}_{1c}) + L_{l2} \cdot (\dot{i}'_{2b} - \dot{i}'_{2c})) \right] \right]; \\ \frac{d\dot{i}'_{2b}}{dt} &= -\frac{1}{\sigma_1 \cdot L_{l2}} \cdot \left[k_{l1} \cdot (u_{1b}(t) - \dot{i}_{1b} \cdot R_{l1}) + \left[\dot{i}'_{2b} \cdot R'_{l2} + \frac{p}{\sqrt{3}} \cdot \omega \cdot (L_{l12} \cdot (\dot{i}_{1c} - \dot{i}_{1a}) + L_{l2} \cdot (\dot{i}'_{2c} - \dot{i}'_{2a})) \right] \right]; \\ \frac{d\dot{i}'_{2c}}{dt} &= -\frac{1}{\sigma_1 \cdot L_{l2}} \cdot \left[k_{l1} \cdot (u_{1c}(t) - \dot{i}_{1c} \cdot R_{l1}) + \left[\dot{i}'_{2c} \cdot R'_{l2} + \frac{p}{\sqrt{3}} \cdot \omega \cdot (L_{l12} \cdot (\dot{i}_{1a} - \dot{i}_{1b}) + L_{l2} \cdot (\dot{i}'_{2a} - \dot{i}'_{2b})) \right] \right]; \\ \frac{d\omega}{dt} &= \frac{-p}{J \cdot \sqrt{3}} \cdot [\dot{i}_{1a} \cdot (\dot{i}'_{2b} - \dot{i}'_{2c}) + \dot{i}_{1b} \cdot (\dot{i}'_{2c} - \dot{i}'_{2a}) + \dot{i}_{1c} \cdot (\dot{i}'_{2a} - \dot{i}'_{2b})] \cdot L_{l12} + [\dot{i}_{2a} \cdot (\dot{i}'_{2b} - \dot{i}'_{2c}) + \dots \\ &\dots + \dot{i}_{2b} \cdot (\dot{i}'_{2c} - \dot{i}'_{2a}) + \dot{i}_{2c} \cdot (\dot{i}'_{2a} - \dot{i}'_{2b})] \cdot L_{l21} - \frac{M_{\text{нот}}}{J} \cdot \text{sign}(\omega); \\ \frac{d\dot{i}_{2a}}{dt} &= \frac{1}{\sigma_2 \cdot L_{l2}} \cdot \left[u_{2a}(t) - \dot{i}_{2a} \cdot R_{l2} + k_{l2} \cdot \left[\dot{i}'_{2a} \cdot R'_{l2} + \frac{p}{\sqrt{3}} \cdot \omega \cdot (L_{l12} \cdot (\dot{i}_{2b} - \dot{i}_{2c}) + L_{l2} \cdot (\dot{i}'_{2b} - \dot{i}'_{2c})) \right] \right]; \\ \frac{d\dot{i}_{2b}}{dt} &= \frac{1}{\sigma_2 \cdot L_{l2}} \cdot \left[u_{2b}(t) - \dot{i}_{2b} \cdot R_{l2} + k_{l2} \cdot \left[\dot{i}'_{2b} \cdot R'_{l2} + \frac{p}{\sqrt{3}} \cdot \omega \cdot (L_{l12} \cdot (\dot{i}_{2c} - \dot{i}_{2a}) + L_{l2} \cdot (\dot{i}'_{2c} - \dot{i}'_{2a})) \right] \right]; \\ \frac{d\dot{i}_{2c}}{dt} &= \frac{1}{\sigma_2 \cdot L_{l2}} \cdot \left[u_{2c}(t) - \dot{i}_{2c} \cdot R_{l2} + k_{l2} \cdot \left[\dot{i}'_{2c} \cdot R'_{l2} + \frac{p}{\sqrt{3}} \cdot \omega \cdot (L_{l12} \cdot (\dot{i}_{2a} - \dot{i}_{2b}) + L_{l2} \cdot (\dot{i}'_{2a} - \dot{i}'_{2b})) \right] \right]; \\ \frac{d\dot{i}'_{2a}}{dt} &= -\frac{1}{\sigma_2 \cdot L_{l2}} \cdot \left[k_{l2} \cdot (u_{2a}(t) - \dot{i}_{2a} \cdot R_{l2}) + \left[\dot{i}'_{2a} \cdot R'_{l2} + \frac{p}{\sqrt{3}} \cdot \omega \cdot (L_{l12} \cdot (\dot{i}_{2b} - \dot{i}_{2c}) + L_{l2} \cdot (\dot{i}'_{2b} - \dot{i}'_{2c})) \right] \right]; \\ \frac{d\dot{i}'_{2b}}{dt} &= -\frac{1}{\sigma_2 \cdot L_{l2}} \cdot \left[k_{l2} \cdot (u_{2b}(t) - \dot{i}_{2b} \cdot R_{l2}) + \left[\dot{i}'_{2b} \cdot R'_{l2} + \frac{p}{\sqrt{3}} \cdot \omega \cdot (L_{l12} \cdot (\dot{i}_{2c} - \dot{i}_{2a}) + L_{l2} \cdot (\dot{i}'_{2c} - \dot{i}'_{2a})) \right] \right]; \\ \frac{d\dot{i}'_{2c}}{dt} &= -\frac{1}{\sigma_2 \cdot L_{l2}} \cdot \left[k_{l2} \cdot (u_{2c}(t) - \dot{i}_{2c} \cdot R_{l2}) + \left[\dot{i}'_{2c} \cdot R'_{l2} + \frac{p}{\sqrt{3}} \cdot \omega \cdot (L_{l12} \cdot (\dot{i}_{2a} - \dot{i}_{2b}) + L_{l2} \cdot (\dot{i}'_{2a} - \dot{i}'_{2b})) \right] \right]; \end{aligned} \right. \quad (1)$$

где $u_{1a}(t)$, $u_{1b}(t)$, $u_{1c}(t)$, $u_{2a}(t)$, $u_{2b}(t)$, $u_{2c}(t)$ – напряжения, подводимые к обмоткам статора;

$R_{11}, R_{21}, R'_{12}, R'_{22}$ – активные сопротивления обмоток статора и приведенных обмоток ротора;

$L_{11}, L_{12}, L_{21}, L_{22}$ – индуктивности обмоток статора и приведенных обмоток ротора;

L_{112} и L_{212} – взаимные индуктивности;

σ и k – коэффициенты, определяемые отношениями индуктивностей;

$i_{11a}, i_{11b}, i_{11c}, i'_{12a}, i'_{12b}, i'_{12c}$ – токи обмотки статора и приведенного ротора первой машины;

$i_{21a}, i_{21b}, i_{21c}, i'_{22a}, i'_{22b}, i'_{22c}$ – токи обмотки статора и приведенного ротора второй машины;

p – число пар полюсов;

t – время;

J – суммарный момент инерции обеих асинхронных машин;

$M_{\text{пот}}$ – момент потерь (как сумма моментов потерь в обеих машинах);

ω – угловая скорость вращения валов.

Система уравнений (1) является математической моделью, которая позволяет описать процесс испытания асинхронных двигателей и учесть работу ее основных элементов, включая их механические и электрические связи.

Приведенная математическая модель представляет собой систему из 13 дифференциальных уравнений:

уравнения с первого по шестое описывают электромагнитные процессы, происходящие в первой электрической машине;

уравнения с восьмого по тринадцатое описывают электромагнитные процессы, происходящие во второй электрической машине;

седьмое уравнение системы определяет общую частоту вращения механически сопряженных электрических машин, связывая электромагнитные моменты, моменты сопротивления и моменты инерции этих машин.

Полученные в результате решения системы уравнений (1) значения токов и напряжений, приложенных к фазам, позволяют найти мощности, передаваемые преобразователями частоты на асинхронные двигатели.

При проектировании схемы испытания двигателей с независимым возбуждением должна быть решена следующая система уравнений:

$$\begin{cases} \frac{dI_{a1}}{dt} = \frac{1}{L_{a1}} [U_a(t) - \omega \cdot C_1 \cdot \Phi_1(I_{b1}) - I_{a1} \cdot R_{a1}]; \\ \frac{dI_{a2}}{dt} = \frac{1}{L_{a2}} [U_a(t) + U_{\text{ВД}}(t) - \omega \cdot C_2 \cdot \Phi_2(I_{b2}) - I_{a2} \cdot R_{a2}]; \\ \frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{J} [C_1 \cdot I_{a1} \cdot \Phi_1(I_{b1}) - C_2 \cdot I_{a2} \cdot \Phi_2(I_{b2})], \end{cases} \quad (2)$$

где $U_a(t)$ – напряжение, подаваемое с неуправляемого выпрямителя для питания цепей якоря двигателей постоянного тока;

$U_{\text{ВД}}(t)$ – напряжение вольтодобавочного преобразователя;

C_1, C_2 – постоянные коэффициенты испытуемой и нагрузочной машин, определяемые их конструктивными параметрами;

Φ_1, Φ_2 – основные магнитные потоки испытуемой и нагрузочной машин;

L_{a1}, L_{a2} – индуктивности цепей якоря испытуемой и нагрузочной машин;

$I_{a1}, I_{a2}, I_{b1}, I_{b2}$ – токи якоря и возбуждения испытуемой и нагрузочной машин;

R_{a1}, R_{a2} – сопротивления якоря испытуемой и нагрузочной машин;

J – суммарный момент инерции системы;

ω – угловая скорость вращения валов машин.

Для схемы испытания двигателей с последовательным возбуждением система уравнений принимает вид:

$$\begin{cases} \frac{dI_{a1}}{dt} = \frac{1}{L_{a1}} [U_a(t) - \omega \cdot C_1 \cdot \Phi_1(I_{a1}) - I_{a1} \cdot (R_{a1} + r_{b1} + r_{b2})]; \\ \frac{dI_{a2}}{dt} = \frac{1}{L_{a2}} [U_a(t) + U_{вд}(t) - \omega \cdot C_2 \cdot \Phi_2(I_{a1}) - I_{a2} \cdot R_{a2}]; \\ \frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{J} [C_1 \cdot I_{a1} \cdot \Phi_1(I_{a1}) - C_2 \cdot I_{a2} \cdot \Phi_2(I_{a1})], \end{cases} \quad (3)$$

где r_{b1} , r_{b2} – сопротивления обмоток возбуждения испытуемой и нагрузочной машин.

Напряжения $U_a(t)$ и $U_{вд}(t)$ и определенные при решении систем уравнений (2) и (3) значения токов позволяют найти мощности, передаваемые преобразователями частоты на двигатели постоянного тока (см. рисунок 1). Зная мощности, передаваемые двигателям, можно найти необходимую мощность и токи, потребляемые схемой испытаний из сети.

Предложенные схемы и подход определения необходимых параметров питающей сети на этапе проектирования позволяют унифицировать испытательные стенды для различных типов тяговых двигателей, использовать энергоэффективный метод нагрузочных испытаний – метод взаимной нагрузки, минимизировать количество как силовых преобразователей электрической энергии, используемых при испытаниях, так и систем управления силовыми преобразователями.

Таким образом, использование предложенных схем и моделей позволит снизить капитальные затраты как на разработку и изготовление стенда, так и на его эксплуатацию и проведение самих испытаний.

Список литературы

1. Государственная программа Российской Федерации «Энергосбережение и повышение энергетической эффективности на период до 2020 года» [Текст]. – М.: Собрание законодательства РФ. – 2010. – № 4. – Ст. 644.
2. Харламов, В. В. Разработка алгоритма выбора схемы испытаний асинхронных тяговых двигателей методом взаимной нагрузки [Текст] / В. В. Харламов, Д. И. Попов, А. В. Литвинов // Вестник Транспорта Поволжья / Самарским гос. ун-т путей сообщения. – Самара. – 2015. – № 6. – С. 40 – 46.
3. Испытание асинхронных тяговых двигателей методом взаимной нагрузки [Текст] / В. Д. Авилов, Д. И. Попов и др. // Актуальные вопросы транспортной отрасли: проблемы и решения: Материалы всерос. науч.-практ. конф. – Воронеж: Руна, 2013. – № 1. – С. 8 – 12.
4. Автоматизированная станция испытания электрических машин на тиристорных преобразователях [Текст] / В. О. Мельк, С. А. Пимшин и др. // Новые технологии – железнодорожному транспорту: подготовка специалистов, организация перевозочного процесса, эксплуатация технических средств: Межвуз. темат. сб. науч. тр. / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2000. – С. 114 – 116.
5. Авилов, В. Д. Математическая модель процесса испытаний асинхронных двигателей методом их взаимной нагрузки [Текст] / В. Д. Авилов, Д. И. Попов, А. В. Литвинов // Вестник СибАДИ / Сибирская гос. автомобильно-дорожная акад. – Омск. – 2013. – № 5 (33). – С. 75 – 81.

References

1. Gosudarstvennaia programma Rossiiskoi Federatsii «Energoberezhenie i povyshenie energeticheskoi effektivnosti na period do 2020 goda» (State program of the Russian Federation «Ener-

gy saving and energy efficiency for the period till 2020»). Moscow: The decree of the Government of the Russian Federation, 2010.

2. Kharlamov V. V., Popov D. I., Litvinov A. V. Development of the algorithm selection schemes tests of asynchronous traction motors by mutual loads [Razrabotka algoritma vybora skhemy ispytaniia asinkhronnykh tiagovykh dvigatelei metodom vzaimnoi nagruzki]. Vestnik Transporta Povolzh'ia – Journal of transportation of The Volga Region, 2015, pp. 40 – 46.

3. Avilov V. D., Popov D. I., Dankivtsi V. T., Litvinov A. V. Testing asynchronous traction motors by mutual loads [Ispytanie asinkhronnykh tiagovykh dvigatelei metodom vzaimnoi nagruzki]. Materialy konferentsii «Aktual'nye voprosy transportnoi otrasli: problemy i resheniia» (Materials of all-Russian scientific-practical conference «Actual problems of the transport sector: problems and solutions»). Voronezh, 2013, no. 1, pp. 8 – 12.

4. Melk V. O., Pimkin S. A., Shakhov I. G., Smykov S. V., Moiseenko V. K., Silakov A. P. Automated test station, electrical machines by thyristor converters [Avtomatizirovannaia stantsiia ispytaniia elektricheskikh mashin na tiristornykh preobrazovatelyakh]. Interuniversity collection «New technologies – rail transport: training of specialists, organization of the transportation process, the operation of technical means» (Mezhvuzovskii sbornik «Novye tekhnologii – zheleznodorozhnomu transportu: podgotovka spetsialistov, organizatsiia perevozochного protsessa, ekspluatatsiia tekhnicheskikh sredstv»). – Omsk, 2000, pp. 114 – 116.

5. Avilov V. D., Popov D. I., Litvinov A. V. a Mathematical model of the process of testing induction motors by their mutual loads [Matematicheskai model' protsessa ispytaniia asinkhronnykh dvigatelei metodom ikh vzaimnoi nagruzki]. Vestnik SibADI – Bulletin of the Siberian Automobile and Highway Academy, 2013, no. 5 (33), pp. 75 – 81.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Харламов Виктор Васильевич

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

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

E-mail: emoe@omgups.ru

Попов Денис Игоревич

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

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

E-mail: Popovomsk@yandex.ru

Литвинов Артем Валерьевич

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Локомотивы», ОмГУПС

E-mail: artyom_hawk@mail.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Харламов, В. В. Универсальный энергоэффективный стенд для нагрузочных испытаний асинхронных

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Kharlamov Victor Vasilyevich

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marksa pr., Omsk, 644046, the Russian Federation.

Doctor of Technical Science, Professor, the head of department «Electrical machines and general electrical engineering», OSTU.

E-mail: emoe@omgups.ru

Popov Denis Igorevich

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marksa pr., Omsk, 644046, the Russian Federation.

Candidat of Technical Science, Associate professor of the department «Electrical machines and general electrical engineering», OSTU/

E-mail: Popovomsk@yandex.ru

Litvinov Artyom Valerievich

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marksa pr., Omsk, 644046, the Russian Federation.

Candidat of Technical Science, Associate professor of the department «Locomotives», OSTU.

E-mail: artyom_hawk@mail.ru

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Kharlamov V. V., Popov D. I., Litvinov A. V. Energy-efficient universal stand for load tests of asynchronous trac-

тяговых двигателей и двигателей постоянного тока [Текст] / В. В. Харламов, Д. И. Попов, А. В. Литвинов // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2016. – № 3 (27). – С. 58 – 66.

tion motors and DC motors Journal of Transsib Railway Studies, 2016, vol. 27, no. 3, pp. 58 – 66. (In Russian).

УДК 625.143

А. П. Хоменко¹, С. С. Черняк¹, В. Л. Бройдо²

¹Иркутский государственный университет путей сообщения (ИрГУПС), г. Иркутск, Российская Федерация,

²ОАО ПО «Иркутский завод тяжелого машиностроения», г. Иркутск, Российская Федерация

РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ЭЛЕКТРОПЕЧНОЙ ВЫПЛАВКИ ЛЕГИРОВАННОЙ ВАНАДИЕМ РЕЛЬСОВОЙ СТАЛИ И КАЧЕСТВО РЕЛЬСОВ

Аннотация. Рассмотрены вопросы разработки состава и технологии выплавки, разливки и термической обработки легированных рельсовых сталей, обладающих высокой эксплуатационной стойкостью. Специалистами ЕВРАЗ ЗСМК (г. Новокузнецк) и ИрГУПС была предложена схема комплексного легирования рельсовой стали и на площадке железнодорожного проката ЕВРАЗ ЗСМК проведена отработка технологии электропечной выплавки и термоупрочнения суперперлитной стали повышенной чистоты, обладающей высокой износостойкостью. Выпущено несколько опытных партий рельсов, которые испытаны на перевальном участке Иркутск – Слюдянка ВСЖД с неблагоприятным сочетанием эксплуатационных нагрузок, вызывающих повышенный износ рельсов. Результаты испытаний показали высокую надежность опытных рельсов и целесообразность освоения их промышленного выпуска.

Авторами обобщены результаты многочисленных экспериментальных разработок, предложены методологические основы поиска и отработки как отдельных стадий, так и технологического процесса производства рельсовых сталей в целом. Приведены конкретные данные о свойствах низколегируемых сталей, определены возможности использования инновационных методов в модернизации технологии выплавки и формирования комплекса необходимых свойств. В процессе отработки технологии выплавки стали для легирования металла изучены возможности электропечной выплавки взамен мартеновской, а также использования легирующих компонентов шихты на основе традиционно используемых дорожностоящих ферросплавов, так и ванадийсодержащих шлаков, которые можно в значительной степени отнести к отходам металлургического производства. Определены также оптимальные соотношения технологических параметров плавки и внепечной обработки стали на оптимальное соотношение ванадия и азота в стали, обеспечивающее высокие показатели пластических свойств, в том числе и при низкой температуре эксплуатации. При этом достигнуто оптимальное соотношение легирующих элементов стали, обеспечивающее оптимизацию комплекса служебных свойств, что подтверждается данными механических испытаний, металлографических исследований, а главное, – высокими показателями промышленных испытаний.

Ключевые слова легированная рельсовая сталь, химический состав, механические свойства, низкотемпературная надежность, выплавка, ванадийсодержащие конверторные шлаки, очистка стали, неметаллические включения, непрерывная разливка стали, термическая обработка, световая, количественная, электронная микроскопия.

Andrey P. Khomenko¹, Saul S. Chernyak¹, Vladimir L. Broido²

¹Irkutsk State Transport University (ISTU), Irkutsk, the Russian Federation,

²JSC PO «Irkutsk Heavy Machinery Plant», Irkutsk, the Russian Federation

DEVELOPMENT ELECTROOVEN ALLOY SMELTING TECHNOLOGY VANADIUM STEEL RAIL

Abstract. The questions of the composition of the design and technology of smelting, casting and heat treatment of alloyed rail steels having high operational stability. Together specialists EVRAZ ZSMK Novokuznetsk and IrGUPS was proposed complex doping scheme of the rail steel and rail rolling floor EVRAZ ZSMK was conducted testing of the technology of smelting and eletropechnoy thermostrengthening superperlitnoy steel of high purity, which has high wear resistance. several experimental batches were produced rails, which are tested on the site of the saddle-point Irkutsk-Slyudyanka VSZHD with an unfavorable combination of operational loads, causing increased wear of the rails. The test results showed high wear resistance experienced rails and expediency of development of industrial production.

Keywords: alloy rail steel, chemical composition, mechanical properties, low-temperature reliability, smelting, vanadium converter slag, cleaning of steel, non-metallic inclusions, continuous steel casting, heat treatment, light, quantitative electron microscopy.

Развитие железнодорожного транспорта связано с дальнейшим увеличением объемов перевозок, повышением скоростей движения и обеспечением безопасности и надежности подвижного состава и всех элементов пути [1]. Необходимым является, в частности, разработка и внедрение новых марок рельсовых сталей и рельсового проката, обладающих более высокими эксплуатационными свойствами. В рамках этого направления на ведущих металлургических предприятиях России, занимающихся производством рельсов, в последние годы проводится модернизация производства. Модернизация заключается в полном отказе от выплавки сталей для рельсов в мартеновских печах, использовании только кислородно-конвертерного и электропечного способов; освоении новых способов обеспечения чистоты сталей и разработке новых марок рельсовой стали, отличающихся повышенными эксплуатационными характеристиками; разработке и внедрении более совершенных методов и оборудования прокатки, термической обработки и проведения отделочных операций.

Для отработки более эффективной схемы легирования рельсовой стали с целью повышения уровня ее служебных свойств был выполнен ряд опытно-промышленных плавов [2 – 4] и опробованы новые схемы повышения чистоты стали, возможность использования которых обеспечивает применение электропечного способа плавки и внепечной обработки различными шлаками и газами. Для упрочнения использовались ванадий (0,03 – 0,07 %) и азот (0,010 – 0,020 %). Опробованы различные схемы легирования ванадием, раскисления стали и повышения качества стали уменьшением количества неметаллических включений.

При использовании традиционной шихтовки первых плавов было установлено, что чистота используемого скрапа не обеспечивает необходимого низкого уровня содержания остаточных элементов (хрома, никеля и меди), количество твердого чугуна в завалку (подвалку) увеличили с 5 – 15 до 20 – 30 т на плавку.

Окисление углерода производили кислородом, вводимым через сводовую водоохлаждаемую фурму, а также при необходимости присадками железной руды или агломерата.

По достижении необходимого содержания углерода и температуры ванны в печь присаживали до 50 кг чушкового алюминия. Раскисление стали проводили в печи силикомарганцем МнС17 и ферросилицием ФС65. Раскисление шлака в печи проводили присадкой порошка кокса, дробленого ферросилиция ФС75 и гранулированного алюминия АВ-86 в количестве до 1 кг/т каждого. Раскисление шлака (150 – 200 кг ФС75 и до 70 кг порошкообразного алюминия) приводило к получению стали с повышенной загрязненностью неметаллическими включениями. Во время выпуска в ковш присаживали ванадийсодержащие сплавы из расчета ввода в металл 0,03 – 0,07 % ванадия и силикокальций из расчета введения 650 – 800 г кальция на тонну. При необходимости металл корректировали по содержанию углерода присадкой в печь чугуна не более чем на 0,05 %, не позднее чем за 5 минут до выпуска и присадкой в ковш на выпуске сухих коксовых отсеков или электродной крошки до 0,03 % углерода. Выпуск стали производится под печным шлаком. В начале выпуска для десульфурации в ковш присаживали шлаковую смесь: известь 13 – 15 кг/т, плавиковый шпат 3 – 4 кг/т. В дальнейшем сталь на установках продувки стали азотом (УПСА) доводили по температуре (охлаждающей металлической сечкой) и химсоставу. Разливку осуществляли в изложницы. Нагрев и прокатку слитков производили по действующей на комбинате технологии производства железнодорожных рельсов. Свойства рельсовой стали, выплавленной в электропечах и мартенах, до термообработки приведены в таблице 1, после термообработки – в таблице 2 (сравнение свойств приведено за один промежуток времени для 128 плавов при средних значениях химического состава для стали, выплавленной в электропечах: 0,778 % С, 0,833 % Мп, 0,332 % Si, 0,0222 % Р, 0,00875 % S, 0,056 % V, 0,0075 % Al; для мартеновской стали: 0,758 % С, 0,904 % Мп, 0,330 % Si, 0,0177 % Р, 0,0267 % S, 0,0428 % V, 0,0062 % Al).

Рельсовая электросталь соответствует требованиям ГОСТ Р 51685-2013, а ее механические свойства выше, чем у рельсовой стали, выплавленной в мартеновских печах.

Проведенный на первых опытных плавках послиточный макроконтроль рельсового металла электросталеплавильного и мартеновского способов производства показывает, что для головных рельсовых темплетов выход первого сорта составил соответственно 50,2 и 53,3 %, второй сорт по ликвидации – 10,5 и 12,1 %, брак по неметаллическим включениям – 37,6 и 34,3 %, брак по расслою – 1, и 0,1 %, второй сорт по подкорковому пузырю – 0,4 и 0,2 %; для донных рельсовых темплетов выход первого сорта – 78,1 и 64,0 %, второй сорт по подкорковому пузырю – 10,1 и 15,4 %, брак по неметаллическим включениям – 11,8 и 18,8 %, брак по светлым корочкам – 0 и 0,4 %, брак по подкорковому пузырю – 0 и 0,4 %.

Контролем на неметаллические включения выявлено, что глинозема, сцементированного силикатом, а также нитридов и карбидов титана, вытянутых вдоль направления прокатки в виде дорожек-строчек, при просмотре продольных образцов, вырезанных по ГОСТ Р 51685-2013, не обнаружено. Электросталь значительно чище по сульфидным включениям. Средняя длина строчки пластичных силикатов в металле электросталеплавильного способа производства в 1,5 – 2,5 раза меньше, чем в мартеновской рельсовой стали. Положительные результаты технологии защищены патентом РФ [5].

Таблица 1 – Свойства стали до термической обработки

Способ производства	σ _т , МПа	σ _в , МПа	δ, %	Ψ, %	Твердость, НВ
Электросталь	632,8	1035,2	5,57	8,00	312,21
Мартеновская печь	593,4	981,6	6,09	8,125	298,03
Требования ГОСТ 24182-80	–	900	4	–	–

Таблица 2 – Свойства рельсов после термообработки

Способ производства	σ _т *, МПа	σ _в *, МПа	δ, %	Ψ, %	КСУ, МДж/м ²		Твердость				
					при +20°C	при -60°C	НВ ₈	НВ ₁₆	НВ _ш	НВ _{под}	НВ _{ПКГ}
Электросталь	964	1288	11,6	25,5	0,44	0,23	361,2	342,6	372,8	356,6	372,0
	931	1225	6,7	11,5	0,48	–					
Мартеновская сталь	972,2	1274	10,4	32,2	0,41	0,19	356,4	342,8	368,0	354,4	370,0
	953,5	1208	4,5	8,3	2,86	–					
Требования ТУ14-1-5233-93 (продольные образцы), не менее											
Электросталь	900	1230	8,0		0,29	0,20	300	300	менее 388	менее 388	341-388
Мартеновская сталь	885	1230	6,0		0,245	0,10	300	300	менее 388	менее 388	менее 388

Пр и м е ч а н и е: числитель – вдоль направления прокатки, знаменатель – поперек;

НВ₈ и НВ₁₆ – твердость головки рельса на расстоянии от поверхности катания 8 и 16 мм соответственно;

НВ_ш – твердость шейки рельса;

НВ_{под} – твердость подошвы рельса;

НВ_{ПКГ} – твердость поверхности катания головки.

Рельсы низкотемпературной надежности по ТУ 14-1-5233-93, отличающиеся повышенными значениями ударной вязкости при низкой температуре, необходимы для обеспечения безопасности движения на железнодорожном транспорте в восточных и северных регионах России, где температура зимой опускается до минус 40 °С и ниже. Повышенная ударная вязкость достигается за счет введения в сталь ванадия и азота, образующих мелкодисперсные карбонитриды ванадия. При выплавке такой стали в мартеновских печах используются ванадийсодержащие сплавы и азотированный феррованадий.

Важным параметром, указывающим на достижение требуемых для районов Крайнего Севера механических свойств стали, является отношение ванадия к азоту (V/N). При выплавке стали в мартеновских печах, где содержание азота в стали колеблется в пределах 0,005 – 0,007 %, данное соотношение поддерживается введением сплавов ванадия и азотированных ферросплавов. При производстве же стали в дуговых электросталеплавильных печах (в зависимости от условий выплавки) содержание азота может варьироваться в широких пределах и колебаться от 0,06 до 0,0015 %, поэтому при получении стабильных требуемых концентраций азота в металле возможна выплавка стали без использования дефицитных и дорогостоящих азотированных ферросплавов.

Выплавку и разливку металла производили по действующей технологической инструкции с изменениями, позволяющими стабилизировать содержание азота в готовой стали; раскисление стали в печи – силикомарганцем СМн17 в количестве 7,5 – 10 кг/т; шлак в печи раскисляли порошком кокса, дробленого ферросилиция ФС75 и гранулированного алюминия АВ86 в количестве 0,8 – 1,0 кг/т. Раскисление металла в ковше производили силикокальцием из расчета ввода в металл кальция 650 – 800 г/т и феррованадием 8,5 – 1,5 кг/т. После выпуска сталь обрабатывали на установках продувки стали азотом в течение 10 – 30 мин, там же при необходимости производили корректировку химического состава. Разливку осуществляли в слитки.

Аттестационные испытания проводили в объеме требований ТУ-14-1-5233-93 и действующих стандартов. При среднем содержании химических элементов выплавленной мартеновской стали 0,758 % С, 0,903 % Мп, 0,338 % Si, 0,017 % Р, 0,0297 % S, 0,038 % V, 0,0056 % Al, 0,0070 % N, и отношении V/N = 5,43; электростали: 0,770 % С, 0,870 % Мп, 0,343 % Si, 0,022 % Р, 0,0081 % S, 0,084 % V, 0,0081 % Al, 0,0092 % N и V/N = 7,10 механические свойства и твердость термоупрочненных рельсов из электростали выше, чем у рельсов из мартеновского металла.

Влияние технологических параметров выплавки и внепечной обработки стали на содержание азота определено следующим.

Поведение интенсивного окислительного периода с высокими скоростями окисления углерода V_c снижает содержание азота в стали, количество окисленного углерода ΔC действует аналогично (таблица 3).

Таблица 3 – Влияние скорости окисления и количества окисленного углерода на содержание азота

V_c , %/ч	0,26 – 0,5	0,51 – 0,7	0,71 – 2,38	ΔC , %	0,1 – 0,4	0,41 – 0,6	0,61 – 0,9	0,91 – 1,3
[N], %	0,0113	0,0110	0,0100	[N], %	0,0118	0,0103	0,0100	0,094
Количество плавов	16	14	44	Количество плавов	21	18	21	14

В связи с этим для увеличения содержания азота в стали шихтовку плавов предложено осуществлять не более чем на 0,10 – 0,40 % С выше верхнего содержания его в готовой стали.

Влияние температуры на всех этапах выплавки стали однозначно: с повышением температуры растворимость азота в стали возрастает. Зависимость увеличения содержания азота от температуры перед раскислением $t_{пр}$ и температуры после предварительного раскисления в печи t_p показана в таблице 4.

Таблица 4 – Влияние температуры перед раскислением и после предварительного раскисления в печи на содержание азота

$t_{пр}$, °С	1570 – 1585	1586 – 1590	t_p , °С	1520 – 1550	1551 – 1560	1561 – 1590
[N], %	0,00943	0,01043	[N], %	0,0096	0,0104	0,0105
Количество плавов	22	76	Количество плавов	30	15	53

Увеличение длительности окислительного периода $\tau_{оп}$ приводит к снижению содержания азота, увеличение же длительности восстановительного периода $\tau_{в.п}$ повышает концентрацию азота в стали (таблица 5).

Таблица 5 – Влияние длительности окислительного и восстановительного периода на содержание азота

$\tau_{оп}$, мин	15 – 30	31 – 40	41 – 60	61 – 80	$\tau_{в.п}$, мин	<15	16 – 30	31 – 50
[N], %	0,0109	0,010	0,0105	0,0097	[N], %	0,0096	0,0101	0,0108
Количество плавов	26	39	39	10	Количество плавов	29	51	18

При увеличении длительности выпуска стали τ_v содержание азота в стали растет, особенно сильно концентрация азота в стали повышается во время продувки стали азотом в ковше $\tau_{п}$, и время наполнения тела слитка $\tau_{сл}$ также определяет конечную концентрацию азота в стали (таблица 6).

Таблица 6 – Влияние длительности выпуска, продувки и наполнения тела слитка на содержание азота

τ_v , мин	<4	4 – 5	6 – 10	$\tau_{п}$, мин	4 – 10	11 – 15	21 – 27	<95	96 – 100	101 – 155
[N], %	0,0095	0,0102	0,0106	[N], %	0,0098	0,0105	0,0126	0,0099	0,0104	0,0108
Кол-во плавов	4	81	13	Кол-во плавов	57	23	7	59	16	23

Влияние основности шлака CaO/SiO на содержание азота в ковшевом шлаке показано в таблице 7.

Таблица 7 – Влияние основности шлака на содержание азота

CaO/SiO_2	1,99 – 2,2	2,21 – 2,5	2,51 – 4,04	(FeO), %	0,47 – 1,30	1,31 – 2,2	2,21 – 5,92
[N], %	0,0120	0,0102	0,0097	[N], %	0,0102	0,0101	0,0098
Количество плавов	16	25	57	Количество плавов	20	47	31

Исходя из статистической обработки технологических параметров выплавки и внепечной обработки, а также из химического состава металла предложены мероприятия, позволяющие стабилизировать содержание азота в рельсовой стали марки НЭ76В [4, 7].

Использование ванадийсодержащих конвертерных шлаков для прямого легирования.

При выплавке рельсовой стали I группы качества для железных дорог необходимо введение в сталь 0,03 – 0,07 % ванадия, для чего обычно используются ванадийсодержащие легатуры либо ферросплавы.

Микролегирование ванадием в указанных пределах существенно повышает уровень механических и служебных свойств стали. Однако при данной схеме легирования необходимо использование дорогостоящих и дефицитных ванадийсодержащих сплавов. Известна также схема легирования стали, которая предусматривает применение для легирования металла материалов на основе оксидного сырья – технология прямого легирования стали ванадием.

При выплавке стали в дуговых электросталеплавильных печах остаточное содержание азота в электростали в два – три раза выше, чем в мартеновском металле, что позволяет исключить использование дорогостоящих азотированных ферросплавов. Кроме того, в условиях электроплавки появляется возможность заметно снизить стоимость операции легирования стали ванадием за счет использования для этой цели ванадийсодержащих конвертерных шлаков (ВКШ). Наряду с этим повышению качества рельсов из стали, выплавляемой в дуговых электросталеплавильных печах, способствуют резкое снижение содержания серы и раз-

ливка металла на МНЛЗ. В связи с изложенным опробовали технологию прямого легирования рельсовой стали ванадием с использованием ВКШ и оценили ее эффективность.

Прямое легирование рельсовой стали ванадием осуществляли путем введения ВКШ в печь с переводом окислительного шлака в восстановительный. Химический состав ВКШ производства ЗСМК обычно колеблется в следующих пределах: 15 – 24 % V_2O_5 , 15 – 18 % SiO_2 , 1,2 – 3,6 % CaO , 7 – 12 % MnO , 7 – 10 % TiO_2 , 2 – 5 % Cr_2O_3 , 1,5 – 5,0 % MgO , 1 – 3 % Al_2O_3 , 0,01-0,05% P_2O_5 , 1 – 3 % дисперсного железа, 25 – 35 % $Fe_{общ}$. В ВКШ содержится 8 – 14 % металловключений. При разработке технологии использовали партию ВКШ, которая содержала 15,9 % V_2O_5 , 18,9 % SiO_2 , 7,98 % MnO , 8,6 % TiO_2 и остальные компоненты в указанных выше пределах. Исходя из содержания пятиокси ванадия в ВКШ и предполагаемой степени восстановления ванадия для обеспечения содержания ванадия в стали 0,04 % и выше вместо феррованадия, присаживаемого в ковш на выпуске, в печь после скачивания окислительного шлака вводили ВКШ в смеси с известью и плавиковым шпатом. После присадки ВКШ шлак раскисляли порошком кокса, дробленого ферросилиция и гранулированного алюминия.

Химический состав рельсовой стали опытных плавов приведен в таблице 8, он соответствует требованиям I группы ГОСТ 24182-80, однако при отработке технологии на отдельных плавках не выполнены требования ТУ 14-1-5233-93 для рельсов низкотемпературной надежности по содержанию азота и ванадия. Содержание ванадия в стали находилось в пределах 0,04 – 0,06 %. Степень извлечения ванадия из ВКШ составляет 78,7 – 96,8 %, т. е. достаточно высока.

Таблица 8 – Химический состав рельсовой стали опытных марок, %

Номер плавки	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Cu	Al	V	N	V/N
1	0,76	0,88	0,30	0,017	0,006	0,08	0,05	0,06	0,006	0,06	0,007	8,57
2	0,75	0,90	0,31	0,025	0,007	0,12	0,08	0,12	0,004	0,06	0,009	6,67
3	0,74	0,89	0,27	0,018	0,008	0,11	0,08	0,18	0,005	0,04	0,011	3,64
4	0,77	0,89	0,35	0,022	0,017	0,11	0,07	0,12	0,007	0,06	0,006	11,67
5	0,74	0,91	0,33	0,022	0,007	0,12	0,10	0,16	0,007	0,05	0,008	6,25
6	0,73	1,05	0,33	0,025	0,006	0,10	0,06	0,12	0,006	0,05	0,005	10,0
7	0,75	0,72	0,27	0,020	0,006	0,14	0,06	0,09	0,004	0,06		
8	0,74	0,89	0,34	0,028	0,005	0,08	0,06	0,08	0,007	0,05	0,009	5,56
Требования ГОСТ Р 51685-2013 и ТУ 14-1-5233-93												
	0,71 – 0,82	0,75 – 1,05	0,25 – 0,45	(P+S) < 0,45		Не регламентируются				0,05 – 0,08	0,008 – 0,02	2,12 – 7,15

Механические свойства и твердость опытных рельсов, приведенные в таблице 9, а также другие аттестационные характеристики рельсов (испытания на ударную прочность под копром, остаточные напряжения и др.) полностью отвечают требованиям ГОСТ Р 51685-2013. В основном выплавленные рельсы отвечают требованиям ТУ 14-1-5233-93, предъявляемым к рельсам низкотемпературной надежности по ударной вязкости при –60 °С.

Макроструктуру стали изучали после глубокого травления в 50 %-ном водном горячем растворе соляной кислоты на поперечных рельсовых темплетах. Темплеты оцениваются первым сортом (ликвация в шейке не превышает первого балла шкалы). В макроструктуре рельсового темплета имеются темнотравящиеся с участками промежуточных структур слои, распространяющиеся по всем элементам профиля: в средней части головки темплета его глубина составляет 0,5 мм, по выкружке головки темплета – 2,0 мм, в шейке – 1,0 мм, в перьях подошвы – до 5,0 мм.

Таблица 9 – Механические свойства рельсов опытных партий

Растяжение				Ударная вязкость КСЧ, МДж/м ²			Твердость					
σ_t^* , МПа	σ_B^* , МПа	δ , %	Ψ , %	+20°C вдоль	-60°C вдоль	+20°C попер.	HB ₈	HB ₁₆	HB _ш	HB _{под}	HB _{под}	HB _{пкг}
940 862	1264 1234	13 4	33 8	0,44 0,44	0,29 0,23	0,49 0,37	375	363	388	363	363	379
989 1000	1274 1264	13 10	30 16	0,34 0,40	0,20 0,16	0,39 0,35	388	375	388	375	363	388
1019 1019	1313 1254	11 6	30 7	0,43 0,49	0,18 0,16	0,60 0,48	375	363	388	363	352	363
970 921	1303 1264	12 5	30 10	0,37 0,47	0,27 0,25	0,31 0,30	363	352	357	352	341	363
911 970	1234 1215	10 7	30 10	0,39 0,42	0,25 0,35	0,57 0,52	363	352	357	363	363	363
931 872	1274 1176	13 10	34 18	0,42 0,41	0,20 0,18	0,65 0,66	363	341	375	363	352	375
970 911	1313 1274	12 6	42 11	0,38 0,42	0,15 0,19	0,42 0,47	352	341	375	375	375	363
970 921	1264 1244	12 7	31 11	0,37 0,43	0,15 0,10	0,46 0,50	364	341	375	352	352	363

Оценку загрязненности металла неметаллическими включениями проводили на продольных шлифах, изготовленных на образцах, вырезанных в соответствии с требованиями ГОСТ Р 51685-2013. При просмотре на микроскопе «Неофот-21» при 100-кратном увеличении микрошлифов не выявлено глинозема, глинозема, сцементированного силикатами, а также нитридов и карбидов титана, вытянутых вдоль направления прокатки в виде дорожек-строчек, что соответствует требованиям ГОСТ Р 51685-2013 для рельсов I группы. Оценку загрязненности другими видами включений проводили по шкале ГОСТ 1778-70. Средние значения по десяти опытным плавкам следующие (балл): сульфиды – 3,16; силикаты пластичные, хрупкие и недеформируемые – 5,0, причем средняя длина по включениям для силикатов пластичных составляет 3,59 мм, по силикатам хрупким – 2,16 мм. Выплавленная сталь по загрязненности неметаллическими включениями находится на уровне рельсовой стали, выплавленной в мартеновских печах с использованием для легирования ванадийсодержащих ферросплавов, а по сульфидным включениям – значительно чище мартеновской.

Качественный анализ включений проводили на растровом электронном микроскопе-микроанализаторе РЭММА-202.

В исследуемом металле в составе неметаллических включений выявлено повышенное содержание титана, который присутствует в пластичных и недеформируемых силикатах, а также в виде обособленно расположенных нитридов и оксидов титана (рисунок).

Выход рельсов I сорта в длине 25 м находился в пределах 77,0 – 90,5 %.

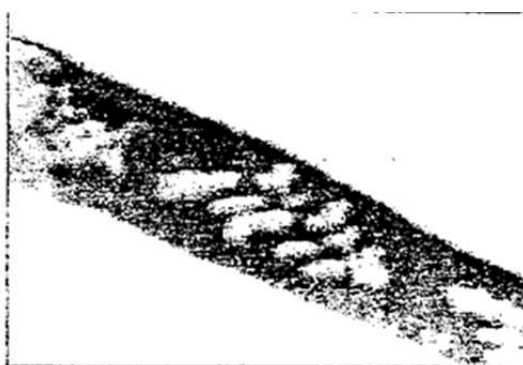
Таким образом, результаты опытных плавок показали высокую эффективность использования ВКШ для прямого легирования рельсовой стали ванадием в дуговых электросталеплавильных печах, при этом степень восстановления ванадия составила 78,7 – 96,8 %. Стоимость ванадия в шлаке заметно меньше, чем в ванадиевых сплавах (3,5 – 4,0 против 16 – 17 долларов США). Поэтому разработанный способ легирования стали ванадием снижает себестоимость стали, обеспечивая при этом качество, предъявляемое к рельсам низкотемпературной надежности. Полученные результаты позволили квалифицировать разработанную и опробованную технологию как перспективную. Технология защищена патентом РФ.

Для проведения промышленных испытаний на ВСЖД были изготовлена партия рельсов. Выплавка осуществлялась в 110-тонной дуговой электропечи. При выплавке стали был использован жидкий чугун в количестве 30 – 40 т. Кроме чугуна в печь на шлак задавали дробленый ферросилиций, алюминий и коксик по 100 кг каждого. Раскисление металла в печи проводили ферросиликомарганцем в количестве 1,2 – 1,4 т и кусковым алюминием в количе-

стве 45 кг. Для наведения жидкоподвижного шлака в печь присаживали плавиковый шпат до 300 кг. Для ковшевого раскисления и легирования применяли FeSiCa (500 кг), CaF₂ (400 кг) и FeV(120 кг).



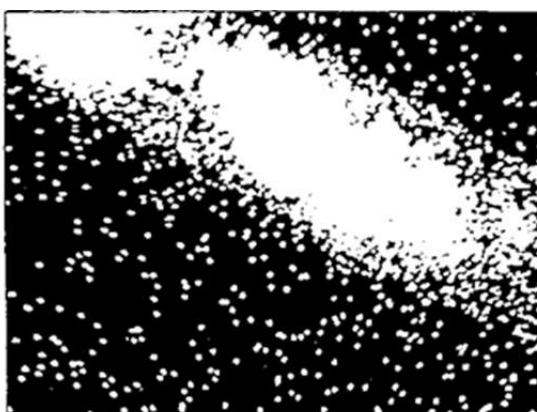
в е ×500



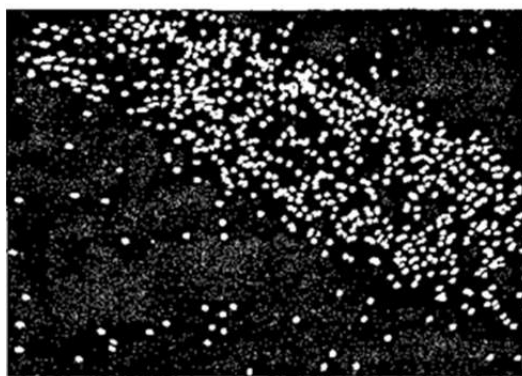
в е ×1350



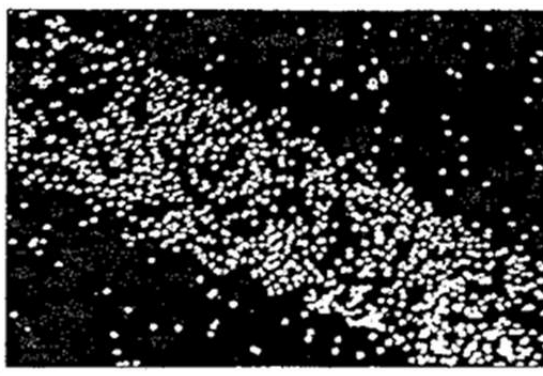
в Mn ×1350



в Ti ×1350



в Si × 1350



в Ca × 1350

Изображения во вторичных электронах и в излучениях марганца, титана, кремния и кальция неметаллических включений в рельсовом металле опытных плавок

Массовая доля элементов, регламентируемых ТУ 14-1-5233-93, представлена в таблице 8. Отличительной особенностью электростали является низкое содержание серы в металле.

Разливка, нагрев и прокатка 25-метровых рельсов типа Р-65 осуществлялась в соответствии с требованиями ГОСТ 24182-80 и действующей на комбинате технологической инструкции по производству рельсов.

После прокатки рельсы были подвергнуты отделке и термической обработке по существующей технологии.

Контроль качества термообработанных рельсов проводили в соответствии с требованиями ГОСТ 18267-82. Механические свойства при растяжении, а также ударную вязкость при +20 °С на стандартных образцах, вырезанных вдоль и поперек прокатки, определение запаса

вязкости металла при отрицательных температурах вели на ударных образцах, вырезанных в продольном направлении, охлажденных до -60°C . Твердость определяли на прессе Бринелля в поперечном сечении и на поверхности катания головок рельсовых темплетов.

Результаты испытаний механических свойств приведены в таблице 9.

Загрязненность металла неметаллическими включениями определяли на шести стандартных образцах, отобранных от головных и донных рельсов каждой выплавленной плавки. Микроконтроль осуществляли по ГОСТ Р 51685-2013 и ТУ-14-1-5233-93. Недопустимых по ТУ строчек глинозема, а также карбидов и нитридов титана в металле отгруженных плавок не обнаружено.

Все рельсы, прокатанные из электростали, замаркированы шифром НЭ.

Две плавки непрерывной литой заготовки (шифр К 15) выплавлены в электросталеплавильном цехе по следующей технологии: в печь задавали кусковой алюминий в количестве 45 кг, силикомарганец (770 – 820 кг) и 65 %-ный кусковой ферросилиций (80 – 140 кг), шлак в печи раскисляли коксиком, дробленным 65 %-ным ферросилицием и порошковым алюминием, которые вводили по 100 кг каждого. В ковш задавали феррованадий (110 – 145 кг), силикокальций (500 кг) и кокс в количестве 30 кг. Химический состав металла рельсовых плавок А345 и Б407 приведен в таблице 10.

Таблица 10 – Химический состав рельсовой стали (для МНЛЗ)

Шифр плавки	Массовая доля элементов, %									
	C	Mn	Si	P	S	V	Al	Cr	Ni	Cu
А 345	0,74	0,82	0,30	0,020	0,006	0,06	0,008	0,07	0,05	0,12
Б 407	0,76	0,96	0,30	0,019	0,05	0,05	0,008	0,04	0,04	0,06

Из представленных данных результатов химического анализа следует, что по химическому составу металл рельсовых плавок соответствует требованиям ТУ 14-1-5233-93.

Нагрев, прокатку и отделку рельсов производили по действующей на комбинате технологической инструкции.

После прокатки рельсов от головных, средних и донных рельсов были отобраны пробы для контроля металла на микрозагрязненность неметаллическими включениями.

Недопустимых по требованиям ГОСТ Р 51685-2013 строчек неметаллических включений, т. е. глинозема, глинозема, цементированного силикатами, а также карбидов и нитридов титана, не обнаружено.

Промышленные испытания партии рельсов на участке Иркутск – Слюдянка, характеризующегося наличием кривых малого радиуса (≤ 300 м) и низкой износостойкостью рельсов из стали М76, показали преимущество опытных рельсов. Величина бокового износа рельсов составила 14,8 – 14,2 мм (М76 – 16,87 мм), удельный износ – 0,169 – 0,126 (М76 – 0,276), пропущенный тоннаж – 83,336 – 116,885 млн ткм (М76 – 61,02 млн ткм).

На основании результатов исследования установлено положительное влияние легирования на комплекс служебных свойств рельсовых сталей.

Технологии изготовления рельсовых сталей с использованием электропечной выплавки, внепечной обработки стали, разлива на МНЛЗ, прокатки и термообработки рельсов обеспечивает возможность выпуска рельсов с высокой износостойкостью и пластическими свойствами, необходимыми для эксплуатации в условиях Крайнего Севера.

В процессе отработки технологии установлена возможность использования для легирования стали ванадийсодержащих конвертерных шлаков взамен дорогостоящих ферросплавов.

Практическое использование предлагаемых технологий обеспечит повышение надежности, безопасности эксплуатации пути и увеличение срока его службы.

Список литературы

1. Безопасность России. Безопасность железнодорожного транспорта в условиях Сибири и Севера [Текст] / В. А. Акимов, В. А. Алексеенко и др. М.: Знание, 2014. – 856 с.
2. Железнодорожные рельсы для Сибири [Текст] / В. П. Деменьтьев, Л. В. Корнева и др. / Иркутский гос. ун-т путей сообщения. – Иркутск, 2010. – 320 с.

3. Черняк, С. С. Железнодорожный путь Восточной Сибири [Текст] / С. С. Черняк / Иркутский гос. ун-т путей сообщения. – Иркутск, 2003. – 424 с.

4. Козырев, Н. А. Производство железнодорожных рельсов из электростали [Текст] / Н. А. Козырев, В. П. Дементьев / Новокузнецкий ин-т повышения квалификации. – Новокузнецк, 2000. – 123 с.

5. Пат. 2224041 Российская Федерация, МПК⁷ С 22 С 38/12. Рельсовая сталь [Текст] / Ворожищев В. И., Черняк С. С. и др.; заявитель и патентообладатель Иркутский гос. ун-т путей сообщения. – № 2002102425; заявл. 25.01.02, опубл. 20.02.04. Бюл. № 5. – 6 с.

6. Пат. 2224042 Российская Федерация, МПК⁷ С 22 С 38/24. Сталь [Текст] / Черняк С. С., Дементьев В. П. и др.; заявитель и патентообладатель Иркутский гос. ун-т путей сообщения. – № 2002102427; заявл. 25.01.02, опубл. 20.02.04. Бюл. № 5. – 7 с.

7. Пат. 2256000 Российская Федерация, МПК⁷ С 22 С 38/58. Рельсовая сталь [Текст] / Черняк С. С., Дементьев В. П. и др.; заявитель и патентообладатель Иркутский гос. ун-т путей сообщения. – № 2004101696/02; заявл. 20.01.04, опубл. 10.07.05. Бюл. № 19. – 8 с.

References

1. Akimov V. A., Alekseenko V. A., Khomenko A. P., Chernyak S. S. *Bezopasnost' Rossii. Bezopasnost' zheleznodorozhnogo transporta v usloviakh Sibiri i Severa* (Safety of Russia. Safety of railway transportation in the conditions of Siberia and North). Moscow: MGF Knowledge, 2014, 856 p.

2. Dementev V. P., Kornev L. V., Khomenko A. P., Chernyak S. S. *Zheleznodorozhnye rel'sy dlia Sibiri* (Railway rails for Siberia). Irkutsk: ISTU, 2010, 320 p.

3. Chernyak S. S. *Zheleznodorozhnyi put' Vostochnoy-Sibiri* (Track the East Siberian). Irkutsk: ISTU, 2003, 424 p.

4. Kozyrev N. A., Dementiev V. P. *Proizvodstvo zheleznodorozhnykh rel'sov iz elektrostali* (Production of electric steel rails). Novokuznetsk: IEC, 2000, 123 p.

5. Vorozhischev V. I., Chernyak S. S., Deviatkin Y. D., Shur E. A., Kozyrev N. A., Dementiev V. P. *Patent RU 2224041 C 22 C 38/12*, 20.02.04.

6. Chernyak S. S., Dementiev V. P., Kozyrev N. A., Voyloshnikov V. D., Vorozhischev V. I., Tuzhilin L. V. *Patent RU 2224042 C 22 C 38/24*, 20.02.04.

7. Chernyak S. S., Dementiev V. P., Kozyrev N. A., Voyloshnikov V. D., Vorozhischev V. I., Alekseev N. T., Khomenko A. P., Tuzilina L. V. *Patent RU 2224042 C 22 C 38/58*, 07.10.05.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Хоменко Андрей Павлович

Иркутский государственный университет путей сообщения (ИрГУПС).

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

Доктор технических наук, профессор, ректор ИрГУПС.

Тел.: +7 (3952) 63-83-11.

E-mail: homenko@irgups.ru

Черняк Саул Самуилович

Иркутский государственный университет путей сообщения (ИрГУПС).

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

Доктор технических наук, профессор кафедры «Автоматизация производственных процессов», ИрГУПС.

Тел.: +7 (3952) 63-83-99.

Бройдо Владимир Львович

ОАО ПО «Иркутский завод тяжелого машиностроения».

Октябрьской революции ул., д. 1, г. Иркутск, 664007, Российская Федерация.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Khomenko Andrey Pavlovich

Irkutsk State Transport University (ISTU).

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

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

Phone: +7 (3952) 63-83-11.

E-mail: homenko@irgups.ru

Chernyak Saul Samuilovich

Irkutsk State Transport University (ISTU).

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

Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department «Automation of production processes», ISTU.

Phone: +7 (3952) 63-83-99.

Broido Vladimir Lvovich

JSC PO «Irkutsk Heavy Machinery Plant».

1, Oktybr'skoy revolyutsii st., Irkutsk, 664007, the Russian Federation.

Кандидат технических наук, главный сварщик
ОАО ПО «Иркутский завод тяжелого машиностроения».

E-mail: broidolv@gmail.com

Cand. Tech. Sci., Chief Welding of JSC PO «Irkutsk Heavy Machinery Plant».
Phone: +7 (3952) 63-83-99.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Хоменко, А. П. Разработка технологии электропечной выплавки легированной ванадием рельсовой стали и качество рельсов [Текст] / А. П. Хоменко, С. С. Черняк, В. Л. Бройдо // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2016. – № 3 (27). – С. 66 – 76.

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Khomenko A. P., Chernyak S. S., Broido V. L. Development electrooven alloy smelting technology vanadium steel rail. Journal of Transsib Railway Studies, 2016, vol. 27, no. 3, pp. 66 – 76. (In Russian).

УДК 620.192.63

П. К. Шкодун, И. В. Шестаков, А. И. Стретенцев

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

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ВОЛНОВОГО ОТКЛИКА ДЛЯ ВЫЯВЛЕНИЯ ПОВРЕЖДЕНИЙ МЕЖВИТКОВОЙ ИЗОЛЯЦИИ ЯКОРНЫХ ОБМОТОК ВСПОМОГАТЕЛЬНЫХ МАШИН ТЯГОВОГО ПОДВИЖНОГО СОСТАВА ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ

Аннотация. Целью данной статьи является представление результатов работы по автоматизации процесса тестирования якорных обмоток электрических машин по методу волновых откликов и определение применимости метода для диагностирования вспомогательных машин тягового подвижного состава. В статье описаны технические решения, примененные при разработке мобильного блока для тестирования изоляции по методу волновых откликов, приведен алгоритм тестирования в автоматическом режиме. Описана методика расчета обобщенного диагностического коэффициента. Приведены результаты тестирования вспомогательных машин типов НБ436В и НБ-431П, установленных на электровозе ВЛ-10, сделан вывод о перспективности предложенной методики. Определены задачи дальнейших исследований, направленных на внедрение метода волновых откликов на производстве.

Ключевые слова. Вспомогательная машина, межвитковая изоляция, метод волновых откликов, тяговый подвижной состав, техническое диагностирование

Pavel K. Shkodun, Ignat V. Shestakov, Andrej I. Stretensev

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

APPLICATION OF WAVE RESPONSE METHOD FOR FAULT FINDING IN INSULATION SYSTEM OF AUXILIARY MACHINES ARMATURE COILS

Abstract. The aim of this article is results representing of work focused to automation of electrical machines armature coils diagnostics process based on wave response method. Technical decisions used in development of mobile device for insulation diagnostics via wave response method described. Techniques of generalized diagnostics coefficient calculation described. Article presents test results of NB436V and NB-431P auxiliary machines installed VL-10 electric locomotive.

Keywords. Auxiliary machine, interturn insulation, method of wave response, traction rolling stock, technical diagnostics

Техническая надежность сложных электротехнических изделий, в том числе и электродвигателей, определяется в большей степени уровнем надежности, заложенным при проектировании и производстве, внешними условиями эксплуатации и особенностями режимов

работы. В настоящее время парк тягового подвижного состава железных дорог, хотя и претерпевает обновление, все еще имеет в своем составе большое количество устаревшей техники, проектный ресурс которой уже исчерпан. Следует отметить также тяжелые условия эксплуатации тягового подвижного состава, вызванные различными факторами, например, перегрузками на затяжных подъемах, условиями внешней среды (сезонные колебания температуры, осадки) и т. п. Согласно статистике до 14 % отказов электровозов приходится на отказы вспомогательных машин [1]. В свою очередь большую долю отказов вспомогательных машин тягового подвижного состава занимают электрические пробой изоляции и межвитковые замыкания обмоток [2]. Возникающие повреждения изоляции приводят к частичной, а иногда и к полной деградации изоляционных материалов, перегревам, снижению КПД и полному выходу из строя поврежденной машины. Выявление скрытых дефектов межвитковой изоляции электродвигателей тягового подвижного состава является актуальной задачей, направленной на снижение расходов, вызванных последствиями устранения данных повреждений за счет своевременного выполнения ремонтных и профилактических мероприятий.

Одним из наиболее перспективных методов выявления повреждений межвитковой изоляции электродвигателей постоянного тока является метод волнового отклика [3]. Суть метода заключается в фиксации волнового затухающего процесса (волнового отклика), возникающего в обмотке под действием диагностических импульсов в различных угловых положениях якоря. Диагностические импульсы, воздействуя на обмотку, вызывают возникновение внутри нее стоячей волны, половина периода пространственных колебаний которой распределяется по длине каждой параллельной ветви обмотки (эквивалентной линии с распределенными параметрами). Возникновение повреждений вызывает резкое изменение параметров эквивалентной линии в точке повреждения и отражение падающей волны диагностических импульсов, что в конечном итоге приводит к возникновению двух стоячих волн в поврежденной параллельной ветви обмотки и искажение результирующего волнового отклика. В процессе изменения углового положения якоря координата повреждения смещается относительно точек подачи диагностических импульсов (щеток), вызывая существенные изменения формы волнового отклика (рисунок 1). Данные теоретические предположения подтверждены экспериментальными исследованиями [4].

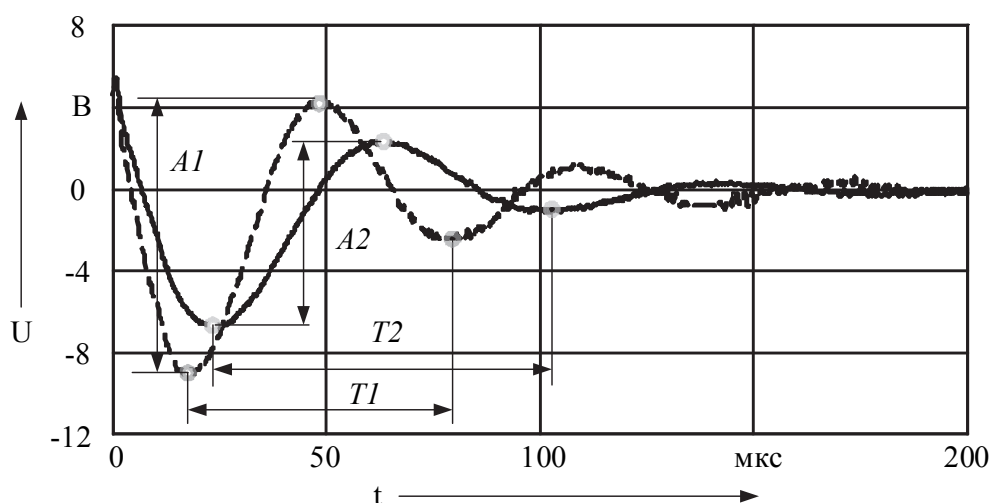


Рисунок 1 – Результаты испытаний якорной обмотки электродвигателя НБ-431П

Изменение формы волнового отклика при изменении углового положения якоря свидетельствует о наличии в обмотке межвиткового замыкания.

Для проведения испытаний авторами разработан мобильный блок для диагностирования состояния межвитковой изоляции коллекторных электрических машин (далее – блок). Блок построен на базе платы *STM32F746G-DISCO* и специально разработанного аналогового мо-

дуля в стандартном форм-факторе *Arduino-Shield*. Структурная схема блока приведена на рисунке 2.

Блок осуществляет подачу в обмотку диагностических импульсов, отображение осциллограммы сигнала, фиксацию и анализ волновых откликов, сохранение результатов на *MicroSD*-карту и передачу результатов испытаний на ПК через интерфейс *USB*, контроль напряжения батареи питания. Схемы гальванической изоляции и силового ключа аналогичны применяемым в блоке предыдущего поколения [5, 6]. Измерительный тракт включает в себя отключаемый делитель напряжения и дифференциальный усилитель *Texas Instruments INA159* [7].

Блок является автономным, он имеет встроенную литий-ионную батарею с контроллером заряда / разряда. Для проведения диагностирования состояния изоляции при помощи данного блока не требуется никакого дополнительного оборудования (внешних осциллографов, блоков питания и т. п.).

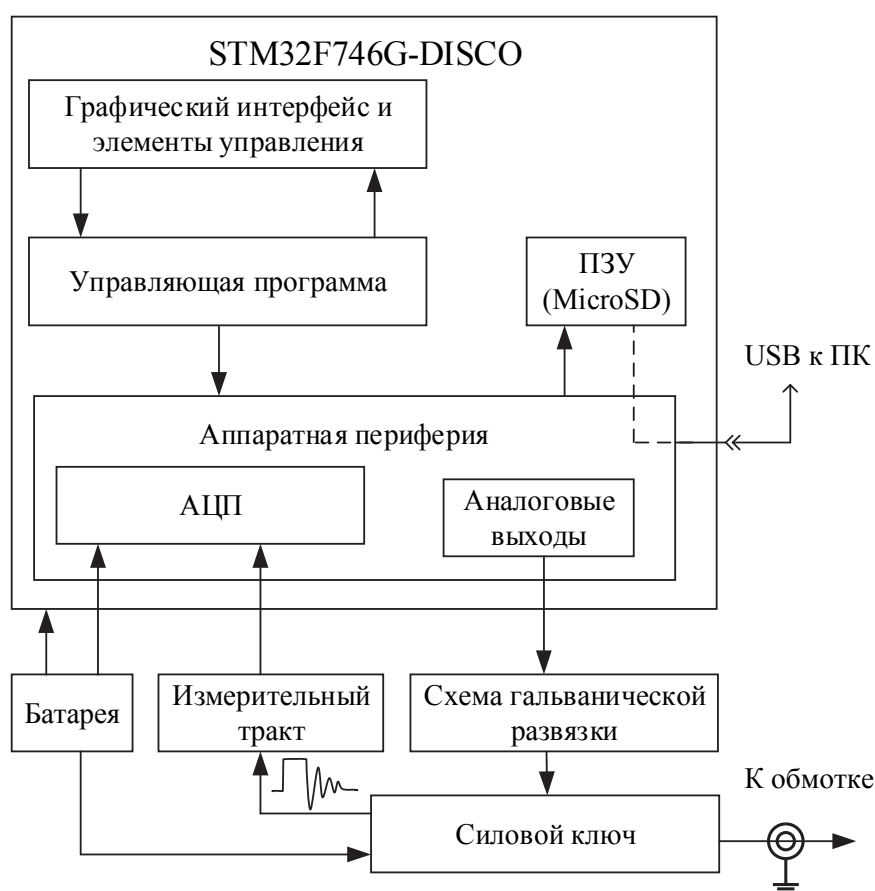


Рисунок 2 – Структурная схема мобильного блока

Для выявления повреждений межвитковой изоляции авторами предлагается использовать обобщенный диагностический коэффициент, вычисляемый на основании параметров двух реализаций волнового отклика, полученных в процессе тестирования в различных угловых положениях якоря. На рисунке 1 приведены две реализации волнового отклика, снятые в результате тестирования якорной обмотки электродвигателя НБ-431П с искусственно введенным межвитковым замыканием.

Для каждого волнового отклика определяются период колебаний T и «полная амплитуда» A первой волны. Следует отметить, что для вычисления обобщенного диагностического коэффициента анализу подвергаются две реализации волнового отклика, имеющие минимальное и максимальное отношение «полной амплитуды» к периоду, т. е. две реализации от-

клика, имеющие наибольшую степень расхождения параметров (далее – базовые реализации волнового отклика).

Обобщенный диагностический коэффициент вычисляется по формуле:

$$K = 1 - \frac{A2}{T2} / \frac{A1}{T1}, \quad (1)$$

где $A1$, $T1$ – «полная амплитуда» и период первой базовой реализации волнового отклика;

$A2$, $T2$ – «полная амплитуда» и период второй базовой реализации волнового отклика.

Коэффициент K равен нулю при отсутствии изменения формы волнового отклика в процессе изменения углового положения обмотки, что свидетельствует об отсутствии повреждений изоляции. Увеличение значения коэффициента K указывает на снижение качества изоляции ввиду деградации изоляционных материалов, межвиткового замыкания, замыкания на корпус.

Следует отметить, что метод чувствителен только к локальным повреждениям изоляции, нарушающим симметрию параллельных ветвей тестируемой обмотки.

Алгоритм процесса тестирования изоляции, реализуемого блоком, приведен на рисунке 3, где ДИ – диагностические импульсы; ВО – волновой отклик.

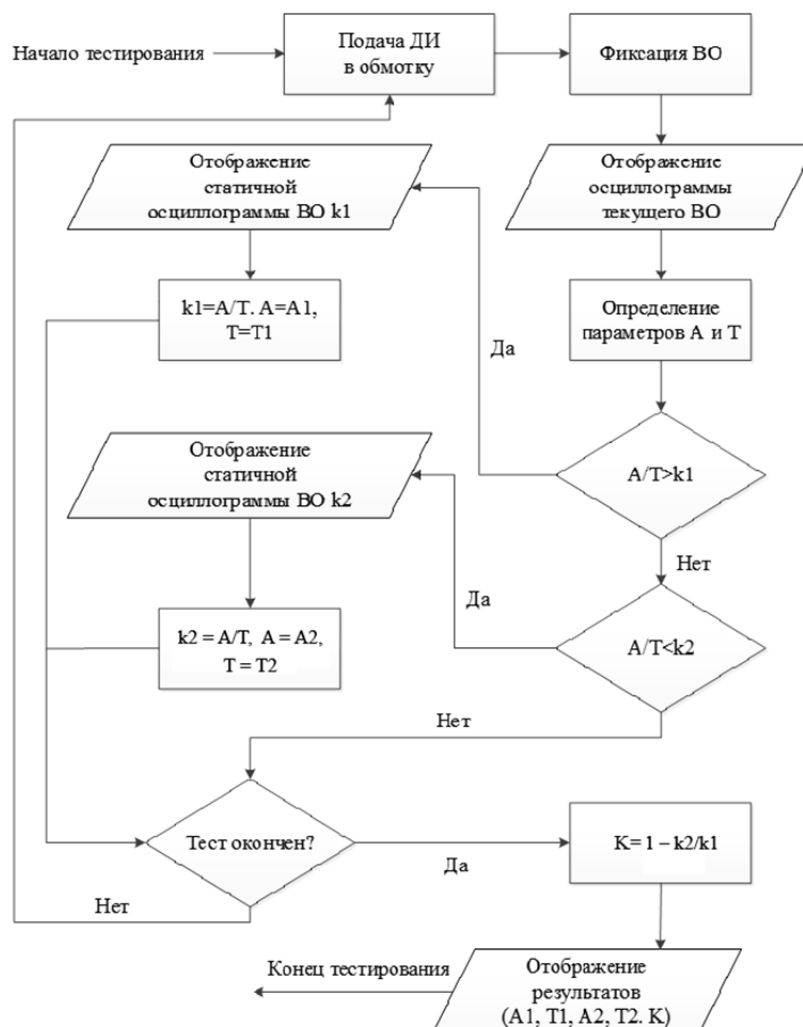


Рисунок 3 – Упрощенный алгоритм процесса тестирования

Управление блоком осуществляется посредством графического интерфейса, непосредственным нажатием на чувствительный к прикосновениям *LCD* дисплей. Снимок основного экрана графического интерфейса пользователя приведен на рисунке 4.

В рамках исследования применимости метода волнового отклика для диагностирования межвитковой изоляции якорных обмоток вспомогательных машин подвижного состава проведена серия испытаний на электродвигателе системы вентиляции типа НБ-431П (см. рисунок 2) и генераторе НБ436В, установленных на электровазе ВЛ-10. При испытаниях были искусственно смоделированы межвитковые замыкания путем соединения двух соседних коллекторных пластин.

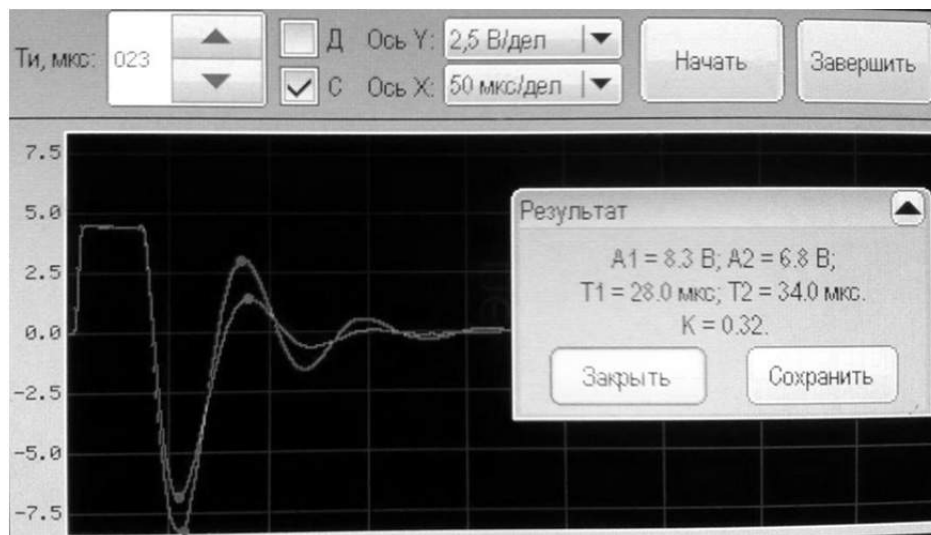


Рисунок 4 – Графический интерфейс пользователя

Базовые реализации волнового отклика, полученные на генераторе НБ436В, приведены на рисунке 5.

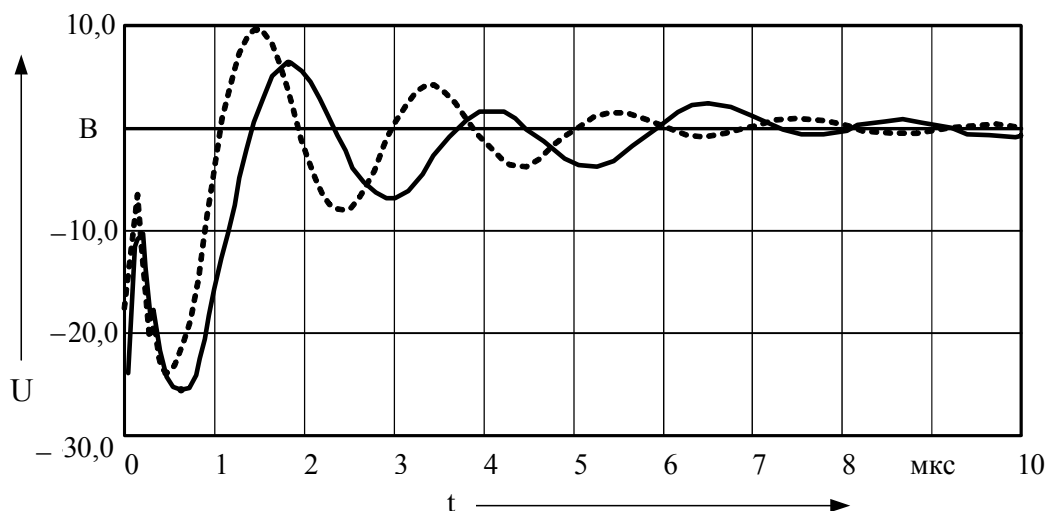


Рисунок 5 – Результаты испытаний якорной обмотки генератора НБ436В

Искажения формы волнового отклика (см. рисунок 5), вызваны особенностями работы силового ключа и конструктивными особенностями обмотки. Сопротивление якорной цепи генератора НБ436В составляет около 0,00331 Ом, в то время как у электродвигателя НБ-431П 22 Ом [8], таким образом, силовой транзистор ключа работает в нестандартном режиме, что приводит к искажению формы волнового отклика в момент после размыкания ключа. Указанная техническая проблема решена установкой токоограничивающего переменного резистора в цепь подачи диагностических импульсов.

Отметим также, что длительность базовых реализаций волнового отклика, полученных на якорной обмотке генератора, гораздо меньше, а «полная амплитуда» – больше. Если пред-

ставить волновую обмотку якоря генератора в виде эквивалентной линии с распределенными параметрами, то такая линия будет иметь гораздо меньшую длину в сравнении с петлевой обмоткой электродвигателя, соответственно и возникающие в такой линии колебания будут иметь большую «полную амплитуду» за счет протекания значительного тока, но будут затухать гораздо быстрее.

В таблице представлены результаты анализа формы базовых реализаций волнового отклика, приведенных на рисунках 1 и 5.

Результаты анализа реализаций базовых реализаций волнового отклика вспомогательных машин электровоза ВЛ-10

Машина	Параметр				
	$A1, В$	$T1, мкс$	$A2, В$	$T2, мкс$	K
Электродвигатель НБ-431П	13,2	61,6	8,02	79,2	0,468
Генератор НБ436В	33,5	1,98	31,7	2,38	0,212

Обобщенный диагностический коэффициент K вычисляется в относительных единицах и при тестировании якорных обмоток различной конструкции всегда имеет значения одного порядка (как правило, десятых долей единицы), что удобно при интерпретировании результатов тестирования, в том числе и при проведении тестирования в автоматическом режиме.

Результаты экспериментальных исследований, приведенные в данной статье, позволяют говорить о возможности тестирования изоляции якорных обмоток вспомогательных машин тягового подвижного состава методом волнового отклика. Разработанный коллективом авторов аппаратно-программный комплекс позволяет производить испытания в условиях эксплуатации.

В настоящее время остается актуальной задача накопления статистических данных по итогам эксплуатационных испытаний и определения интервалов возможных значений обобщенного диагностического коэффициента, соответствующих наличию или отсутствию повреждений межвитковой изоляции и степени их выраженности. Отметим, что на практике встречаются случаи межвиткового замыкания витков якорных обмоток под действием центробежных сил, замыкания, вызванные нагревом изоляции в рабочем режиме, и локальные снижения сопротивления изоляции без образования устойчивого контакта «металл – металл». Указанные повреждения могут быть выявлены лишь в рабочем режиме, а значит, для их диагностирования методом волнового отклика требуются дополнительные исследования, усложнение методики тестирования и разработка аппаратных средств диагностирования.

Список литературы

1. Петров, М. Н. Статистический анализ повреждений узлов и оборудования электровозов на Красноярской дороге [Текст] / М. Н. Петров, А. И. Орленко, О. А. Терегулов // Современные наукоемкие технологии. – 2013. – № 6. – С. 148, 149.
2. Исмаилов, Ш. К. Повышение ресурса изоляции обмоток электрических машин подвижного состава в условиях эксплуатации [Текст]: Автореф. дис... докт. техн. наук. – Омск, 2004. – 43 с.
3. Харламов, В. В. Оценка технического состояния изоляции тяговых электродвигателей подвижного состава [Текст] / В. В. Харламов, П. К. Шкодун, И. В. Шестаков // Эксплуатационная надежность локомотивного парка и повышение эффективности тяги поездов: Материалы всерос. техн. конф. с междунар. участием / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2014. – С. 211 – 222.
4. Харламов, В. В. Особенности применения метода волновых откликов при тестировании межвитковой изоляции якорных обмоток тяговых электродвигателей [Текст] / В. В. Харламов, П. К. Шкодун, И. В. Шестаков // Инновационные проекты и технологии в образовании, промышленности и на транспорте: Материалы науч. конф. / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2016. – С. 167 – 173.

5. Харламов, В. В. Испытательный стенд для тестирования межвитковой изоляции якорной обмотки тяговых электродвигателей подвижного состава [Текст] / В. В. Харламов, П. К. Шкодун, И. В. Шестаков // Технологическое обеспечение ремонта и повышение динамических качеств железнодорожного подвижного состава: Материалы всерос. науч.-техн. конф. с междунар. участием / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2015. – Ч. 1. – С. 90 – 95.

6. Шестаков, И. В. Разработка мобильного устройства для диагностирования состояния межвитковой изоляции якорных обмоток коллекторных электрических машин [Текст] / И. В. Шестаков // Сборник XL регион. студенческой науч.-практ. конф. «Молодежь третьего тысячелетия» / Омский гос. ун-т. – Омск, 2016. – С. 118 – 121.

7. Звонарев, Е. Драйверы для АЦП на основе ОУ компании Texas Instruments [Текст] / Е. Звонарев // Компоненты и технологии. – 2007. – № 11. – С. 33 – 38.

8. Электровозы ВЛ10 и ВЛ-10У: Руководство по эксплуатации / Под ред. О. А. Кикнадзе. М.: Транспорт, 1981. – 519 с.

References

1. Petrov M. N., Orlenko A. I., Teregulov O. A. Statistics of electromotives equipment units faults on Krasnoyarskaya railway [Statisticheskij analiz povrezhdenij uzlov i oborudovaniya jel-ektrovozov na Krasnojarskoj doroge]. *Modern high technologies – Sovremennije naukoemkie tehnologii*, 2013, no. 6, pp. 148 – 149.

2. Ismailov Sh. K. *Povyshenie resursa izoljicii obmotok jelektricheskikh mashin podvizhnogo sostava v uslovijah jekspluatacii* (Operation time enhancement of electrical machines coils insulation on traction rolling stock under operation conditions). Doctor's abstract of a thesis, Omskm OSTU. 2004, p. 43.

3. Harlamov V. V., Shkodun P. K., Shestakov I. V. Evaluation of traction motors insulation technical condition on rolling stock [Ocenka tehničeskogo sostojanija izoljicii tjagovyh jel-ektrodvigatелеj podvizhnogo sostava]. *Materialy vtoroy vsrossijskoj tehničeskoj konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem «Ekspluatatsionnaya nadezhnost lokomotivnogo parka i povyshenie effektivnosti tyagi poezdov»* (Proceedings of the conference «The operational reliability of the locomotive fleet and improving the efficiency of train traction»). – Omsk, 2014, pp. 211 – 222.

4. Harlamov V. V., Shkodun P. K., Shestakov I. V. Application features of wave response method using for diagnostics of traction motors armature coil turn-to-turn insulation [Osobennosti primeneniya metoda volnovyh otklikov pri testirovanii mezhvitkovoj izoljicii jakornyh obmotok tjagovyh jelektródvigatelej]. *Materialy nauchnoj konferencii «Innovacionnye proekty i tekhnologii v obrazovanii promyshlennosti i na transporte»* (Proceedings of the conference «Innovation projects and technologies in education, industry and transport»). – Omsk, 2016, pp. 167 – 173.

5. Harlamov V. V., Shkodun P. K., Shestakov I. V. Test-bench for diagnostics of traction motor armature coil turn-to-turn insulation [Ispytatel'nyj stend dlja testirovaniya mezhvitkovoj izoljicii jakornoj obmotki tjagovyh jelektródvigatelej podvizhnogo sostava]. *Materialy tret'ej vsrossijskoj nauchno-tehničeskoj konferencii s mezhdunarodnym uchastiem v trekh chastyah. Chast' 1. «Tekhnologicheskoe obespechenie remonta i povyshenie dinamicheskikh kachestv zheleznodorozhnogo podvizhnogo sostava»* (Proceedings of the conference «Technological maintenance repair and improvement of the dynamic properties of the railway rolling stock»). – Omsk, 2015, pp. 90 – 95.

6. Shestakov I. V. Development of mobile device for commutator machines armature coil turn-to-turn insulation diagnostics [Razrabotka mobil'nogo ustrojstva dlja diagnostirovaniya sostojanija mezhvitkovoj izoljicii jakornyh obmotok kollektornyh jelektricheskikh mashin]. *Sbornik XL regionalnoj studencheskoj nauchno-praktičeskoj konferencii «Mmolodezh tret'ego tysyacheletiya»* (Proceedings of the conference «The youth of the third millennium»). – Omsk, 2016, pp. 118 – 121.

7. Zvonarev E. Drivers for ADC based on operational amplifiers from Texas Instruments [Drajvery dlja ACP na osnove OU kompanii Texas Instruments]. *Komponenty i tekhnologii – Components and Technologies*, 2007, no. 11, pp. 33 – 38.

8. Kiknadze O. A. *Elektrovozy VL10 i VL-10U. Rukovodstvo po ekspluatatsii* (VL-10 and VL-10U electric locomotives. Operational instruction). Moscow: Transport Publ., 1981, 519 p.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Шкодун Павел Константинович

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: emoe@omgups.ru

Шестаков Игнат Валентинович

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

Аспирант кафедры «Электрические машины и общая электротехника», ОмГУПС.

Тел.: +7 (3812) 31-18-27.

E-mail: emoe@omgups.ru

Стретенцев Андрей Игоревич

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

Аспирант кафедры «Электрические машины и общая электротехника», ОмГУПС.

Тел.: +7 (3812) 31-18-27.

E-mail: emoe@omgups.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Шкодун, П. К. Применение метода волнового отклика для выявления повреждений межвитковой изоляции якорных обмоток вспомогательных машин тягового подвижного состава железных дорог [Текст] / П. К. Шкодун, И. В. Шестаков, А. И. Стретенцев // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2016. – № 3 (27). – С. 76 – 83.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Shkodun Pavel Konstantinovich

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Cand. Tech. Sci., Associate Professor of the department «Electrical machines and general electrical engineering», OSTU.

Phone: +7 (3812) 31-18-27.

E-mail: emoe@omgups.ru

Shestakov Ignat Valentinovich

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Post graduate student of the department «Electrical machines and general electrical engineering», OSTU.

Phone: +7 (3812) 31-18-27.

E-mail: emoe@omgups.ru

Stretentsev Andrei Igorevich

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Post graduate student of the department «Electrical machines and general electrical engineering», OSTU.

Phone: +7 (3812) 31-18-27.

E-mail: emoe@omgups.ru

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Shkodun P.K., Shestakov I. V., Stretentsev A. I. Application of wave response method for fault finding in insulation system of auxiliary machines armature coils. Journal of Transsib Railway Studies, 2016, vol. 27, no. 3, pp. 76 – 83. (In Russian).

УДК 621.3.053.21

В. А. Кандаев, К. В. Авдеева, А. А. Медведева, А. В. Уткина

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

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНОГО ЗНАЧЕНИЯ ДОБАВОЧНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ДРЕНАЖНОЙ УСТАНОВКИ ТЯГОВОЙ ПОДСТАНЦИИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Аннотация. Представлен метод расчета добавочного сопротивления дренажной установки тяговой подстанции постоянного тока. Существующий метод настройки дренажной защиты предполагает проведение ряда измерений с подбором добавочного сопротивления и последующей корректировкой его значения с учетом среднегодового тока тяговой подстанции. Целью данной работы является разработка алгоритма определения оптимального значения добавочного сопротивления с учетом обеспечения нормативных значений

защитного потенциала на заземляющем устройстве и минимизации потерь в обратной тяговой сети. Представленный метод основан на применении теоремы взаимности, позволяющей изменить направление тока от источника к нагрузке на обратное при условии, если система является линейной. Составлен алгоритм расчета добавочного сопротивления дренажной установки тяговой подстанции. Проведен расчет значения добавочного сопротивления и потерь мощности в тяговой рельсовой сети для среднего значения тока тяговой подстанции. Приведены графики зависимости добавочного сопротивления и потерь мощности на нем от величины тока тяговой подстанции при минимальном и максимальном значениях защитного потенциала. Данный метод может быть рекомендован при проектировании защиты от коррозии заземляющих устройств тяговых подстанций постоянного тока.

Ключевые слова: заземляющее устройство, тяговая подстанция, добавочное сопротивление, дренажная установка, защитный потенциал.

Vasilii A. Kandaev, Ksenia V. Avdeeva, Anna A. Medvedeva, Anastasia V. Utkina

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

DETERMINATION OF THE ADDITIONAL RESISTANCE OPTIMAL VALUES OF DC TRACTION SUBSTATION DRAINAGE UNIT

Abstract. The article presents a method of the additional resistance calculating of ground grid drainage unit. This work has two main objectives: development of algorithm for determining the optimal values of additional resistance and to study the possibility of reducing losses in reverse traction network through drainage unit of traction substation. The calculation is carried out with a view to ensuring the normative values of the protective potential on the grounding grid and minimize losses in the reverse traction network. The method is based on the application of the reciprocity theorem, which allows to change the direction of the currents from the source to the load on the reverse one if the system is linear. The calculation of the values of additional resistance and power loss in the reverse traction network for average current on the considered traction substation of the Western-Siberian railway. In results the selection method of optimal values for the additional resistance is offered. This method can be used for designing of traction substation grounding grid protection.

Keywords: grounding grid, traction substation, additional resistance, drainage unit, protective potential.

Проблема защиты от коррозии блуждающими токами металлических сооружений является одной из актуальных проблем железнодорожной отрасли. Не менее важным вопросом является возможность управления и минимизации потерь мощности в тяговой рельсовой сети, особенно при постоянном увеличении цен на электроэнергию. Эти две задачи тесно связаны при рассмотрении дренажной защиты заземляющего устройства (ЗУ) тяговой подстанции (ТП).

Часть тягового тока, стекая с рельсов в грунт, возвращается на минус тяговой подстанции через ЗУ ТП, создавая на нем потенциал. Отвод натекающих токов с ЗУ осуществляется его подключением к отсасывающей линии с использованием короткозамыкателя или дренажной установки (ДУ) [1]. Добавочное сопротивление ДУ позволяет установить значение тока, натекающего на заземляющее устройство, при котором потенциал «ЗУ ТП – ближняя земля» находится в пределах защитного диапазона, указанного в ГОСТе [2]. Значения защитного потенциала для стальных неизолированных сооружений, к которым относится ЗУ, нормируются от минус 0,85 В ($\varphi_{\text{защ max}}$) до минус 3,5 В ($\varphi_{\text{защ min}}$) относительно медно-сульфатного электрода сравнения (МСЭ) [2].

В настоящее время настройка дренажной защиты предполагает проведение ряда измерений с различными добавочными сопротивлениями для снятия токовой и потенциальной характеристик. Затем эти характеристики путем умножения на коэффициент приводятся к среднегодовым значениям тока ТП [3]. По полученной потенциальной характеристике определяется необходимая величина сопротивления дренажной установки для максимального защитного потенциала, а по токовой – среднее значение рабочего тока ДУ.

С одной стороны, данный способ является довольно трудоемким. С другой стороны, величина тягового тока зависит от множества факторов и изменяется в широких пределах. Таким образом, однократно выбранное значение добавочного сопротивления не всегда является оптимальным и ЗУ может оказаться недозащищенным или избыточно защищенным.

Выбор оптимального значения добавочного сопротивления можно осуществить расчетным способом при известном значении тока тяговой подстанции, первичных и волновых параметрах рельсовой сети и ЗУ.

Поставленная задача решается в два этапа:

- определение необходимости включения дренажной установки;
- подбор значений добавочного сопротивления для получения значений потенциала на ЗУ ТП, находящихся в пределах защитного диапазона.

Рассмотрим систему «тяговая рельсовая сеть – заземляющее устройство ТП», представленную на рисунке 1. Тяговый ток I_T возвращается на минус подстанции как по рельсам (I_1), так и через ЗУ ТП (I_2).

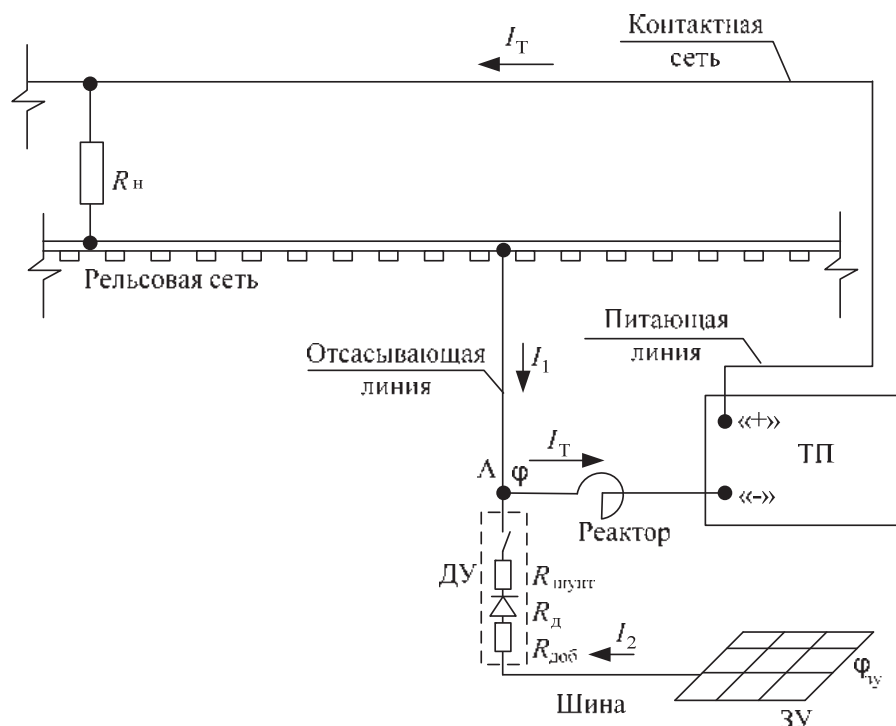


Рисунок 1 – Распределение тягового тока в системе «тяговая рельсовая сеть – заземляющее устройство ТП»

К рассматриваемой системе можно применить теорему взаимности, которая позволяет изменить направление токов от источника к нагрузке на обратное при условии, если система является линейной [4].

На первом этапе определим необходимость включения дренажной установки.

Значения электрических величин при непосредственном подключении заземляющего устройства к отсасывающей линии без дренажной установки определяются следующим образом.

Потенциал ϕ в точке А вычисляется по формуле:

$$\phi = I_T \frac{(R_{отс} + R_{вх.р}) \cdot (R_{ш} + R_{ЗУ})}{R_{отс} + R_{вх.р} + R_{ш} + R_{ЗУ}}, \quad (1)$$

где I_T – тяговый ток, А;

$R_{отс}$ – сопротивление отсасывающей линии, Ом;

$R_{вх.р}$ – входное сопротивление тяговой рельсовой сети, Ом;

$R_{ш}$ – сопротивление заземляющей шины, Ом;

$R_{ЗУ}$ – сопротивление заземляющего устройства, Ом.

Для точки А можно записать также:

$$\varphi = I_1 (R_{\text{вх.р}} + R_{\text{отс}}); \quad (2)$$

$$\varphi = I_2 (R_{\text{ш}} + R_{\text{зу}}). \quad (3)$$

где I_1 – ток в отсасывающей линии, А;

I_2 – ток, натекающий на заземляющее устройство, А.

Из формул (2) и (3) выразим токи I_1 и I_2 :

$$I_1 = \frac{\varphi}{R_{\text{вх.р}} + R_{\text{отс}}}; \quad (4)$$

$$I_2 = \frac{\varphi}{R_{\text{ш}} + R_{\text{зу}}}. \quad (5)$$

ЗУ ТП обычно содержит множество элементов и имеет сложную конфигурацию [5]. Для упрощения вычислений заменим ЗУ ТП эквивалентным полусферическим заземлителем, потенциал которого [6]

$$\varphi_{\text{зу}} = \frac{I_2 \cdot \rho_0}{2\pi \cdot r_0}, \quad (6)$$

где ρ_0 – удельное сопротивление земли, Ом·м;

r_0 – эквивалентный радиус полусферического заземлителя, м.

Эквивалентный радиус r_0 выбирается из условия равенства потенциалов ЗУ и полусферического заземлителя.

Потенциал «ЗУ ТП – медно-сульфатный электрод сравнения» $\varphi_{\text{ЗУ-МСЭ}}$

$$\varphi_{\text{ЗУ-МСЭ}} = \frac{I_2 \cdot \rho_0}{2\pi \cdot r_0} - \frac{I_2 \cdot \rho_0}{2\pi \cdot (r_0 + 0,1)} - 0,7, \quad (7)$$

где 0,1 – расстояние от ЗУ до места установки медно-сульфатного электрода, м;

0,7 – электрохимический потенциал стали в грунте относительно МСЭ, В.

По значению потенциала, рассчитанного по формуле (7), можно судить о необходимости защиты ЗУ ТП. Если $\varphi_{\text{защ min}} \leq \varphi_{\text{ЗУ-МСЭ}} \leq \varphi_{\text{защ max}}$, дополнительные средства защиты не предусматриваются.

На втором этапе определим падение напряжения на дренажной установке:

$$U_{\text{ду}} = \varphi - \varphi_{\text{зу}}. \quad (8)$$

Тогда значение добавочного сопротивления

$$R_{\text{доб}} = \frac{U_{\text{ду}}}{I_2} - (R_{\text{шунт}} + R_{\text{д}}), \quad (9)$$

где $R_{\text{шунт}}$ – сопротивление шунта, Ом;

$R_{\text{д}}$ – прямое сопротивление диода дренажной установки, Ом.

Подставим значения сопротивлений элементов дренажной установки с полученным значением добавочного сопротивления (9) и перепишем формулы (1) и (5) следующим образом:

$$\varphi = I_{\text{т}} \cdot \frac{(R_{\text{отс}} + R_{\text{вх.р}})(R_{\text{ш}} + R_{\text{зу}} + R')}{R_{\text{отс}} + R_{\text{вх.р}} + R_{\text{ш}} + R_{\text{зу}} + R'}, \quad (10)$$

$$I_2 = \frac{\varphi}{R_{\text{ш}} + R_{\text{зу}} + R'}, \quad (11)$$

где

$$R' = R_{\text{доб}} + R_{\text{д}} + R_{\text{шунт}}. \quad (12)$$

В качестве примера определим значения добавочного сопротивления на одной из тяговых подстанций Западно-Сибирской железной дороги. Исходными данными являются диаграмма распределения тока тяговой подстанции во временном промежутке (рисунок 2); сопротивление стальной шины заземляющего устройства размером 40×4 мм и длиной 20 м $R_{ш} = 0,00216$ Ом; сопротивление диода $R_d = 0,0005$ Ом; сопротивление шунта $R_{шунт} = 0,001$ Ом; эквивалентный радиус ЗУ $r_0 = 32$ м; сопротивление заземляющего устройства $R_{ЗУ} = 0,1$ Ом. Продольное сопротивление железнодорожного пути для однопутной железной дороги R_1 составляет 0,0155 Ом/км [7]. Удельное сопротивление земли 22 Ом·м, удельное сопротивление балласта $5 \cdot 10^3$ Ом·м, шпал – 10^4 Ом·м, высота земляного полотна 2 м.

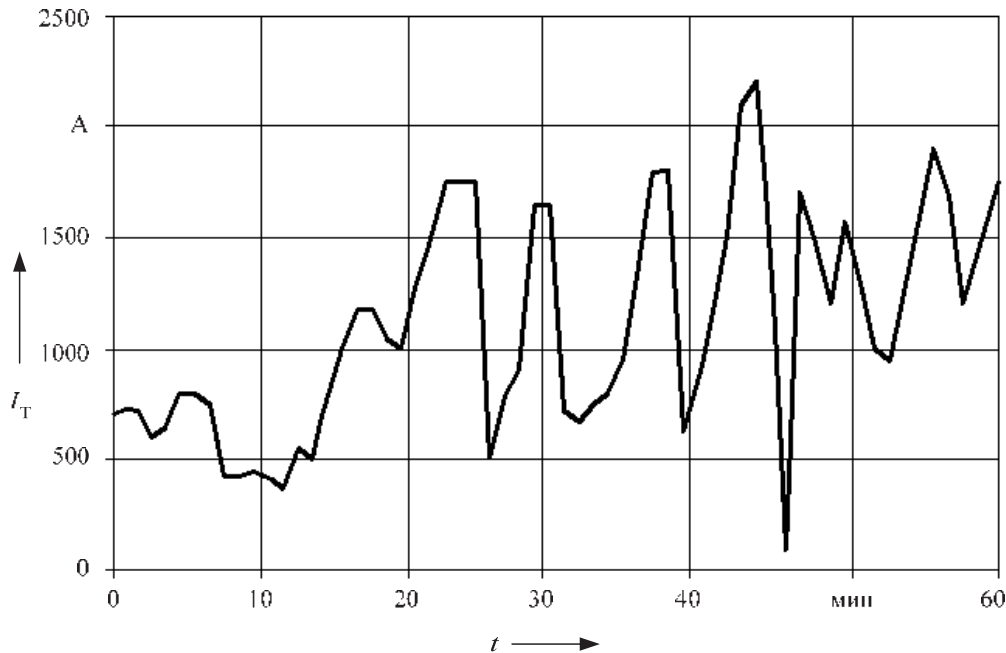


Рисунок 2 – Осциллограмма тока тяговой подстанции за 60 минут

Рассчитаем значение добавочного сопротивления для среднего тока ТП. Средний ток тяговой подстанции за время наблюдения (см. рисунок 2) равен 1125 А.

Для определения волнового сопротивления рельса рассчитаем переходное сопротивление по формуле [8]:

$$R_{п} = R_{из} + R_3, \quad (13)$$

где $R_{из}$ – сопротивление изоляции (балластной призмы), Ом·км;

R_3 – составляющая переходного сопротивления, зависящая от сопротивления земли, Ом·км.

Сопротивление изоляции, Ом·км, рассчитывается по формуле:

$$R_{из} = \left[0,142 \cdot 10^{-3} \cdot \rho_{ш} + 0,128 \cdot 10^{-3} \cdot \rho_6 + \frac{10^{-3} \cdot \rho_{п}}{\left(1,5 + \frac{5,8}{H_{п}} \right)} \right], \quad (14)$$

где $\rho_{ш}$ – удельное сопротивление шпал, Ом·м;

ρ_6 – удельное сопротивление балласта, Ом·м;

H – высота земляного полотна, м;

$\rho_{п}$ – удельное сопротивление земляного полотна, принимается на 20 % выше удельного сопротивления земли, Ом·м [8].

$$R_3 = (2,2 \cdot 10^{-3}) \cdot \rho_3, \quad (15)$$

где ρ_3 – удельное сопротивление земли, Ом·м.

Решение приводится с применением теоремы взаимности.

Определим необходимость включения ДУ по формулам (1) – (7). Потенциал в точке соединения шины ЗУ и отсасывающей линией $\varphi = 54$ В, токи I_1 и I_2 – 596 и 529 А соответственно.

Значение потенциала «ЗУ ТП – медно-сульфатный электрод сравнения» в соответствии с формулой (7) $\varphi_{ЗУ-МСЭ} = 16,5$ В. Таким образом, без дренажной установки ЗУ ТП защищено избыточно.

По формуле (8) падение напряжения $U_{ДУ} = 42$ В. Первое приближенное значение добавочного сопротивления, определяемое по уравнению (9), $R_{доб} = 0,08$ Ом.

При значении добавочного сопротивления 0,6 Ом защитный потенциал удовлетворяет нижней границе допустимых значений минус 3,5 В. Токи I_1 и I_2 равны соответственно 996 и 129 А, потенциал $\varphi = 90$ В.

При значении добавочного сопротивления 2 Ом защитный потенциал равен 0,85 В, $I_1 = 1077$ А, $I_2 = 48$ А. Потенциал в точке подключения ЗУ ТП к отсасывающей линии $\varphi = 97,5$ В.

Для тока тяговой подстанции $I_T = 1125$ А при значениях добавочного сопротивления от 0,6 до 2 Ом потенциал ЗУ ТП относительно МСЭ находится в защитном диапазоне. Однако при изменении тока ТП значения добавочного сопротивления, при которых потенциал ЗУ ТП находится в защитном диапазоне, будут меняться.

На рисунке 3 приведен график зависимости значений $R_{доб}$ от величины тока ТП.

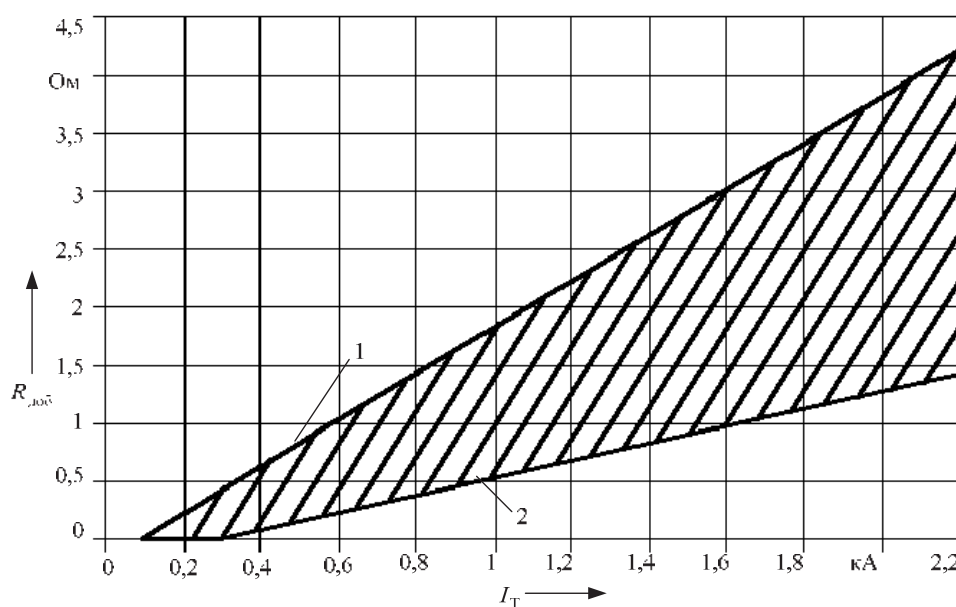


Рисунок 3 – Зависимость $R_{доб}$ от тока тяговой подстанции: 1 – при значении защитного потенциала минус 0,85 В; 2 – при значении защитного потенциала минус 3,5 В

По данному алгоритму можно определить добавочное сопротивление дренажной установки, необходимое для обеспечения защитного потенциала заземляющего устройства при различных значениях тока тяговой подстанции, что позволит сократить время и трудоемкость полевых испытаний.

Определим потери мощности на добавочном сопротивлении дренажной установки:

$$\Delta P_{доб} = I_2^2 \cdot R_{доб}. \quad (16)$$

Для значения защитного потенциала $\varphi_{защ \min}$ при среднем токе ТП $I_T = 1125$ А $\Delta P_{доб} = 10$ кВт, при $\varphi_{защ \max} - 4,4$ кВт.

Изменение $\Delta P_{\text{доб}}$ в зависимости от тока ТП показано на рисунке 4.

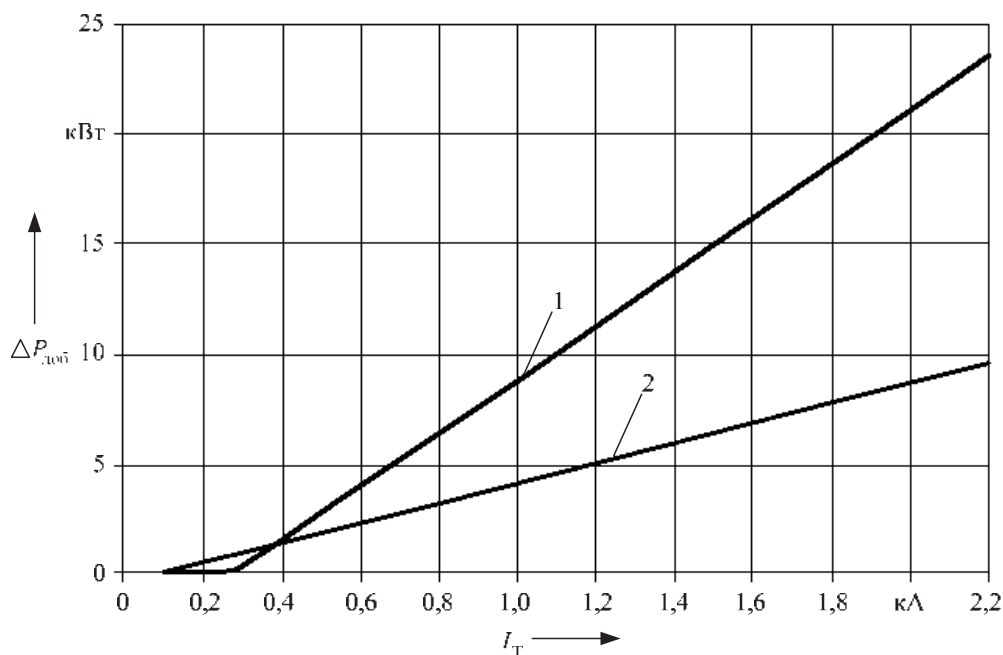


Рисунок 4 – Зависимость потерь мощности на добавочном сопротивлении от величины тока ТП:

- 1 – $\Delta P_{\text{доб}}$ при значении защитного потенциала минус 3,5 В;
 2 – $\Delta P_{\text{доб}}$ при значении защитного потенциала минус 0,85 В.

Общие потери мощности в обратной тяговой сети рассчитываются по формуле:

$$\Delta P_{\text{общ}} = I_T \cdot \varphi + \Delta P_{\text{доб}}. \quad (17)$$

При $\varphi_{\text{защ min}}$ общие потери в обратной тяговой сети $\Delta P_{\text{общ}} = 111$ кВт, при $\varphi_{\text{защ max}}$ – 114 кВт.

Разность между потерями мощностей в обратной тяговой сети при двух рассматриваемых значениях защитного потенциала составляет 3 кВт.

При увеличении добавочного сопротивления большая часть тока возвращается по рельсам на тяговую подстанцию, что уменьшает риск развития коррозии, но это приводит к увеличению потерь в тяговой рельсовой сети. Из результатов расчетов видно, что при токах ТП более 300 А, потери мощности на добавочном сопротивлении возрастают, но при этом общие потери мощности в обратной тяговой сети уменьшаются.

Так как среднее значение тока ТП определено за промежуток времени в один час, можно говорить о потерях энергии в тяговой рельсовой сети Q :

$$Q = \Delta P_{\text{общ}} \cdot \Delta t, \quad (18)$$

где Δt – промежуток времени, час.

Для рассматриваемого случая при выборе $R_{\text{доб}} = 0,6$ Ом для $\varphi_{\text{защ min}}$ экономия электрической энергии составит 26280 кВт·ч в год.

Соответственно при выборе значения добавочного сопротивления стоит руководствоваться двумя критериями: защитным потенциалом ЗУ ТП и потерями мощности в обратной тяговой сети. Выбор оптимального значения добавочного сопротивления по предложенной методике обеспечит защиту ЗУ ТП от коррозии и снижение потерь в обратной тяговой сети.

Список литературы

1. Инструкция по заземлению устройств электроснабжения на электрифицированных железных дорогах: ЦЭ-191 [Текст]: Утверждена приказом МПС РФ 10.06.1993 № ЦЭ-191 в редакции Указания МПС от 04.07.2000 № М-1954у. – Екатеринбург, 2013. – 64 с.

2. ГОСТ 9.602-2005. Единая система защиты от коррозии и старения. Сооружения подземные. Общие требования к защите от коррозии. Актуализированная редакция [Текст]. – М.: Стандартинформ, 2013. – 60 с.
3. Демин, Ю. В. Обеспечение долговечности электросетевых материалов и конструкций в агрессивных средах [Текст] / Ю. В. Демин, Р. Ю. Демина, В. П. Горелов / Новосибирская гос. акад. водного транспорта. – Новосибирск, 1998. – Кн. 2. – 190 с.
4. Бессонов, Л. А. Теоретические основы электротехники [Текст] / Л. А. Бессонов. – М.: Высшая школа, 1996. – 638 с.
5. Котельников, А. В. Блуждающие токи и эксплуатационный контроль коррозионного состояния подземных сооружений системы электроснабжения железнодорожного транспорта [Текст] / А. В. Котельников, В. А. Кандаев / УМЦ ЖДТ. – М., 2013. – 552 с.
6. Бургсдорф, В. В. Заземляющие устройства электроустановок [Текст] / В. В. Бургсдорф, А. И. Якобс. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 400 с.
7. Марквардт, К. Г. Электроснабжение электрифицированных железных дорог: Учебник [Текст] / К. Г. Марквардт. – М.: Транспорт, 1982. – 528 с.
8. Карякин, Р. Н. Тяговые сети переменного тока [Текст] / Р. Н. Карякин. – М.: Транспорт, 1987. – 279 с.

References

1. *Instruktsiia po zazemleniiu ustroystv elektrosnabzheniia na elektrifitsirovannykh zheleznykh dorogakh: TsE-191* (Instructions ground power units on electrified railways: CE-191). Yekaterinburg, 2013, 64 p.
2. *Edinaya Sistema zachity ot korrozii i starenia. Sooryeniya podzemnye. Obchie trebovaniya k zachite ot korrozii. Aktyalizirovannaya redakcia GOST 9.602-2005* (Unified system of protection from corrosion and ageing. The construction of underground. General requirements for corrosion protection. Revised edition). Moskov, 2013, 60 p.
3. Demin Yu. V., Demina, R. Yu., Gorelov V. P. *Obespechenie dolgovechnosti elektrosetevykh materialov i konstruykiy v agressivnykh sredakh* (Sustainability of the power grid materials and structures in aggressive environments). Novosibirsk, 1998, B. 2, 190 p.
4. Bessonov L. A. *Teoreticheskie osnovy elektrotehniki* (Theoretical foundations of electrical engineering). Moscow: Higher School, 1996, 638 p.
5. Kotelnikov V. A., Kandev V. A. *Blyjdauchie toki I eksplyatacionniy kontrol korrozionnogo sostoiania podzemnykh sooryeniy sistemy elektrosnabgenia jeleznodorojnogo transporta* (Stray currents and operational control of corrosion condition of underground structures of supply system of railway transport). Moscow, 2013, 552 p.
6. Burgsdorf V. V., Jacobs A. I. *Zazemlyauchie ystroistva electroystanovok* (Earthing of electrical installations). Moscow: Energoatomizdat, 1987, 400 p.
7. Marquardt C. G. *Elektrosnabgenie elektrificirovannykh jeleznykh dorog* (Electricity electrified Railways). Moscow: Transport, 1982, 528 p.
8. Karyakin R. N. *Tiagovie seti peremennogo toka* (Traction AC). Moscow: Transport, 1987, 279 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 «Телекоммуникационные, радиотехнические системы и сети», ОмГУПС.

Тел.: +7 (3812) 31-06-94.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Kandaev Vasilii Andreevich

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Doctor of Technical Sciences, Professor of the department «Telecommunications, radio systems and networks», OSTU.

Phone: +7 (3812) 31-06-94.

Авдеева Ксения Васильевна

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Телекоммуникационные, радиотехнические системы и сети», ОмГУПС.

Тел.: +7 (3812) 31-06-94.

Медведева Анна Александровна

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

Аспирант кафедры «Телекоммуникационные, радиотехнические системы и сети», ОмГУПС.

E-mail: maa1024@yandex.ru

Уткина Анастасия Владимировна

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

Аспирант кафедры «Телекоммуникационные, радиотехнические системы и сети», ОмГУПС.

E-mail: a.utkina.e@gmail.com

Avdeeva Ksenia Vasilyevna

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Cand. Tech. Sci., senior lecturer of the department «Telecommunications, radio systems and networks», OSTU.

Phone: +7 (3812) 31-06-94.

Medvedeva Anna Alexandrovna

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Post-graduate student of the department «Telecommunications, radio systems and networks», OSTU.

E-mail: maa1024@yandex.ru

Utkina Anastasia Vladimirovna

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Post-graduate student of the department «Telecommunications, radio systems and networks», OSTU.

E-mail: a.utkina.e@gmail.com

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Кандаев, В. А. Определение оптимального значения добавочного сопротивления дренажной установки тяговой подстанции постоянного тока [Текст] / В. А. Кандаев, К. В. Авдеева, А. А. Медведева, А. В. Уткина // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2016. – № 3 (27). – С. 83 – 91.

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Kandaev V. A., Avdeeva K. V., Medvedeva A. A., Utkina A. V. Determination of the additional resistance optimal values of dc traction substation drainage unit. Journal of Transsib Railway Studies, 2016, vol. 27, no. 3, pp. 83 – 91. (In Russian).

УДК 621.315:621.317

А. А. Кузнецов, А. Ю. Кузьменко, А. Г. Зверев

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

**МОДЕЛИРОВАНИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ
РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО ПОЛЯ НА ГИРЛЯНДАХ
ПОДВЕСНЫХ ФАРФОРОВЫХ ИЗОЛЯТОРОВ**

Аннотация. В статье рассмотрено распределение напряженности электростатического поля вокруг гирлянды фарфоровых подвесных изоляторов, содержащих дефекты. Приведены результаты выполненного имитационного моделирования распределения напряженности электростатического поля вокруг изоляторов в программном комплексе Elcut и картины распределения поля вокруг изоляторов для сред с различными диэлектрическими проницаемостями. Проведен сравнительный анализ результатов имитационного моделирования и экспериментальных исследований, на основании которого выявлена возможность диагностирования изоляторов по параметрам напряженности электростатического поля.

Ключевые слова: гирлянда фарфоровых изоляторов, дефект, напряженность электростатического поля, измерения, метод конечных элементов, имитационное моделирование.

Andrey A. Kuznetsov, Anton Yu. Kuzmenko, Andrey G. Zverev

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

MODELING AND EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THE DISTRIBUTION OF THE ELECTROSTATIC FIELD ON A GARLAND SUSPENDED PORCELAIN INSULATORS

Abstract. The article deals with the distribution of the electrostatic field around the garland of porcelain suspension insulators containing defects. Achieved the distribution simulation of the electrostatic field around insulators in the software package Elcut. We get a picture of field distribution around the insulators for the environment with different dielectric constants. A comparative analysis of simulation results and experimental studies on the basis of which revealed the possibility of diagnosing the parameters of insulators of the electrostatic field.

Keywords: garland of porcelain insulators, defect, intensity electrostatic field measurement, finite element method, simulation.

В настоящее время в контактной сети электрифицированных железных дорог используется большое количество разновидностей изоляторов. В большом количестве продолжают использоваться фарфоровые изоляторы, требующие периодического контроля во время эксплуатации.

Распределение напряженности электростатического поля вокруг гирлянды изоляторов зависит от типа изоляторов и их количества в гирлянде. Как известно, напряжение на гирлянде из нескольких изоляторов, соответствующее появлению короны на одном из них, может быть значительно меньше суммарного напряжения всех изоляторов в гирлянде и при некоторых условиях может оказаться ниже рабочего напряжения. Объясняется это тем, что напряжение, приложенное к гирлянде, распределяется по изоляторам неравномерно. То же самое происходит и с распределением напряженности электростатического поля.

Для выяснения причин неравномерного распределения напряжения необходимо обратиться к схеме замещения гирлянды из трех изоляторов, представленной на рисунке 1.

На этой схеме C – собственная емкость изолятора, составляющая для тарельчатых изоляторов 50 – 70 пФ; $C1$ – емкость изолятора по отношению к земле; $C2$ – емкость изолятора по отношению к проводу. Значения емкостей $C1$ и $C2$ зависят от положения изолятора в гирлянде; в среднем $C1 = 4 - 5$ пФ, $C2 = 0,5 - 1$ пФ [1].

Наличие емкостей $C1$ и $C2$ как раз и обуславливает неравномерное распределение напряжения и напряженности электростатического поля по элементам гирлянды. Рассмотрим сначала влияние только емкостей $C1$. Происходит отвлечение тока I в эти емкости, и, как следствие, токи, проходящие через собственные емкости изоляторов, и падения напряжения на изоляторах будут тем меньше, чем дальше от контактной подвески находится изолятор. Если рассмотреть влияние только емкостей по отношению к проводу, то картина изменится: токи через емкости C и падения напряжения будут меньше на тех изоляторах, которые находятся дальше от заземленного конца гирлянды.

В реальных условиях, т. е. когда $C1 > C2 \neq 0$, наибольшее напряжение прикладывается к изолятору, расположенному ближе к контактному проводу, наименьшие напряжения – к изоляторам, находящимся в середине гирлянды, и несколько повышенные – к изоляторам ближе к консоли.

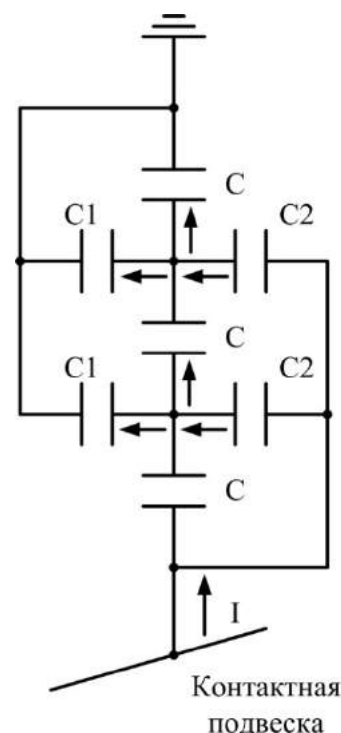


Рисунок 1 – Схема замещения гирлянды изоляторов

Решение задачи распределения электростатического поля гирлянды изоляторов, работающих на постоянном напряжении контактной сети железных дорог, находится путем расчетов поля на границах раздела системы «металл – диэлектрик 1 – диэлектрик 2 – ... диэлектрик n – металл – воздух». Для описания изменения поля в гирлянде изоляторов при наличии дефектов на одном из изоляторов дефект представляется в виде токопроводящей среды с переходными параметрами диэлектрической проницаемости.

Основной задачей расчета электростатического поля является определение напряженности поля в рассматриваемом ограниченном объеме по заданным потенциалам крайних точек металлических частей гирлянды изоляторов.

Для численного решения задач электростатического поля используют метод конечных элементов, основанный на аппроксимации искомой непрерывной функции – электрического потенциала, дискретной моделью, которая строится на множестве кусочно-непрерывных функций, определенных на конечном числе подобластей, называемых конечными элементами.

Применение метода конечных элементов начинается с разбиения области моделирования S на конечные элементы, причем их число, размеры и расположение произвольны. Конечные элементы могут представлять собой треугольники. Стороны треугольников должны совпадать с границами раздела сред с различными свойствами.

Если воспользоваться примером плоскопараллельной задачи расчета электрического поля диэлектрика, помещенного внутрь электрического поля, методом конечных элементов, то элементарный вектор в каждой точке координатной сетки определится путем решения дифференциальных уравнений вида [2, 3]:

$$\frac{\partial E_x}{\partial x} + \frac{\partial E_y}{\partial y} + \frac{\partial E_z}{\partial z} = \frac{\rho}{\varepsilon}; \quad (1)$$

$$\begin{cases} E_x = -\frac{\partial U}{\partial x}; \\ E_y = -\frac{\partial U}{\partial y}; \\ E_z = -\frac{\partial U}{\partial z}; \end{cases} \quad (2)$$

$$\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} = -\frac{\rho}{\varepsilon}; \quad (3)$$

$$U = \frac{1}{4\pi\varepsilon} \int_V \frac{\rho dV}{r}. \quad (4)$$

Рассмотренный метод предусматривает приближенное решение дифференциального уравнения, описывающее поле, распределенное в области S . При этом должно выполняться следующее условие: разность между приближенным и точным решениями должна быть ортогональна функциям формы, используемым при аппроксимации [3].

Метод конечных элементов использовался для моделирования напряженности электрического поля [4] фарфоровых изоляторов в программе Elcut. Также были проведены экспериментальные исследования в лаборатории техники высоких напряжений для подтверждения адекватности моделированию и возможности распространения его результатов на точки, в которых трудно или невозможно провести измерения.

Для решения поставленной задачи был выбран осесимметричный класс модели. Это означает, что для определения распределения напряженности поля будет достаточно выполнить чертеж половины изолятора (гирлянды). Распределение напряженности поля в трех-

мерном пространстве получается в результате вращения созданной модели вокруг оси симметрии. Построение осуществлялось в системе декартовых координат. Число узлов сетки принято равным 5000. Чертеж неисправного изолятора с заданием свойств области «Фарфор» приведен на рисунке 2.

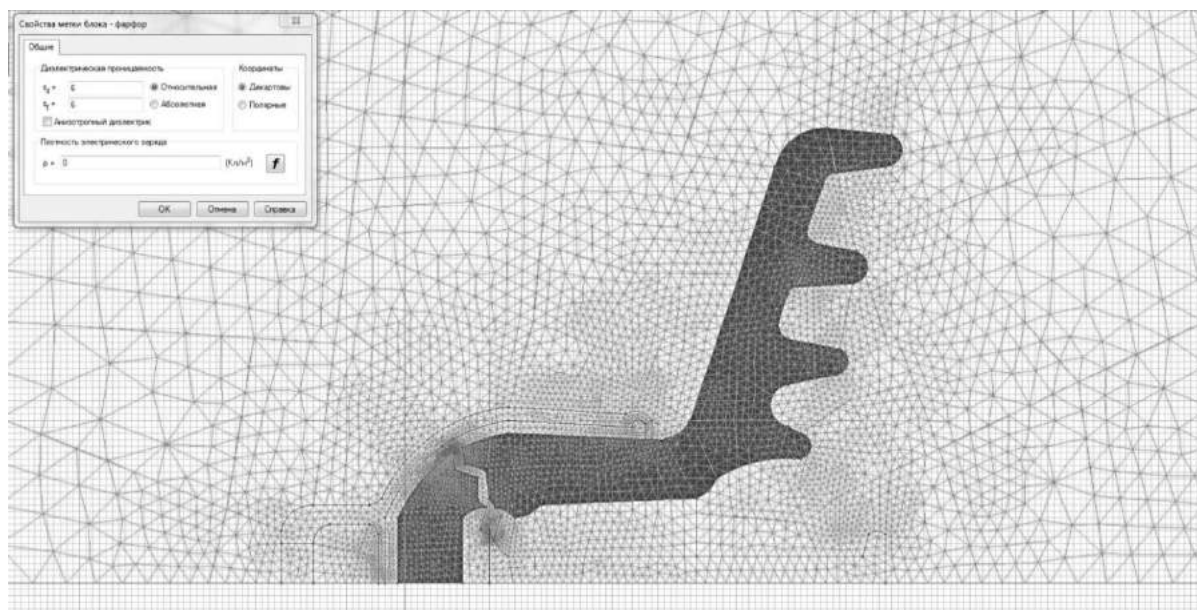


Рисунок 2 – Модель неисправного изолятора в программе Elcut

В программе для каждой области (среды) задается значение диэлектрической проницаемости. Значения диэлектрической проницаемости для сред, используемых в модели, представлены в таблице.

Параметры относительной диэлектрической проницаемости сред

Среда	ϵ
воздух	1
фарфор	6
цемент	2
дефект	20
вода	40

Для получения картины поля поверхность пестика изолятора задается меткой «Напряжение» (3 кВ), а поверхность шапки – меткой «Заземление» ($U = 0$). Распределение напряженности электростатического поля на исправном и неисправном изоляторах представлено на рисунках 3 и 4 соответственно.

Как видно из рисунков 3, 4, наличие в изоляторе дефекта приводит к увеличению напряженности электростатического поля, что соответствует повышенному значению ϵ в этой области.

Проанализировав полученные данные, можно сделать вывод о том, что наличие неисправного изолятора в гирлянде приводит к увеличению напряженности электростатического поля вокруг гирлянды. При измерениях на исправной гирлянде максимальное значение напряженности электростатического поля наблюдается у изолятора, находящегося ближе всего к источнику напряжения, а минимальное значение напряженности – у изолятора, ближайшего к заземленным частям.

Для определения распределения напряженности электростатического поля на гирлянде изоляторов было рассмотрено четыре случая. Распределение напряженности поля на исправной гирлянде приведено на рисунке 5, при нижнем неисправном изоляторе – на рисунке 6.

Как видно из рисунков 5, 6, наличие в изоляторе дефекта всегда приводит к увеличению напряженности электростатического поля как в отдельном изоляторе, так и в гирлянде в целом.

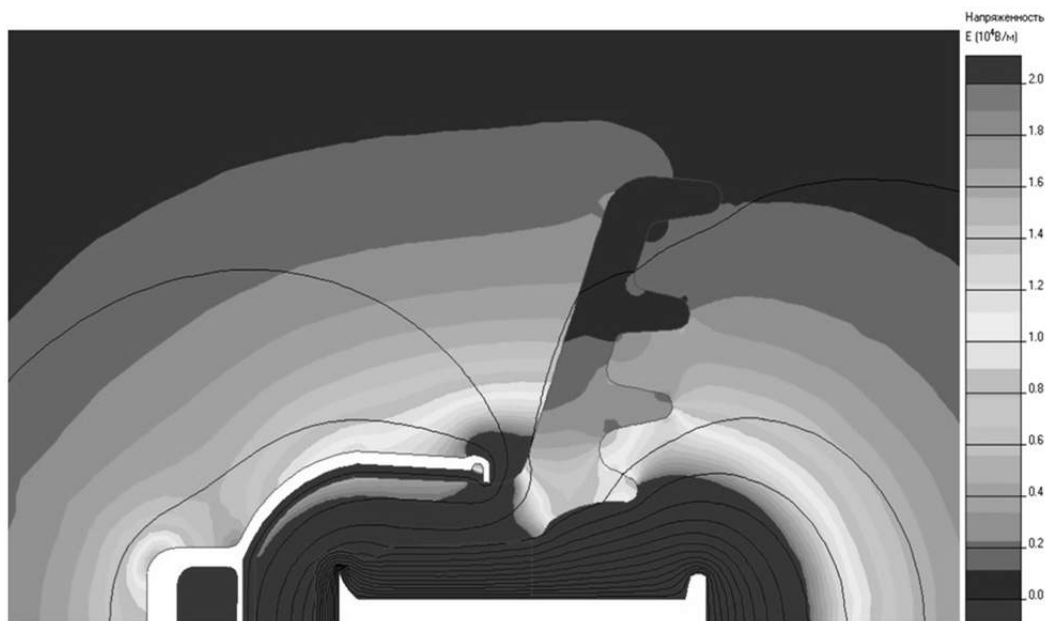


Рисунок 3 – Распределение напряженности поля на исправном изоляторе

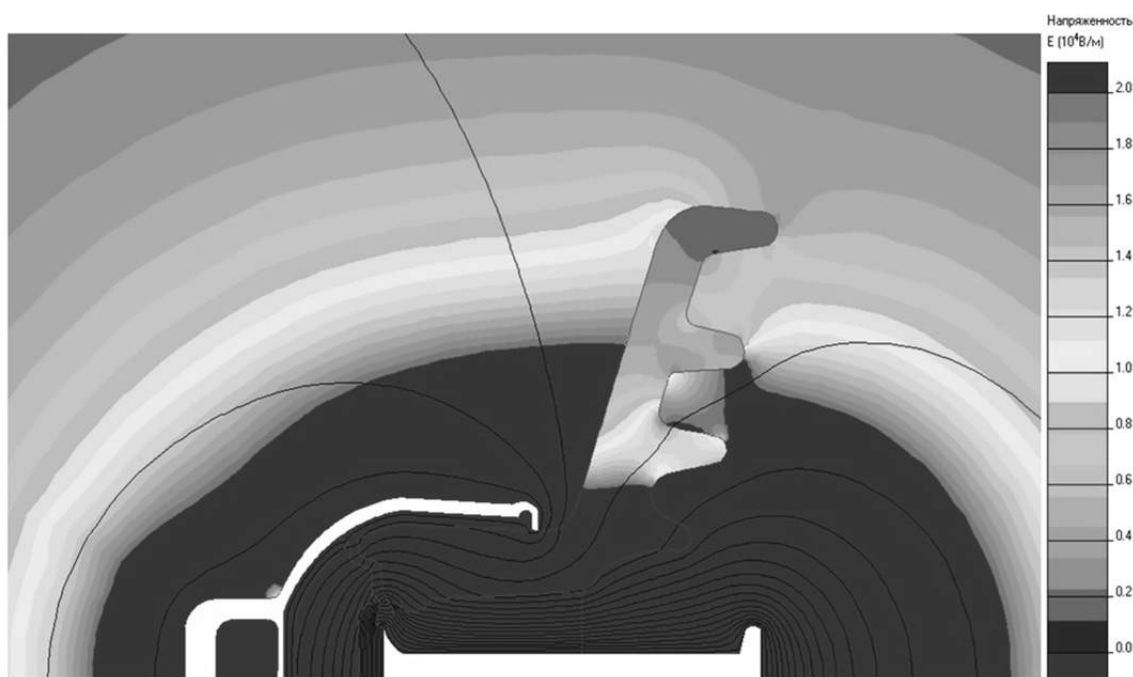


Рисунок 4 – Распределение напряженности поля на неисправном изоляторе

Это доказывает ранее выдвинутую теорию о распределении электростатического поля вокруг гирлянды изоляторов. Величина напряженности электростатического поля зависит также от расстояния, на котором производятся измерения.

В работе [5] приведены данные по экспериментальным исследованиям и измерениям электростатического поля на дефектном изоляторе и гирляндах из трех изоляторов с различным положением дефектного. Измерения проводились измерителем электростатического поля типа СТ-01. Дефектный изолятор был получен путем искусственного создания внутреннего дефекта с повышенным значением диэлектрической проницаемости ϵ . Данный дефект

представляет собой микротрещину в фарфоровой части изолятора, в которую был залит солевой раствор для еще большего снижения диэлектрических свойств изолятора.

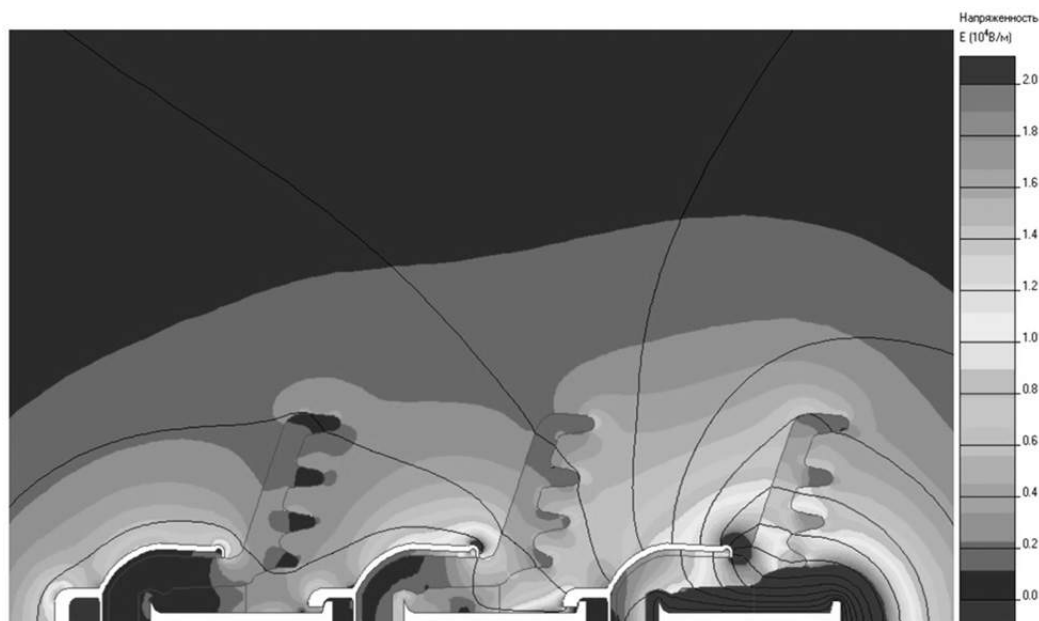


Рисунок 5 – Распределение напряженности поля на исправной гирлянде

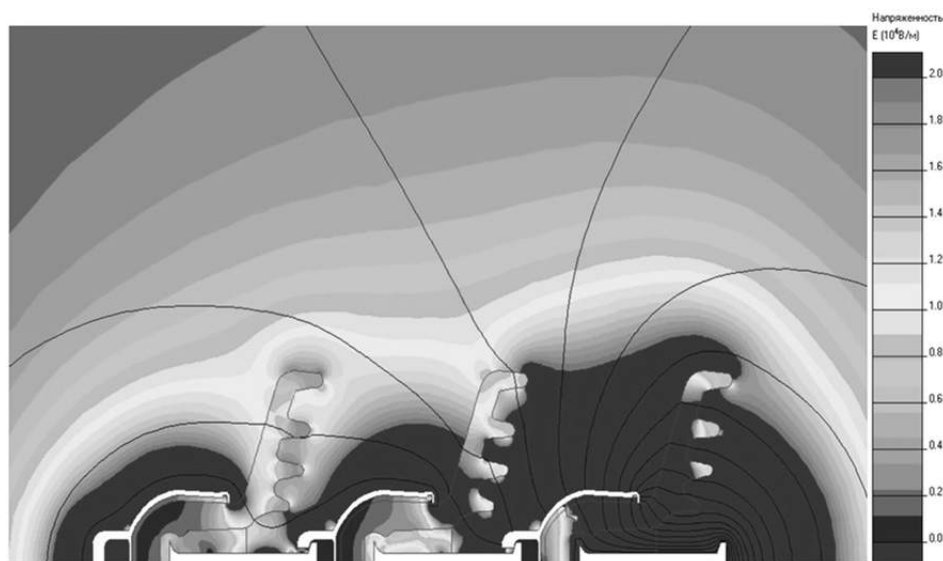


Рисунок 6 – Распределение напряженности поля при нижнем неисправном изоляторе в гирлянде

Результатирующие данные распределения напряженности поля приведены на рисунке 7 при различном положении неисправного изолятора в гирлянде.

Расчет погрешности отклонения результатов математического моделирования и экспериментальных данных показал, что относительная погрешность δ во всех измеренных точках не превышает значения 9,5 %.

Проанализировав полученные картины распределения напряженности поля в результате моделирования и сопоставив их с результатами экспериментальных исследований, можно сделать вывод о том, что наличие неисправного изолятора в гирлянде приводит к увеличению напряженности электростатического поля как вокруг изолятора, так и вокруг гирлянды в целом. При измерениях на исправной гирлянде максимальное значение напряженности электростатического поля наблюдается у изолятора, находящегося ближе всего к источнику напряжения, а минимальное значение – у изолятора, ближайшего к заземленным частям.

Моделирование в программном комплексе Elcut позволяет создавать модели изоляторов с различными типами дефектов и задавать различные свойства областей, что в реальных условиях выполнить крайне затруднительно.

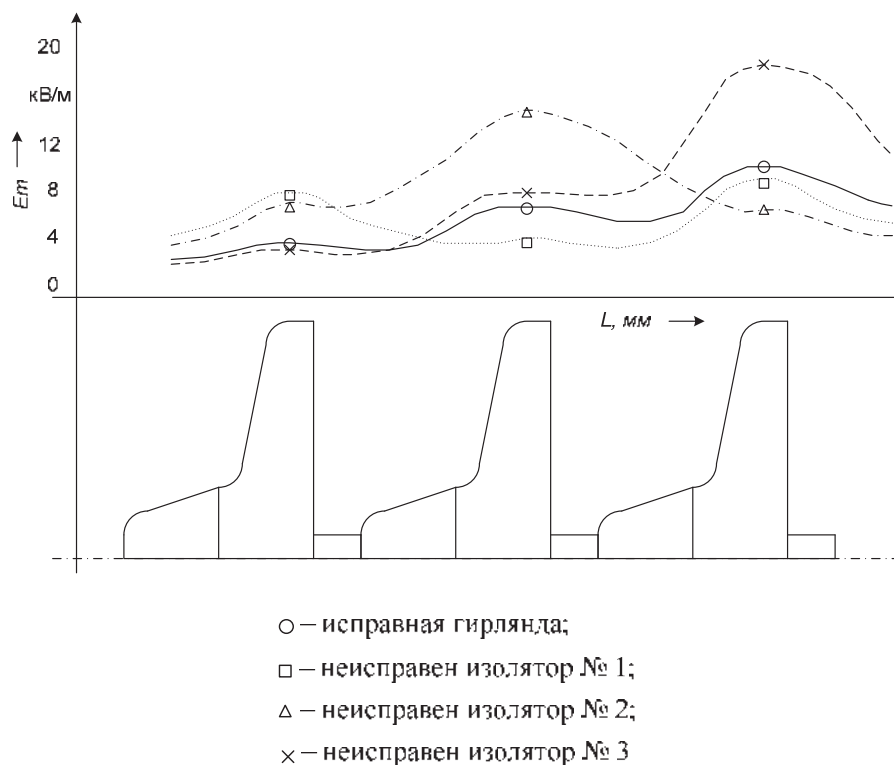


Рисунок 7 – Распределение напряженности поля на гирлянде изоляторов

Для стабилизации результатов измерений распределения поля вокруг гирлянд изоляторов и снижения факторов риска для здоровья обслуживающего персонала предложено новое устройство бесконтактного диагностирования [5]. Для своевременного нахождения гирлянд, содержащих поврежденные изоляторы, на протяженном участке контактной сети постоянного тока предлагается использование дистанционного метода [6] с последующим выявлением неисправного изолятора в гирлянде бесконтактным методом диагностирования.

Список литературы

1. Ефимов, А. В. Надежность и диагностика систем электроснабжения железных дорог / А. В. Ефимов, А. Г. Галкин / УМК МПС России. – М.:, 2000. – 512 с.
2. Теоретические основы электротехники. Учебник / К. С. Демирчан, Л. Р. Нейман и др. – СПб: Питер, 2003. – Т. 3. – 377 с.
3. Татевосян, А. С. Расчет электрических и магнитных полей методом конечных элементов с применением комплекса программ ELCUT / А. С. Татевосян, Е. Г. Андреева, А. О. Чугулев / Омский гос. техн. ун-т. – Омск, 2010. – 84 с.
4. Шевченко, С.Ю. Моделирование электрического поля стеклянного изолятора ВЛ 110 кВ [Текст] / С. Ю. Шевченко, А. А. Окунь // Сборник научных трудов «Вестник НТУ «ХПИ»: Энергетика: надійність та енергоефективність. 2011. – № 3. – С. 136 – 141.
5. Кузнецов, А. А. Исследование электростатического поля на гирляндах изоляторов контактной сети [Текст] / А. А. Кузнецов, А. Ю. Кузьменко, Е. А. Кротенко // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2015. – № 1 (21). – С. 54 – 59.
6. Кузнецов, А. А. Моделирование процесса дистанционного диагностирования изоляторов контактной сети [Текст] / А. А. Кузнецов, А. Ю. Кузьменко // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2014. – № 4 (20). – С. 92 – 97.

References

1. Efimov A.V., Galkin A.G. *Nadezhnost' i diagnostika sistem elektrosnabzheniia zheleznykh dorog*. (Reliability and diagnostics of railway power supply systems). Moscow: Ministry of Railways of Russia, 2000, 512 p.
2. Demirchan K. S., Neiman L. R., Korovkin N. V., Chechurin V. L. *Teoreticheskie osnovy elektrotekhniki*. (Theoretical Foundations of Electrical Engineering). St. Petersburg: Piter, Vol 3, 2003, 377 p.
3. Tatevosian A. S., Andreeva E. G., Chugulev A. O. *Raschet elektricheskikh i magnitnykh polei metodom konechnykh elementov s primeneniem kompleksa programm ELCUT*. (Calculation of electric and magnetic fields by finite element method with the use of complex programs ELCUT). Omsk, 2010, 84 p.
4. Shevchenko S. Iu., Okun' A. A. Simulation of the electric field of the glass insulator 110 kV overhead line [Modelirovanie elektricheskogo polia stekliannogo izoliatora VL 110 kV]. Collection of Scientific Papers: «Energy: energy efficiency and reliability», 2011, no. 3, pp. 136 – 141.
5. Kuznetsov A. A., Kuz'menko A. Iu., Krotenko E. A. Investigation of electrostatic field on the insulator strings catenary [Issledovanie elektrosticheskogo polia na girliandakh izoliatorov kontaktnoi seti]. *Izvestiia Transsiba – Journal of Transsib Railway Studies*, 2015, no. 1 (21), pp. 54 – 59.
6. Kuznetsov A. A., Kuz'menko A. Iu. Modeling of remote diagnosis catenary insulators process [Modelirovanie protsessa distantsionnogo diagnostirovaniia izoliatorov kontaktnoi seti] *Izvestiia Transsiba – Journal of Transsib Railway Studies*, 2014, no. 4 (20), pp. 54 – 59.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Кузнецов Андрей Альбертович

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

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

Тел.: +7 (3812) 31-06-88.

E-mail: kuznetsovaa@omgups.ru

Кузьменко Антон Юрьевич

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

Преподаватель кафедры «Теоретическая электротехника», ОмГУПС.

Тел.: +7 (3812) 31-06-88.

E-mail: KuZo17@yandex.ru

Зверев Андрей Григорьевич

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Теоретическая электротехника».

Тел.: +7 (3812) 31-06-88.

E-mail: zverevag@yandex.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Kuznetsov Andrey Albertovich

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Dr. Tech. Sci., Professor, Head of the department

«Theoretical the electrical engineering», OSTU.

Phone: +7 (3812) 31-06-88.

E-mail: kuznetsovaa@omgups.ru

Kuzmenko Anton Yurievich

Omsk State Transport University (OSTU).

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

The senior lecturer of the department «Theoretical the electrical engineering», OSTU.

Phone: +7 (3812) 31-06-88.

E-mail: KuZo17@yandex.ru

Zverev Andrey Grigorievich

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Cand. Tech. Sci., The senior lecturer of the department «Theoretical the electrical engineering», OSTU.

Phone: +7 (3812) 31-06-88.

E-mail: zverevag@yandex.ru

Кузнецов, А. А. Моделирование и экспериментальные исследования распределения электростатического поля на гирляндах подвесных фарфоровых изоляторов [Текст] / А. А. Кузнецов, А. Ю. Кузьменко, А. Г. Зверев // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2016. – № 3 (27). – С. 91 – 99.

Kuznetsov A. A., Kuzmenko A. Yu., Zverev A. G. Modeling and experimental investigation of the distribution of the electrostatic field on a garland suspended porcelain insulators. Journal of Transsib Railway Studies, 2016, vol. 27, no. 3, pp. 91 – 99. (In Russian).

УДК 621.397.4:519.6

В. В. Петров, Н. Г. Ананьева, А. С. Окишев

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

КОМПОЗИЦИЯ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ПРОГРАММИРОВАНИЯ ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ СИСТЕМ ВИДЕОРЕГИСТРАЦИИ НА ТЕРРИТОРИАЛЬНО РАСПРЕДЕЛЕННЫХ ОБЪЕКТАХ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА

Аннотация. Выполнен анализ особенностей процесса оптимизации сложных систем видеонаблюдения и видеорегистрации на территориально распределенных объектах железнодорожного транспорта. Предложена методика постановки задачи оптимизации на локальном уровне для группировки смежных кластеров в суперкластеры и пошаговой оптимизации всей системы на глобальном уровне. Методика двухуровневой оптимизации и объединение соседних информационных кластеров системы в суперкластеры позволяют совместить методы линейного и динамического программирования для оптимизации сложных разветвленных систем по критерию минимальных затрат.

Ключевые слова: видеонаблюдение, видеорегистратор, оптимизация, линейное и динамическое программирование, территориально распределенные объекты, суперкластеры, локомотивное депо.

Vladimir V. Petrov, Nadezda G. Ananieva, Andrey S. Okishev

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

COMPOSITION OF THE MATHEMATICAL METHODS OF PROGRAMMING FOR THE OPTIMIZATION OF THE SYSTEMS OF VIDEO REGISTRATION IN THE TERRITORIAALLY DISTRIBUTED OBJECTS OF RAIL TRANSPORT

Abstract. Is executed the analysis of the special features of the process of the optimization of the complex systems of video surveillance and video registration in the territorially distributed objects of rail transport. Is proposed the procedure of setting optimization problem during the local level for the group of adjacent clusters into supers-clusters and the step-by-step optimization of entire system at the global level. The procedure of two-level optimization and the association of the adjacent information clusters of system into the supers-cluster make it possible to combine the methods of linear and dynamic programming for the optimization of the complex branched systems on the criterion of minimum expenditures.

Keywords: video surveillance, the video recorder, optimization, linear programming, dynamic programming, the territorially distributed objects, supers-cluster, locomotive depot.

Под термином «математическое программирование» понимается метод оптимального планирования на основе математического моделирования сложных систем [1], а планирование – это в первую очередь ответственность за принятые решения, которая требует повышения уровня науки и образования для объективного обоснования затрат в процессе проектирования систем. Разработка и внедрение современных систем постоянного видеонаблюдения и видеорегистрации повышенных функциональности и сложности на территории ответственных объектов железнодорожного транспорта с применением наиболее надежных ин-

формационных технологий на основе новых методик постановки задач оптимизации позволяют существенно повысить эффективность и качество разработки информационных систем. На процесс разработки и оптимизации проектов информационных систем влияют определенные ограничения, изложенные в государственных стандартах [2], нормативных и рекомендационных материалах, которые обеспечивают надежность охранных мероприятий на транспорте и безопасность эксплуатации подвижного состава.

При разработке систем видеорегистрации на железнодорожном транспорте необходимо принимать во внимание наличие большого числа протяженных и территориально распределенных объектов. Поэтому следует максимально возможно использовать имеющуюся на железнодорожных предприятиях инфраструктуру и учитывать реальные условия монтажа и эксплуатации систем видеонаблюдения и видеорегистрации на конкретных объектах. Кроме того, следует принимать экономически обоснованные технические решения на основе эффективной постановки задачи оптимизации и проверенных на практике методов ее решения, позволяющих устранить субъективный фактор в процессе проектирования информационных систем. В статье [3] предложена трехэтапная методика оптимизации систем видеонаблюдения и видеорегистрации на основе методов линейного программирования по критерию минимальных затрат, в которой решение оптимизационной задачи предлагается осуществлять с применением известных и хорошо формализованных методов последовательного улучшения опорного плана.

Целью данной работы является разработка методики постановки задачи двухуровневой оптимизации систем видеорегистрации по критерию минимальных затрат, основанной на композиции различных математических методов планирования путем оптимального объединения информационных кластеров территориально распределенной системы видеорегистрации в суперкластеры на локальном уровне и применения последовательной многошаговой процедуры оптимизации системы, состоящей из суперкластеров, на глобальном уровне. Композиция – это совокупность составных частей объекта, соединяющая различные компоненты для образования единого целого, которая в данном случае предполагает совокупность методов линейного и динамического программирования для двухуровневой оптимизации сложных территориально распределенных информационных систем на основе объединения ресурсов в суперкластеры.

Выбор мест размещения видеокамер и видеорегистраторов осуществляется в соответствии с перечисленными выше требованиями стандартов, нормативов и рекомендаций, на основе которых формируется ряд ограничений для постановки задачи оптимизации информационной системы. Принцип применения и преимуществ предлагаемой методики оптимизации можно продемонстрировать на наглядном примере реализации системы видеорегистрации для локомотивного депо, примерный план которого представлен на рисунке 1.

Предлагаемая методика композиции различных математических методов планирования на основе формирования суперкластеров позволяет упростить постановку задачи двухуровневой оптимизации для реализации территориально распределенных систем видеорегистрации с минимальным вмешательством в структуру производственных помещений и работу информационных служб локомотивного депо, а минимизацию затрат осуществить за счет оптимизации схемы подключения видеокамер к регистраторам. В данном примере система включает в себя автономные видеорегистраторы (5 шт.), осуществляющие обработку и архивирование видеоданных, и камеры видеонаблюдения (34 шт.), которые подключаются к регистраторам с помощью коаксиального кабеля с совмещенной шиной питания. Матрица затрат на организацию каналов связи в локомотивном депо между камерами видеонаблюдения и видеорегистраторами представлена в таблице 1, которая содержит полный перечень исходных данных для предоставления возможности проверки корректности проведенных вычислений на основе предложенной методики, представленных результатов оптимизации и последующих выводов. Все затраты в данной статье приведены в относительных единицах.

Решение этой оптимизационной задачи можно продемонстрировать с помощью приложения MS Excel [4] на основе надстройки «Поиск решения», а для подсчета суммарных затрат на организацию каналов связи использовать функцию «СУММПРОИЗВ()». Процедура поиска решения позволяет найти оптимальное значение формулы, содержащейся в ячейке, которая называется целевой. Чтобы сузить множество возможных вариантов, анализируемых в процессе моделирования, в окне настройки поиска решения вводятся ограничения. Для решения поставленной задачи линейного программирования (ЗЛП) воспользуемся исходными данными, взятыми в соответствии с планом локомотивного депо (см. рисунок 1 и таблицу 1).

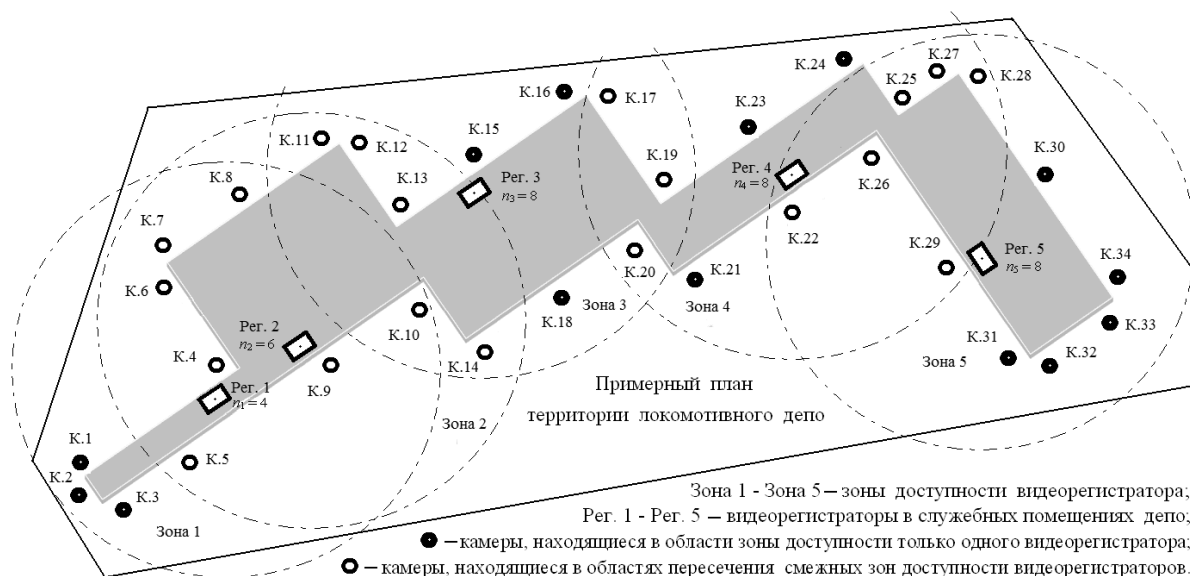


Рисунок 1 – План взаимного расположения видеорегистраторов и видеокамер с выделенными камерами внутри областей, не попадающих в пересекающиеся смежные зоны видеорегистрации

Таблица 1 – Матрица затрат в относительных единицах на организацию каналов связи между видеокамерами и видеорегистраторами для локомотивного депо

$m \backslash n$		Номер видеорегистратора					Число каналов связи (b_i)
		1	2	3	4	5	
1	2	3	4	5	6	7	8
Номер камеры видеонаблюдения	1	33	56	107	173	208	1
	2	37	60	112	176	210	1
	3	32	54	106	168	201	1
	4	8	19	70	137	174	1
	5	16	36	88	150	184	1
	6	28	33	73	144	185	1
	7	37	39	71	143	184	1
	8	46	37	53	125	168	1
	9	27	8	50	113	149	1
	10	50	28	29	90	127	1
	11	68	47	36	107	151	1
	12	66	48	28	98	143	1
	13	61	39	17	89	132	1
	14	62	42	36	80	114	1
	15	80	58	9	72	117	1
	16	105	82	31	55	101	1
	17	111	89	37	45	92	1
	18	81	60	31	59	95	1
	19	112	90	43	29	74	1
	20	100	78	39	40	79	1
	21	111	90	53	32	65	1
	22	137	115	72	9	44	1

матрица переменных

$$X = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & x_{1j} & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & \dots & x_{2j} & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & x_{3j} & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & x_{4j} & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & x_{5j} & \dots & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}, \quad (7)$$

состоящая в данном примере только из нулей и единиц, определяющая исходный (опорный) план начального допустимого решения, который проще всего формируется методом «Северо-западного угла» и удовлетворяет ограничениям (2), (3).

Допустимое решение будет оптимальным, если сумма произведений элементов матрицы затрат C и соответствующих элементов матрицы переменных X принимает минимальное значение, которое обозначено в уравнении (1) как $f(x) = \min(C, X)$. Исходные данные поставленной ЗЛП и вид окна ее решения в приложении Excel приведены на рисунке 2. Основные результаты этого варианта оптимизации представлены в ячейках таблицы 2 в строке под номером 1.

Матрица затрат (с)							Матрица переменных (x)						
Камеры	1	2	3	4	5	Вектор (b)	Камеры	1	2	3	4	5	Каналы
1	33	56	107	173	208	1	1	1	0	0	0	0	1
2	37	60	112	176	210	1	1	0	0	0	0	0	1
3	32	54	106	168	201	1	1	0	0	0	0	0	1
4	8	19	70	137	174	1	0	1	0	0	0	0	1
5	16	36	88	150	184	1	1	0	0	0	0	0	1
6	28	33	73	144	185	1	0	1	0	0	0	0	1
7	37	39	71	143	184	1	0	1	0	0	0	0	1
8	46	37	53	125	168	1	0	1	0	0	0	0	1
9	27	8	50	113	149	1	0	1	0	0	0	0	1
10	50	28	29	90	127	1	0	1	0	0	0	0	1
11	68	47	36	107	151	1	0	0	1	0	0	0	1
12	66	48	28	98	143	1	0	0	0	1	0	0	1
13	61	39	17	89	132	1	0	0	0	1	0	0	1
14	62	42	36	80	114	1	0	0	0	1	0	0	1
15	80	58	9	72	117	1	0	0	0	1	0	0	1
16	105	82	31	55	101	1	0	0	0	1	0	0	1
17	111	89	37	45	92	1	0	0	0	1	0	0	1
18	81	60	31	59	95	1	0	0	0	1	0	0	1
19	112	90	43	29	74	1	0	0	0	0	1	0	1
20	100	78	39	40	79	1	0	0	0	0	1	0	1
21	111	90	53	32	65	1	0	0	0	0	1	0	1
22	137	115	72	9	44	1	0	0	0	0	1	0	1
23	135	112	64	15	61	1	0	0	0	0	1	0	1
24	161	139	89	28	55	1	0	0	0	0	1	0	1
25	169	147	99	30	41	1	0	0	0	0	1	0	1
26	158	136	90	18	34	1	0	0	0	0	1	0	1
27	179	156	108	40	44	1	0	0	0	0	0	1	1
28	187	165	117	47	42	1	0	0	0	0	0	1	1
29	167	147	108	41	8	1	0	0	0	0	0	1	1
30	194	172	129	57	24	1	0	0	0	0	0	1	1
31	179	160	126	64	23	1	0	0	0	0	0	1	1
32	188	169	135	72	29	1	0	0	0	0	0	1	1
33	203	183	146	79	32	1	0	0	0	0	0	1	1
34	205	185	147	77	31	1	0	0	0	0	0	1	1
Вектор (a)	4	6	8	8	8	Σ=34	Каналы	4	6	8	8	8	34
Функция цели	= 941												

Рисунок 2 – Исходные данные и результат решения ЗЛП в приложении Excel с помощью надстройки «Поиск решения» и функции «СУММПРОИЗВ()»

Вычислительные затраты на решение ЗЛП для сложных территориально распределенных систем, например, симплекс-методом существенно возрастают при большом числе переменных состояний. Если обозначить r – число регистраторов, а v – камер в системе, то общее

число столбцов (переменных состояния) в симплекс-таблице составит $(r \times v)$ и число строк (ограничений) будет $(r+v)$, что может быть совершенно неприемлемым в процессе проектирования больших разветвленных систем в реальных условиях.

Число переменных состояния (параметров) в системе, которые в задачах математического моделирования и оптимального управления обычно называют фазовыми координатами, можно сократить, если рассматривать только камеры, находящиеся в пересекающихся областях смежных зон видеорегистрации, а камеры, которые находятся только в одной зоне доступности видеорегистратора, можно исключить из процесса оптимизации, так как у них альтернативных вариантов выбора нет. Поэтому эти камеры не относятся к переменным состояния системы и их можно исключить из категории «управляемых координат системы», а затраты на подключение этих камер к регистратору учитывать отдельно от процесса оптимизации на заключительном этапе для корректности сравнительного анализа. После выбора только управляемых координат в системе (см. рисунок 1) план локомотивного депо будет содержать только камеры, которые обозначены светлыми кружками. Процедура этого варианта решения оптимизационной ЗЛП представлена в таблице 2 в строке под номером 2.

Таблица 2 – Варианты постановки ЗЛП и результаты оптимизации территориально распределенной системы в целом как одного суперкластера

№	Кластеры		1	2	3	4	5	Сумма по кластерам
1	ЗЛП закрытого типа для оптимизации системы при фиксированном числе каналов регистраторов	номера камер в кластерах	1, 2, 3, 5	4, 6, 7, 8, 9, 10	11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18	19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26	27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34	34
		затраты на организацию каналов связи	118	164	225	201	233	941
2	ЗЛП закрытого типа только для камер, находящихся на пересечении смежных зон регистрации	номера камер в кластерах	5	4, 6, 7, 8, 9, 10	11, 12, 13, 14, 17	19, 20, 22, 25, 26	27, 28, 29	20
		затраты на организацию каналов связи	16	164	154	126	94	554
	Камеры, доступные только внутри одной зоны регистрации, не имеющие альтернативного выбора	номера камер в кластерах	1, 2, 3	-	15, 16, 17	21, 23, 24	30, 31, 32, 33, 34	14
		затраты на организацию каналов связи	102	-	71	75	139	387
	Суммарные затраты варианта		118	164	225	201	233	941
3	Результат решения ЗЛП открытого типа при достаточном числе фиктивных каналов регистраторов	номера камер в кластерах	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7	8, 9, 10	11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 20	19, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27	28, 29, 30, 31, 32, 33, 34	34
		затраты на организацию каналов связи	191	73	264	201	189	918

Первый и второй варианты оптимизации в таблице 2 дают одинаковые конечные результаты (функция цели равна 941), но второй вариант имеет на 14 переменных состояния меньше, но следует учитывать, что это не самый лучший выбор. Следовательно, можно найти оптимальное решение с меньшими суммарными затратами. Для этого нужно снять ограничения в системе, установленные на число каналов регистраторов в каждом кластере системы. Фрагмент окна этого варианта постановки ЗЛП открытого типа и результат решения в при-

ложении Excel представлены на рисунке 3, а процедура оптимизации этого варианта отражена в ячейках таблицы 2 в строке под номером 3.

Функция цели в третьем варианте равна 918, что подтверждает эффективность принятого решения, и это значение будет использовано в процессе дальнейшего сравнительного анализа различных вариантов постановки задач оптимизации. Кроме того, по результатам анализа описанных вариантов можно сделать важный и вполне предсказуемый вывод: любые дополнительные ограничения в системе сужают возможности нахождения варианта с наилучшим оптимальным результатом.

Основное внимание в данной работе уделено вопросам методологии, т. е. постановке задачи оптимизации и решения ее на основе совмещения двух самых распространенных методов математического программирования и последующей сравнительной оценки полученных результатов моделирования. Специальный раздел математики, который посвящен исследованию операций, позволяет найти лишь наилучший способ организации вычислений для решения уже поставленной задачи, а в данной работе для демонстрации применения предлагаемой методики постановки задачи оптимизации достаточно использовать известные и проверенные вычислительные алгоритмы и программные приложения.

28	26	158	136	90	18	34	1		26	0	0	0	1	0	1
29	27	179	156	108	40	44	1		27	0	0	0	1	0	1
30	28	187	165	117	47	42	1		28	0	0	0	0	1	1
31	29	167	147	108	41	8	1		29	0	0	0	0	1	1
32	30	194	172	129	57	24	1		30	0	0	0	0	1	1
33	31	179	160	126	64	23	1		31	0	0	0	0	1	1
34	32	188	169	135	72	29	1		32	0	0	0	0	1	1
35	33	203	183	146	79	32	1		33	0	0	0	0	1	1
36	34	205	185	147	77	31	1		34	0	0	0	0	1	1
37	Вектор (a)	0	0	0	0	0	$\Sigma=34$		Каналы	7	3	9	8	7	34
38															
39	Функция цели =	918													
40															

Рисунок 3 – Вариант постановки и решения ЗЛП без ограничения числа каналов регистраторов

На практике при разработке сложных систем всегда имеется выбор: оптимизировать всю систему в целом (т. е. находить значения системных переменных параллельно путем улучшения исходного плана) или разделить систему на несколько более простых подсистем (т. е. применять метод оптимизации по шагам с последовательным перебором различных допустимых вариантов), который в общем случае называют методом динамического программирования. Основное назначение динамического программирования – это решение сложных задач путем последовательного решения нескольких более простых подзадач. Однако классический метод динамического программирования эффективен только для небольшого числа переменных состояния (например, не более 30), а трудоемкость реализации таких алгоритмов ограничивает возможность их практического применения для более сложных систем.

Общий принцип, лежащий в основе решения всех задач динамического программирования, соответствует принципу оптимальности Беллмана, который можно сформулировать так: «Каково бы ни было состояние системы перед очередным шагом, надо выбирать управление на этом шаге так, чтобы выигрыш на данном шаге плюс оптимальный выигрыш на всех остальных шагах был максимальным» [5]. При реализации этого принципа для каждого текущего шага необходимо найти условное оптимальное управление, которое формируется исходя из условия состояния системы на предыдущем шаге.

Задача динамического программирования (ЗДП) может быть реализована только после того, как сформирован целевой функционал и записаны все соответствующие рекуррентные соотношения, что требует от разработчика большого опыта и системного подхода, в отличие от метода линейного программирования, которое сводится только к некоторой формализованной вычислительной процедуре улучшения плана и нахождения экстремального значения целевой функции. Динамическое программирование не имеет единого универсального метода решения, а практически каждая задача, решаемая этим методом, характеризуется своими

особенностями, требует неформального подхода и проведения поиска наиболее приемлемой совокупности методов для ее решения. Поэтому на практике в процессе постановки задачи важнее всего выбрать только существенные параметры для описания состояний системы и соответствующих вариантов управления. Фактически это означает, что разработчик должен осуществить выбор определенного уровня абстракции для успешной оптимизации сложной информационной системы.

В данном примере структура территориально распределенной информационной системы уже разделена на зоны видеорегистрации, поэтому согласно предложенной методике для уменьшения вычислительных затрат на каждом шаге условной оптимизации соседние кластеры предлагается объединить в суперкластеры на локальном уровне оптимизации для последующей пошаговой оптимизации на глобальном уровне. При этом в каждом суперкластере может находиться несколько видеорегистраторов, имеющих достаточное число фиктивных каналов.

Для постановки задачи оптимизации сложной разветвленной системы видеорегистрации на территориально распределенных объектах железнодорожного транспорта предлагается использовать следующую парадигму.

1. На локальном уровне оптимизации при постановке ЗЛП используются данные о числе регистраторов, камер и затратах на реализацию каналов связи при объединении нескольких смежных кластеров в определенный суперкластер.

2. На глобальном уровне оптимизации при постановке ЗДП за каждый шаг принимается очередной суперкластер, который формируется ранее на локальном уровне.

3. В качестве параметров (фазовых координат), характеризующих состояние управляемой системы перед каждым шагом, используются номера камер, одновременно выбранных на локальном уровне в смежных суперкластерах (фактически это каналы регистраторов, расположенных в смежных суперкластерах и конкурирующих за подключение к камере, находящейся в перекрывающихся зонах доступа ближайших регистраторов).

4. В качестве набора управляющих воздействий на каждом шаге ЗДП используется процедура кастомизации связей между каналами регистраторов в суперкластерах и доступными видеокамерами в смежных пересекающихся суперкластерах. В ЗДП под «управляемыми» понимаются процессы, на ход которых разработчик системы может влиять путем выбора подходящих вариантов воздействия на объект из ограниченного числа возможных вариантов (в данном случае это фиксация варианта коммутационной схемы с наименьшими затратами внутри суперкластера).

5. В качестве критерия, который используется для оценки управляющего воздействия на каждом шаге управления, используется минимум затрат на организацию возможных каналов связи между регистраторами и камерами в пределах суперкластера.

6. В состав целевого функционала при постановке ЗДП на всех шагах $s = \overline{1, k}$ глобального уровня оптимизации включаются и результаты решения ЗЛП локального уровня. Минимальное значение этого целевого функционала зависит от содержимого векторов A , B и матриц C , X внутри каждого шага оптимизации s :

$$F(A, B, C, X, s) = \min \{ \min(C_s, X_s); A_s X_s \leq B_s; X_s \geq 0 \}, \quad s = \overline{1, k}. \quad (8)$$

7. На каждом шаге s для определения реакции системы на выбранное управляющее воздействие находится новое состояние, в которое переходит система (т. е. уменьшается число вариантов продублированного выбора камер в различных суперкластерах системы).

8. На заключительном этапе решения ЗДП осуществляется окончательный выбор камер в смежных суперкластерах и формируется целевой функционал для оценки результата управления с использованием уже известных значений затрат после исключения дублирования одинаковых номеров камер во всех суперкластерах.

9. Начинать оптимизацию на глобальном уровне можно с любого шага (т. е. с любого суперкластера), используя новое состояние системы в качестве начальных условий для

условной оптимизации на соседнем шаге, реализующей установленный критерий эффективности (минимум затрат на организацию всех каналов связи).

Основная задача в процессе реализации предлагаемой методики – это выбор рационального соотношения между числом кластеров в каждом суперкластере для постановки ЗЛП и числом суперкластеров в системе (т. е. числом шагов) для постановки ЗДП. Варианты постановки и результаты решения двухшаговой ЗДП на глобальном уровне представлены в таблице 3 (т. е. система состоит из двух суперкластеров), где дублированные камеры в составе суперкластеров (фазовые координаты для ЗДП) выделены жирным шрифтом. Оба различных варианта формирования суперкластеров дают одинаковое оптимальное значение затрат 918.

Два варианта постановки трехшаговой ЗДП на глобальном уровне представлены в таблице 4, которые дают одинаковое оптимальное значение 918 так же, как и в предыдущих вариантах (с другой структурой суперкластеров), что подтверждает эффективность предложенной двухуровневой методики оптимизации сложных информационных систем. Сравнивая столбцы «Сумма по кластерам» в таблицах 3 и 4, можно отметить, что число переменных состояния в ЗДП на глобальном уровне увеличивается с ростом числа суперкластеров в системе, но при этом существенно упрощается решение ЗЛП на локальном уровне оптимизации. Например, если при составлении исходного плана ЗЛП применять метод минимального элемента, то в большинстве случаев этот опорный план сразу является оптимальным решением и только иногда требуется одна или две процедуры улучшения плана.

Таблица 3 – Варианты постановки двухшаговой ЗДП для оптимизации территориально распределенной системы как совокупности двух суперкластеров

№	Кластеры	1	2	3	4	5	Сумма по кластерам
1	Шаги оптимизации в ЗДП	Суперкластер 1			Суперкластер 2		2
	Номера камер в ЗЛП для суперкластеров	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20			17, 19, 20 , 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34		37
	Номера камер после заключительного этапа решения ЗДП	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7	8, 9, 10	11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 20	19, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27	28, 29, 30, 31, 32, 33, 34	34
	Затраты на организацию каналов связи в кластерах	191	73	264	201	189	918
2	Шаги оптимизации в ЗДП	Суперкластер 1			Суперкластер 2		2
	Номера камер в ЗЛП для суперкластеров	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14			10, 11, 12, 13, 14 , 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34		39
	Номера камер после заключительного этапа решения ЗДП	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7	8, 9, 10	11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 20	19, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27	28, 29, 30, 31, 32, 33, 34	34
	Затраты на организацию каналов связи в кластерах	191	73	264	201	189	918

Таблица 4 – Варианты постановки трехшаговой ЗДП для оптимизации территориально распределенной системы как совокупности трех суперкластеров

№	Кластеры	1	2	3	4	5	Сумма по кластерам
1	Шаги оптимизации в ЗДП	Суперкластер 1			Суперкластер 2		3
	Номера камер в ЗЛП для суперкластеров	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14			10, 11, 12, 13, 14 , 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29		45
	Номера камер после заключительного этапа решения ЗДП	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7	8, 9, 10	11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 20	19, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27	28, 29, 30, 31, 32, 33, 34	34
	Затраты на организацию каналов связи в кластерах	191	73	264	201	189	918

Окончание таблицы 4

	Шаги оптимизации в ЗДП	Кластер 1	Суперкластер 1		Суперкластер 2		3
2	Номера камер в ЗЛП для суперкластеров	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10	4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20		17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34		44
	Номера камер после заключительного этапа решения ЗДП	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7	8, 9, 10	11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 20	19, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27	28, 29, 30, 31, 32, 33, 34	34
	Затраты на организацию каналов связи в кластерах	191	73	264	201	189	918

Для подтверждения преимущества предлагаемой методики можно также сравнить ее с классическим вариантом постановки ЗДП оптимизации описанного выше примера системы, результат решения которой представлен в таблице 5. Оптимальное решение составляет 918 относительных единиц, что совпадает с предыдущими вариантами, так как в данном примере постановки ЗДП целевой функционал представляет собой совокупность только линейных функций (сумма затрат). Анализ этого классического варианта постановки ЗДП подтверждает, что он имеет один существенный недостаток (наибольшее число фазовых координат) и требует организации самого большого числа возможных вариантов перебора в процессе реализации проекта.

Таблица 5 – Постановка классической ЗДП для оптимизации территориально распределенной системы по шагам как последовательности пяти кластеров

№	Кластеры	1	2	3	4	5	Сумма по кластерам
1	Число доступных камер в каждом кластере (общее число фазовых координат на каждом шаге)	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10	4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14	10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20	17, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29	22, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34	55
2	Номера камер в кластерах после условной оптимизации на каждом шаге для решения ЗДП (перебор вариантов)	4, 5, 6, 7, 8, 9, 10	4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14	10, 11, 12, 13, 14, 17, 19, 20	17, 19, 20, 22, 25, 26, 27, 28, 29	22, 25, 26, 27, 28, 29	41
3	Формирование кластеров после перебора всех вариантов по минимуму затрат	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7	8, 9, 10	11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 20	19, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27	28, 29, 30, 31, 32, 33, 34	34
4	Затраты в кластерах на организацию каналов связи	191	73	264	201	189	918

Если бы функционал (8) содержал в своем составе нелинейные функции, то оптимальное решение ЗДП могло бы быть и другим, так как в предлагаемой методике фактически реализуется квазикусочно-линейная аппроксимация любой нелинейности целевого функционала, анализ погрешности которой выходит за рамки данной статьи, но приближенное решение в этом случае следовало бы уже называть приемлемым вместо оптимального. Благодаря постановке ЗЛП открытого типа с достаточным числом фиктивных каналов регистраторов на локальном уровне оптимизации имеется возможность решения сразу двух задач: выбора оптимальной схемы подключения камер к регистраторам и перераспределения числа каналов видеорегистраторов между кластерами, что реально снижает затраты на организацию каналов передачи данных в сложной информационной системе.

На основании полученных результатов можно сделать выводы.

1. Предлагаемая методика двухуровневой оптимизации на основе различных методов математического программирования позволяет повысить эффективность проектирования сложных территориально распределенных информационных систем с учетом имеющихся ресурсов и инфраструктуры предприятия.

2. Объединение нескольких соседних кластеров системы в суперкластеры на локальном уровне оптимизации позволяет существенно снизить число фазовых координат и шагов при оптимизации методом динамического программирования на глобальном уровне.

3. Локальный уровень оптимизации может начинаться с любой группы смежных кластеров территориально распределенной сложной информационной системы.

4. Глобальный уровень оптимизации может начинаться с любого суперкластера территориально распределенной сложной информационной системы.

5. Предлагаемая методика может применяться для оптимизации территориально распределенных информационных систем любой топологии (линейной, радиальной, кольцевой, кластерной).

Список литературы

1. Моисеев, Н. Н. Методы оптимизации [Текст] / Н. Н. Моисеев, Ю. П. Иванилов, Е. М. Столярова. – М.: Наука, 1978. – 352 с.
2. ГОСТ Р 51558-2000. Системы охранные телевизионные. Общие технические требования и методы испытания [Текст]. – М.: Изд-во стандартов, 2000. – 12 с.
3. Ананьева, Н. Г. Применение кластерной технологии для разработки систем видеонаблюдения и видеорегистрации на территориально распределенных объектах железнодорожного транспорта [Текст] / Н. Г. Ананьева, В.В. Петров // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2015. – № 3 (23). – С. 85 – 94.
4. Леоненков, А. В. Решение задач оптимизации в среде MS Excel [Текст] / А. В. Леоненков. – Петербург: БХВ, 2005. – 701 с.
5. Беллман, Р. Прикладные задачи динамического программирования [Текст] / Р. Беллман, С. Дрейфус. – М.: Наука, 1965. – 458 с.

References

1. Akimov V. A., Alekseenko V. A., Khomenko A. P., Chernyak S. S. *Bezopasnost' Rossii. Bezopasnost' zheleznodorozhnogo transporta v usloviakh Sibiri i Severa* (Safety of Russia. Safety of railway transportation in the conditions of Siberia and North). Moscow: MGF Knowledge, 2014, 856 p.
2. Dementev V. P., Kornev L. V., Khomenko A. P., Chernyak S. S. *Zheleznodorozhnye rel'sy dlia Sibiri* (Railway rails for Siberia). Irkutsk: ISTU, 2010, 320 p.
3. Chernyak S. S. *Zheleznodorozhnyi put' Vostochnoy-Sibiry* (Track the East Siberian). Irkutsk: ISTU, 2003, 424 p.
4. Kozyrev N. A., Dementiev V. P. *Proizvodstvo zheleznodorozhnykh rel'sov iz elektrostali* (Production of electric steel rails). Novokuznetsk: IEC, 2000, 123 p.
5. Vorozhischev V. I., Chernyak S. S., Deviatkin Y. D., Shur E. A., Kozyrev N. A., Dementiev V. P. *Patent RU 2224041 C 22 C 38/12*, 20.02.04.
6. Chernyak S. S., Dementiev V. P., Kozyrev N. A., Voyloshnikov V. D., Vorozhischev V. I., Tuzhilin L. V. *Patent RU 2224042 C 22 C 38/24*, 20.02.04.
7. Chernyak S. S., Dementiev V. P., Kozyrev N. A., Voyloshnikov V. D., Vorozhischev V. I., Alekseev N. T., Khomenko A. P., Tuzilina L.V. *Patent RU 2224042 C 22 C 38/58*, 07.10.05.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Петров Владимир Владимирович

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Автоматика и системы управления», ОмГУПС.

Тел.: +7 (3812) 31-05-89.

E-mail: PetrovVV@omgups.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Petrov Vladimir Vladimirovich

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the department «Automation and control systems», OSTU.

Phone: +7 (3812) 31-05-89.

E-mail: PetrovVV@omgups.ru

Ананьева Надежда Геннадьевна

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

Программист кафедры «Автоматика и системы управления», ОмГУПС.

Тел.: +7 (3812) 31-05-89.

E-mail: AnanievaNG@omgups.ru

Окишев Андрей Сергеевич

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

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

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Автоматика и системы управления», ОмГУПС.

Тел.: +7 (3812) 31-05-89.

E-mail: Okishevas@omgups.ru

Anan'eva Nadezda Gennadievna

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx st., Omsk, 644046, the Russian Federation. Programmer of the department «Automation and control systems», OSTU.

Phone: +7 (3812) 31-05-89.

E-mail: AnanievaNG@omgups.ru

Okishev Andrey Sergeevich

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx st., Omsk, 644046, the Russian Federation. Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the department «Automation and control systems», OSTU.

Phone: +7 (3812) 31-05-89.

E-mail: Okishevas@omgups.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Петров, В. В. Композиция математических методов программирования для оптимизации систем видеорегистрации на территориально распределенных объектах железнодорожного транспорта [Текст] / В. В. Петров, Н. Г. Ананьева, А. С. Окишев // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2016. – № 3 (27). – С. 99 – 110.

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Petrov V. V., Anan'eva N. G., Okishev A. S. Composition of the mathematical methods of programming for the optimization of the systems of video registration in the territorially distributed objects of rail transport. Journal of Transsib Railway Studies, 2016, vol. 27, no. 3, pp. 99 – 110. (In Russian).

УДК 625.1

Д. В. Величко, Н. А. Толстикова

Сибирский государственный университет путей сообщения (СГУПС),
г. Новосибирск, Российская Федерация

АНАЛИЗ ЗАГРЯЗНЕННОСТИ ЩЕБЕНОЧНОГО БАЛЛАСТА

Аннотация. Данная статья содержит информацию об основных загрязнителях и засорителях на железной дороге. В статье рассмотрены вопросы интенсивности загрязнения щебеночного балласта. Указаны критерии для назначения среднего и планово-предупредительного ремонта пути в соответствии с техническими условиями. Приведены причины повышенной интенсивности загрязнения балластного слоя в первый год срока эксплуатации. Выполнен анализ загрязненности щебеночного слоя на участках Транссибирской и Среднесибирской магистралей. Транссибирская магистраль рассмотрена в направлении Челябинск – Карбышево – Новосибирск, а Среднесибирская магистраль – в направлении Входная – Иртышская – Среднесибирская. Анализ проводился на основе данных геологических исследований проектно-изыскательских институтов с учетом планов графиков ремонтов по Западно-Сибирской дирекции инфраструктуры. Для удобства оценки параметров загрязненности полученный материал был сведен в единую таблицу. На основе данных таблицы были выявлены степенные зависимости загрязненности щебеночного балласта от толщины балластного слоя, от пропущенного тоннажа и срока службы в годах. В статье приведена структура загрязнителей по величине частиц, в условиях пропуска сверхнормативного тоннажа. Указаны уровни загрязнения щебеночного балласта при различных величинах пропущенного тоннажа (700, 1200 и 1400 млн т). Кроме того, в данной работе был определен средний уровень загрязнения балласта частицами менее 25, 5 и 0,1 мм и получены предельные значения допустимого засорения щебеночного балласта более 30 %. В результате выявлена необходимость в снижении загрязненности щебеночного балласта путем проведения глубокой очистки.

Ключевые слова: щебеночный балласт, загрязнитель, Транссибирская магистраль, Среднесибирская магистраль, пропущенный тоннаж, срок службы эксплуатации.

Dmitry V. Velichko, Natalia A. Tolstikova

Siberian State Transport University (SSTU), Irkutsk, the Russian Federation

ANALYSIS OF CONTAMINATION OF THE CRUSHED STONE BALLAST

Abstract. This article contains information on the main pollutants and weeds on the railway. In the article the questions of the intensity of the contamination of the broken stone ballast. Specified criterion for assigning secondary and preventative maintenance of way in accordance with the technical specifications. Given reasons for the increased intensity of the contamination of the ballast in the first year of life. The analysis contamination of the broken stone layer in areas the Trans-Siberian Railway and the Medium-Siberian Magistral. The Trans-Siberian railway is considered towards Chelyabinsk – Karbysheva – Novosibirsk, the Medium-Siberian Magistral in the direction of the Input – Irtysh – Medium-Siberian. The analysis was conducted based on the data of geological investigations design and survey institutions and to schedules of repairs for the West Siberian infrastructure Directorate. For ease of estimation of the parameters of weeds the resulting material was consolidated into a single table. Based on the table were revealed of the according contamination of crushed stone ballast thickness, ballast layer, from the conceded tonnage and length of operation in years. The article describes the structure of the pollutants by particle size, in terms of pass excess tonnage. Indicated levels of contamination of crushed stone ballast at different values of the missed tonnage (700 million tons 1200 million tons and 1400 million tons). Additionally, this work was determined the average level of contamination of the ballast particles less than 25 mm, 5 mm and 0,1 mm) and obtained a limit value of the allowable clogging the broken stone ballast more than 30 percent. The result revealed the need for reducing the contamination of the broken stone ballast by conducting a deep cleaning.

Keywords: broken stone ballast, contaminant, the Trans-Siberian Railway, the Medium Siberian Magistral, missed tonnage, the term of service of operation.

Одной из стратегических задач, стоящих перед ОАО «РЖД», является оптимизация затрат на содержание и ремонт железнодорожного пути с учетом увеличения межремонтного периода до 1,5 млрд т пропущенного тоннажа. Для решения этой задачи в частности необходимо повышение качества и долговечности элементов верхнего строения пути, в том числе и балластной призмы.

Щебеночный балласт является самым распространенным родом балласта для железных дорог ОАО «РЖД». Для первого и второго классов железнодорожного пути типовым родом балласта является щебень с толщиной слоя не менее 40 см под железобетонными шпалами.

Как известно, необходимость очистки щебня (в рамках среднего и капитального ремонтов пути) обуславливается его загрязнением, которое является причиной потери фильтрационной способности щебеночного слоя и общего расстроя пути.

Загрязнение щебня происходит в результате механического износа его зерен под воздействием подвижной нагрузки и шпалоподбивочных механизмов, а также попадания внешних засорителей. Принято иметь в виду пять основных видов загрязнителей: продукты износа железобетонных шпал; частицы, перемещающиеся вверх из подбалластного гранулированного слоя; частицы, проникающие из земляного полотна; падающие с вагонов частицы перевозимых сыпучих грузов, например песка или угля; продукты дробления и истирания балласта.

При этом наиболее значительно балластный слой загрязняется внешними засорителями [1], что и вызывает необходимость его преждевременной очистки.

В соответствии с техническими условиями [2] основным критерием для выбора участков, подлежащих среднему (таблица 1) и планово-предупредительному ремонтам, является загрязненность щебня.

Таблица 1 – Критерии выбора участков, подлежащих среднему ремонту пути

Класс пути	Основные критерии		Дополнительные критерии	
	загрязненность щебня, % по массе	количество шпал с выплесками, %, более	количество негодных, %, более	
			деревянных шпал	скреплений
1	2	3	4	5
1	30 и более	3	10	12
2	30 и более	5	12	15

Окончание таблицы 1

1	2	3	4	5
3	30	7	15	20
4	30	10	20	30
5	Не лимитируется. Средний ремонт назначается по усмотрению начальника дистанции пути по согласованию с начальником службы пути			

Примечание: загрязненность щебня оценивается в год, предшествующий назначению ремонта пути.

Для щебеночного балласта засорителями считаются фракции 0,1 – 25 мм (I и II категорий по ГОСТ Р 54748-2011 [3], с 2015 г. II категории по ГОСТ Р 7392-2014 [4]), а загрязнителями – фракции менее 0,1 мм, угольные, глинистые и другие примеси. Считается, что загрязнители существенно снижают несущую способность и сопротивляемость сдвигу балластной призмы, тем самым вызывая расстройтва железнодорожного пути.

Рассмотрению подверглись параметры загрязнения щебеночного балласта, частично взятые из данных геологических исследований проектно-изыскательских институтов («Сибжелдорпроект» и «Кемеровжелдорпроект» – филиалы ОАО «Росжелдорпроект») с учетом планов-графиков ремонтов по Западно-Сибирской дирекции инфраструктуры за последние семь лет.

Анализ по Транссибирской магистрали выполнен для 63 участков (на пяти дистанциях пути I и II пути направлений Челябинск – Карбышево и Карбышево – Новосибирск), где фактический срок эксплуатации значительно превышает нормативный (700 млн т) и достигает величин 1100 – 1400 млн т.

Анализ по Среднесибирской магистрали выполнен для девяти участков (на трех дистанциях пути I пути направлений Входная – Иртышское и Иртышское – Среднесибирская) со сроком эксплуатации 840 – 1200 млн т. По причине малого срока эксплуатации анализ загрязненности по II пути Среднесибирской магистрали не выполнялся.

Зависимость загрязненности щебеночного балласта частицами менее 25 мм от пропущенного тоннажа на Транссибирской магистрали в направлении Карбышево – Новосибирск изображена на графиках: рисунок 1 – для первого пути и рисунок 2 – для второго. А зависимость загрязненности балласта частицами менее 25, 5 и 0,1 мм от пропущенного тоннажа (более 700 млн т) на Среднесибирской магистрали для первого пути изображена на рисунке 3.

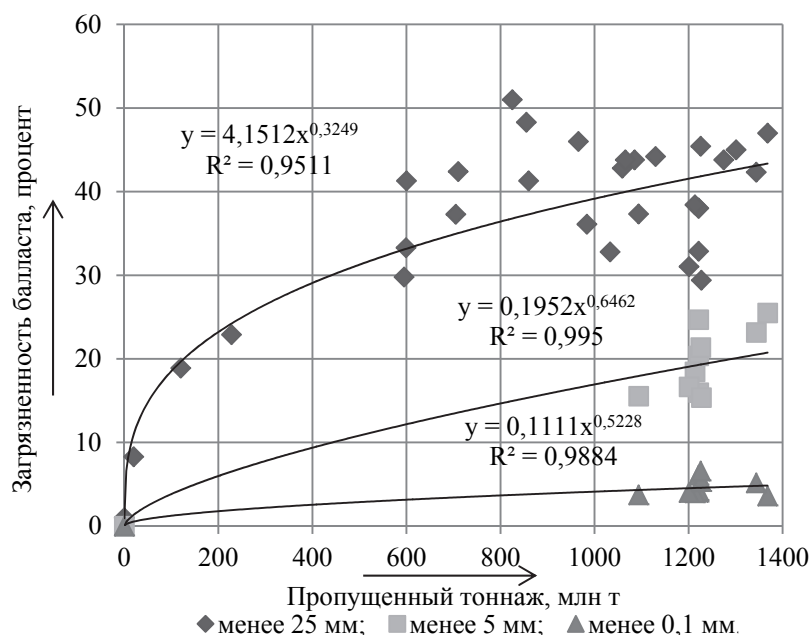


Рисунок 1 – Загрязненность балласта на I пути Транссибирской магистрали

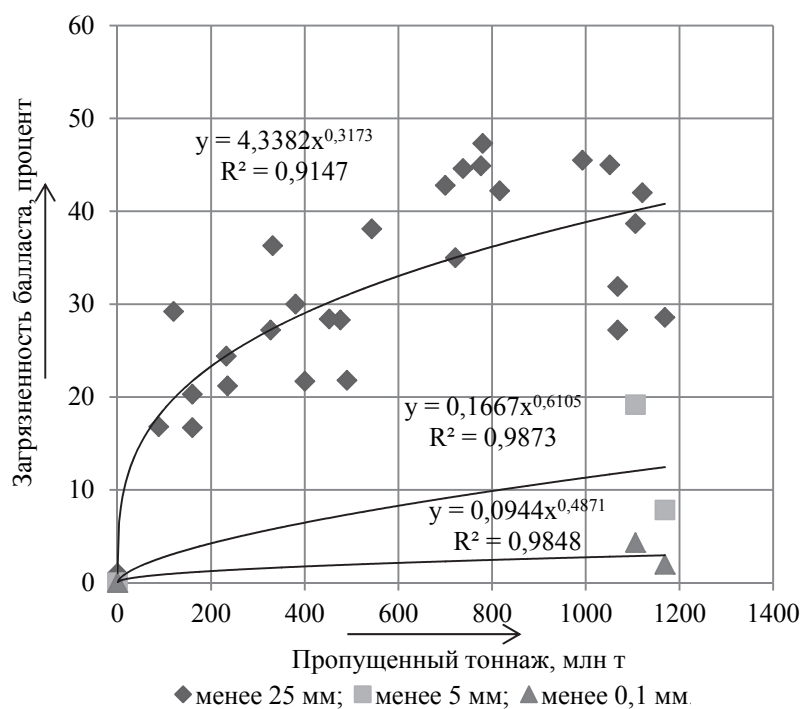


Рисунок 2 – Загрязненность балласта на II пути Транссибирской магистрали

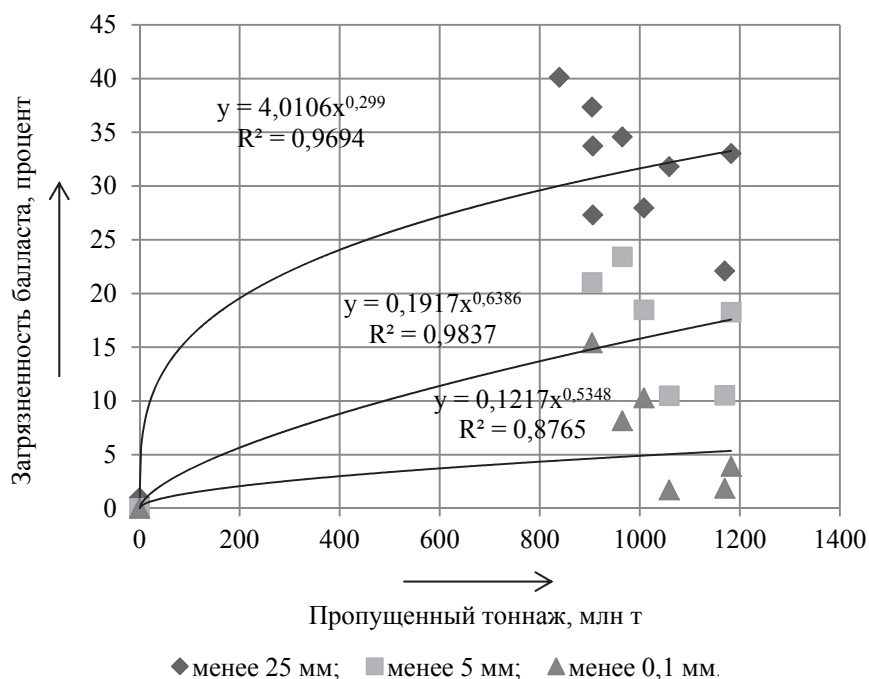


Рисунок 3 – Загрязненность балласта на I пути Среднесибирской магистрали

По полученным данным определена степенная зависимость, параметры которой представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Параметры степенной зависимости

Наименование магистралей	Номер пути	Параметр		
		R^2	k	α
Транссибирская	I	0,95	4,1512	0,3249
	II	0,91	4,3382	0,3173
Среднесибирская	I	0,97	4,0106	0,2990

Загрязненность щебеночного балласта от пропущенного тоннажа определяется по формуле:

$$N = kT^{\alpha},$$

где N – загрязненность щебеночного балласта частицами, %;

k – степенной коэффициент;

T – пропущенный тоннаж, млн. т;

α – показатель степени.

Интенсивность загрязнения балластной призмы во многом определяется сроком службы конструкции, измеренного в годах. Зависимость загрязненности щебеночного балласта от срока службы в годах на Транссибирской магистрали для первого и второго путей и на Среднесибирской магистрали первого пути изображена на рисунке 4.

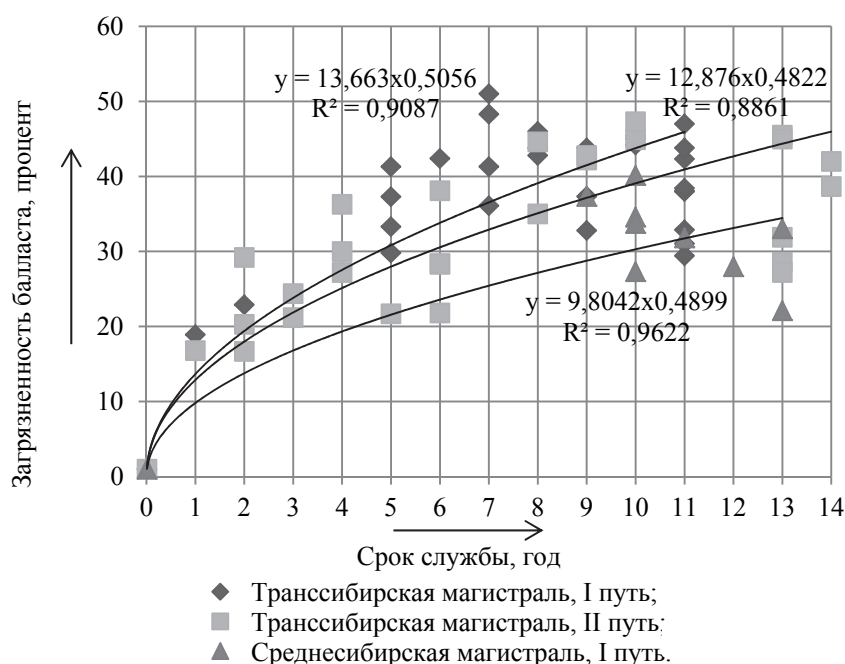


Рисунок 4 – Зависимость загрязненности балласта от срока службы на участках Транссибирской и Среднесибирской магистралей

Первоначальный уровень загрязненности балласта по массе необходимо определять сразу после проведения капитального ремонта пути.

В соответствии со стандартом [3, 4] нормируется минимальная доля фракций размером менее 25 мм, она составляет 5 %.

Значительное увеличение загрязненности щебня по массе в первый год эксплуатации объясняется повышенным изломом зерен щебня под поездной нагрузкой, а также при выполнении выправочных работ во время производства капитального ремонта пути.

Зависимость загрязненности балласта от толщины балластного слоя на Транссибирской магистрали при тоннаже 700 млн т представлена на рисунке 5. Из графика видно, что с увеличением толщины щебеночного балласта происходит уменьшение загрязненности его частиц.

Средний уровень загрязненности щебеночного балласта на участках Транссибирской и Среднесибирской магистралей представлен в таблице 3.

На основании изложенного можно сделать выводы.

На участках Транссибирской и Среднесибирской магистралей к моменту пропуска нормативного тоннажа (700 млн т) определены параметры загрязнения щебеночного балласта. Средний уровень загрязнения балласта частицами менее 25 мм на I пути Транссибирской магистрали составил 35 %, для II пути – 35 %, а на Среднесибирской магистрали – 28 %.

Уровень загрязнения балласта частицами менее 25 мм на Транссибирской магистрали при пропущенном тоннаже от 0 до 200 млн т (в первые два года срока эксплуатации) резко увеличивается. Далее до 1400 млн т идет равномерный рост загрязнения балласта. При достижении величины 700 млн т загрязненность пути порядка 35 %, а при тоннаже 1400 млн т – около 43 %.

Таблица 3 – Средний уровень загрязненности балласта при сверхнормативном тоннаже

Загрязненность щебеночного балласта, процент					
Транссибирская магистраль, I путь		Транссибирская магистраль, II путь		Среднесибирская магистраль, I путь	
диапазон	среднее значение	диапазон	среднее значение	диапазон	среднее значение
загрязненность частиц менее 25 мм					
29 – 47	35,77	17 – 47	32,44	22 – 40	32,00
загрязненность частиц менее 5 мм					
15 – 26	19,33	8 – 19	13,50	11 – 23	17,05
загрязненность частиц менее 0,1 мм					
3 – 7	4,56	2 – 4	3,14	2 – 15	6,89

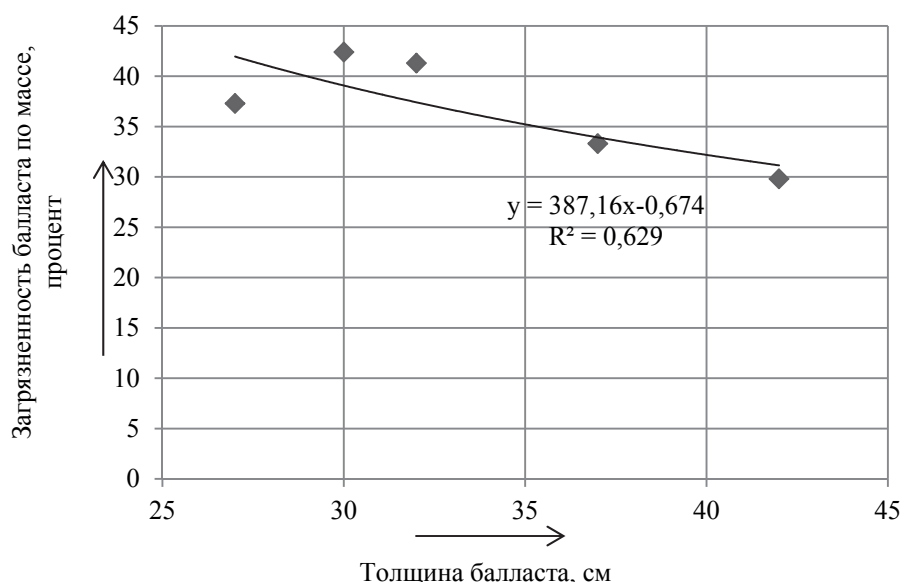


Рисунок 5 – Влияние толщины балласта на его загрязнение для 5 – 6-летнего периода эксплуатации на I пути Транссибирской магистрали

Уровень загрязнения балласта частицами менее 25 мм на Среднесибирской магистрали при тоннаже до 200 млн т резко увеличивается, далее прослеживается равномерный рост загрязнения балласта до величины 1200 млн т. При достижении величины 700 млн т загрязненность пути составляет 28 %, а при пропущенном тоннаже 1200 млн т – около 33 %.

При загрязненности щебеночного балласта частицами менее 5 и 0,1 мм прослеживается равномерный рост загрязненности пути.

Определена структура загрязнителей по величине частиц в условиях пропуска сверхнормативного тоннажа (1200 млн т). На участках I пути Транссибирской магистрали уровень загрязнения частицами от 25 до 5 мм составляет 23 %, от 5 до 0,1 мм – 15 и до 0,1 мм – 4 %, а для II пути уровень загрязнения частицами от 25 до 5 мм составляет 28 %, от 5 до 0,1 мм – 10 % и до 0,1 мм – 4 %.

Структура загрязнителей при сверхнормативном тоннаже на Среднесибирской магистрали от 25 до 5 мм составляет 16 %, от 5 до 0,1 мм – 12 и до 0,1 мм – 6 %.

Получены зависимости величины загрязнения щебеночного балласта от толщины балластного слоя. Выявлены тенденции уменьшения доли частиц до 0,1 мм при увеличении толщины балласта. Загрязненность балласта для 5 – 6-летнего периода эксплуатации на I пути Транссибирской магистрали имеет значение 38 % при толщине балластного слоя 30 см, а при толщине 40 см загрязненность имеет значение в среднем 32 %. При увеличении толщины на 10 см наблюдается снижение загрязненности порядка 15 %.

Предельное значение допустимого засорения щебеночного балласта более 30 % на Транссибирской магистрали возникает при величине пропущенного тоннажа 500 млн т (восемь лет), а на Среднесибирской при значении 800 млн т (10 лет срока эксплуатации), что является ориентиром для проведения ремонтов пути с использованием тяжелых машин для глубокой очистки балласта.

Список литературы

1. 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.
2. Технические условия на работы по реконструкции (модернизации) и ремонту железнодорожного пути [Текст] / ОАО «РЖД»; Центр «Транспорт». – М., 2013. – 236 с.
3. ГОСТ Р 54748-2011. Щебень из плотных горных пород для балластного слоя железнодорожного пути. – М.: Стандартинформ, 2012. – 23 с.
4. ГОСТ 7392-2014. Щебень из плотных горных пород для балластного слоя железнодорожного пути. – М.: Стандартинформ, 2015. – 35 с.

References

1. 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.
2. *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.
3. *Sheben iz plotnih gornih porod dlja ballastnogo sloia zheleznodorozhnogo puti* (Road metal from mountain breeds for ballast layer of railway track) / GOST R 54748-2011. – M.: Standartinform, 2012. – 23 p.
4. *Sheben iz plotnih gornih porod dlja ballastnogo sloia zheleznodorozhnogo puti* (Road metal from mountain breeds for ballast layer of railway track) / GOST 7392-2014. – M.: Standartinform, 2015. – 35 p.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Величко Дмитрий Валерьевич

Сибирский государственный университет путей сообщения (СГУПС).

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

Кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Путь и путевое хозяйство», СГУПС.

Тел.: +7 (383) 328-04-18.

E-mail: vdv.nsk@mail.ru

Толстикова Наталия Андреевна

Сибирский государственный университет путей сообщения (СГУПС).

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

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Velichko Dmitry Valeryevich

Siberian Transport University (SSTU).

191, D. Kovalchuk st., Novosibirsk, 630049, the Russian Federation.

Can. Tech. Scien., associate professor, head of the department «Track and track facilities», SSTU.

Phone: +7 (383) 328-04-18.

E-mail: vdv.nsk@mail.ru

Tolstikova Natalia Andreevna

Siberian Transport University (SSTU).

191, D. Kovalchuk st., Novosibirsk, 630049, the Russian Federation.

Студентка факультета «Строительство железных дорог», СГУПС.
E-mail: natashik2011@inbox.ru

Student of the faculty «Construction of Railways», SSTU.
E-mail: natashik2011@inbox.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Величко, Д. В. Анализ загрязненности щебеночного балласта [Текст] / Д. В. Величко, Н. А. Толстикова // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2016. – № 3 (27). – С. 110 – 117.

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Velichko D. V., Tolstikova N. A. Analysis of contamination of the crushed stone ballast. Journal of Transsib Railway Studies, 2016, vol. 27, no. 3, pp. 110 – 117. (In Russian).

УДК 625.12:624.138

А. Л. Ланис

Сибирский государственный университет путей сообщения (СГУПС),
г. Новосибирск, Российская Федерация

СПОСОБЫ УСИЛЕНИЯ ЗЕМЛЯНОГО ПОЛОТНА ИНЪЕКТИРОВАНИЕМ

Аннотация. В статье рассмотрены способы усиления земляного полотна с использованием инъектирования твердеющих растворов. Предложены технологии, позволяющие выполнять работы по усилению эксплуатируемого земляного полотна без ограничения движения. Представлены оптимальные инженерные условия для проектирования рассмотренных способов. Приведены значения физико-механических характеристик до и после усиления, полученные по результатам контроля качества выполненных работ на реальном объекте. Статья подготовлена в рамках гранта ОАО «РЖД» на развитие научно-педагогических школ в области железнодорожного транспорта.

Армирование грунтов земляного полотна с использованием инъектирования твердеющих растворов вне габарита движения поездов позволяют существенно повысить экономическую эффективность и технологичность в вопросах усиления земляного полотна. В статье предложены оптимальные способы усиления земляного полотна в зависимости стадии развития дефектов и деформаций.

Ключевые слова: земляное полотно, усиление, инъектирование, армирующий каркас, раскатывающий орган, комплексное армирование.

Alexey L. Lanis

Siberian State Transport University (SSTU), Novosibirsk, the Russian Federation

METHODS OF SUBGRADE REINFORCEMENT BY INJECTION

Abstract. The reinforcement of a soil subgrade by solidifying grouts injection, outside the limiting dimensions of train movement, can significantly increase the cost efficiency and manufacturability of strengthening. The paper suggests the most appropriate methods to strengthen the subgrade depending on the stage of defects and deformations development.

Keywords: subgrade, strengthening, injection, reinforcing framework, flaring apertures mechanism, complex reinforcement.

Безопасная эксплуатация железнодорожного пути напрямую связана с состоянием земляного полотна, с достаточностью значений характеристик грунтов, его слагающих. Ошибки при проектировании и возведении, ненадлежащее качество содержания, повышение статических и динамических нагрузок, дополнительное влияние неучтенных природных факторов приводят к снижению несущей способности грунтов, к дефектам и деформациям земляного полотна с дальнейшим его разрушением. Для земляного полотна действующих железных дорог вопросы усиления грунтов имеют большую актуальность, так как позволяют прежде всего обеспечить надежность и безопасность эксплуатации.

Среди технологий усиления земляного полотна, используемых при капитальном ремонте, реконструкции, модернизации железнодорожного пути, следует выделить способы, в основе которых лежит инъектирование в массивы грунта твердеющих растворов [1]. Это направление в мировой практике существует более двухсот лет, инъектирование является оптимальным по экономическим показателям методом усиления грунтов.

Использование инъектирования для усиления земляного полотна железных дорог впервые было использовано в США в 1938 г. на Пенсильванской железной дороге, к 1970 г. этот способ использован уже на 55 участках железных дорог этой страны [2]. На рисунке 1 представлены ликвидация балластных углублений и попутное усиление основной площадки земляного полотна инъекциями цементного раствора на участке железнодорожной линии BNSF в районе г. Канейдиан штата Техас, США (Canadian, TX, USA) [3].

Исследования в области усиления земляного полотна инъектированием в нашей стране выполнены в послевоенное время. Ярким примером таких исследований является выполнение работ по усилению двенадцатиметровой насыпи на железной дороге вблизи г. Казани для укрепления откосов инъектированием цементных растворов. Руководителем работ являлся Д. В. Волоцкий (Казанский государственный архитектурно-строительный университет – КГАСУ).



Рисунок 1 – Усиление земляного полотна инъектированием (США) [3]

Исследования, связанные с особенностями использования инъектирования твердеющих растворов для усиления грунтов земляного полотна, выполняются в Сибирском государственном университете путей сообщения в течение более чем 20 лет. Разработаны, запатентованы, внедрены способы усиления грунтов земляного полотна в зависимости от исходных параметров, являющиеся модификациями метода напорной инъекции.

Согласно статистическим данным более 40 % деформаций земляного полотна относится к основной площадке, большинство из которых так или иначе связано с балластными углублениями, развитие которых в свою очередь имеет прямую зависимость с нарушением влажностного режима грунтов. Чаще всего это можно наблюдать в тех случаях, когда в основании балластной призмы залегают загрязненные балластные материалы, откосы и обочины загромождены балластными шлейфами, заилены водоотводные канавы и т. д. В такой ситуации влага, содержащаяся в загрязненных материалах, насыщает грунт. Естественным следствием этого процесса является снижение прочностных характеристик грунта. Выполнение «внешних» мероприятий по приведению пути к необходимым геометрическим параметрам – усиление основания балластного слоя, устройство системы дренирования воды – не решает проблемы дефектности земляного полотна, связанной с существованием зон, полостей с пониженными значениями физико-механических характеристик. При увеличении осевых и погонных нагрузок возможна деформация железнодорожного пути.

Решением рассмотренной проблемы является одновременное удаление влаги и заполнение образующихся полостей твердеющим раствором. Этот способ ремонта земляного полотна на железных дорогах разработан учеными СГУПС и защищен патентом Российской Федерации № 2277616 [4]. Указанный способ включает в себя изготовление дренажных скважин и осушение земляного полотна путем выдавливания воды из его полостей путем направленного нагнетания твердеющего раствора. В результате происходит образование массивов затвердевшего раствора с уплотнением окружающего грунта (рисунок 2).

При введении тяжеловесного движения возможно снижение устойчивости насыпей. Более того, в связи с возрастанием нагрузок на основную площадку даже при стабильном при старых нагрузках земляном полотне снижается устойчивость насыпи, что автоматически приводит к дефектам и деформации откосов насыпи: спывам и оползням. Рассмотренный выше способ позволяет предотвратить причину деформирования основной площадки и возникновения спывов и оползания откосов, в случае же, когда уже происходит деформирование откосов, эффективность способа существенно уменьшается. В рамках сотрудничества с ОАО «РЖД» были разработаны способ усиления земляного полотна и методика проектирования и реализации его на объектах.

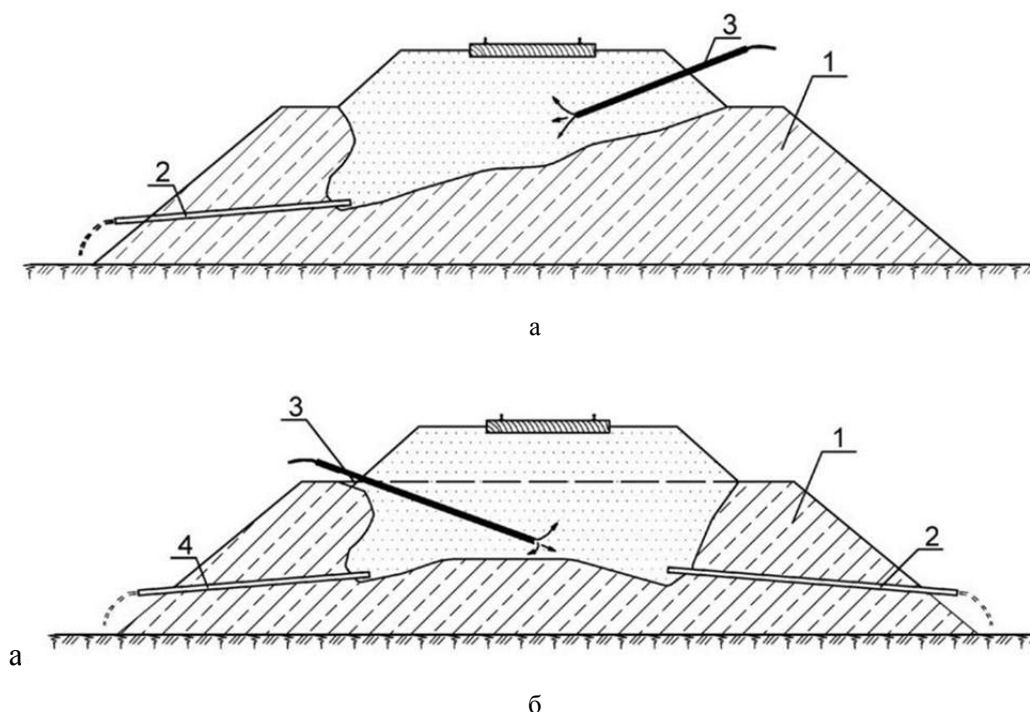


Рисунок 2 – Способ ремонта земляного полотна:
1 – земляное полотно; 2 и 4 – дренажные скважины; 3 – иньектор

Сущность предлагаемого способа [5] заключается в создании в теле земляного полотна объемного многоэлементного армирования с попутным удалением излишней влаги. Объемный арматурный каркас создается системой армирующих элементов (сеток), пересекающихся в разных уровнях с последующей иньекцией в узлы их пересечения связующего раствора. Таким образом, в грунтовом массиве образуется жесткий несущий каркас с затвердевшим раствором и уплотненным окружающим грунтом, обладающий высокими значениями физико-механических характеристик. Армирующие элементы обеспечивают восприятие повышенных сжимающих и растягивающих напряжений и являются анкерными при необходимости удержания откосов. При этом вся объемная многоэлементная система, включаясь в работу, обеспечивает существенное снижение осадок рабочей зоны и повышение устойчивости откосов земляного полотна.

Рассмотренная технология является достаточно универсальной и позволяет выполнять как локальное, так и сплошное упрочнение ослабленных зон с недостаточным уплотнением и

высокой влажностью (рисунок 3). Расчетно-теоретические исследования позволили выявить минимально допустимые значения механических характеристик окружающих грунтов для возможности крепления откосов многоэлементным армированием (модуль деформации E – не менее 11 МПа, удельное сцепление грунта c – не менее 0,012 МПа, угол внутреннего трения φ – не менее 18°). Если грунты обладают более низкими характеристиками, используется дополнительная проработка их инъекционными составами. Таким образом, разработаны методики крепления откосов многоэлементным армированием (рисунок 4), комплексного армирования земляного полотна с использованием напорного инъектирования.

Для увеличения сроков эксплуатации выполняемого усиления рекомендуется рассмотреть возможность использования арматуры, изготовленной из композитных материалов. При этом вместо металлических инъекторов возможно применение стеклопластиковых труб, обладающих теми же преимуществами, что и стеклопластиковая арматура.

Для создания элементов закрепленного грунта рекомендуется использовать один из известных методов инъекционного закрепления грунта, выбор которого зависит от конкретных грунтовых условий земляного полотна. Инъектированию твердеющего раствора должен предшествовать монтаж армирующих элементов. В противном случае нагнетание раствора может спровоцировать начало деформаций откосной части. Рецептура, концентрация, объем инъекции растворов, рабочее давление, критерии отказа, методы операционного контроля и диагностики качества закрепления рассматриваются в проектной документации на основании разработанных методик.

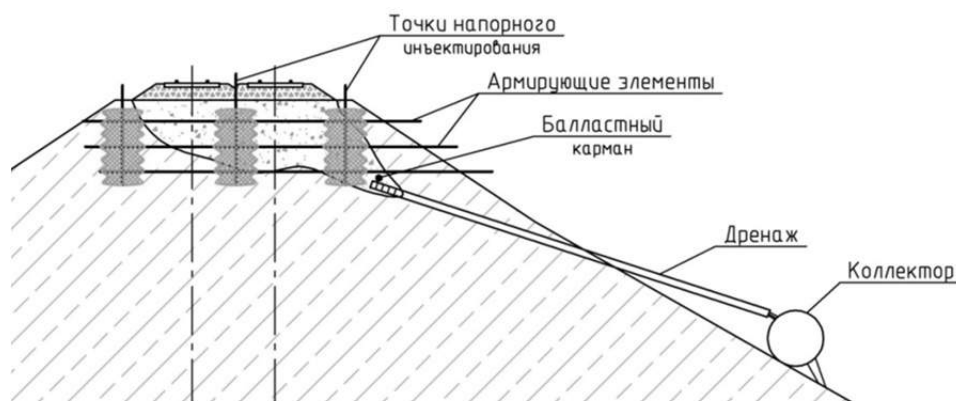


Рисунок 3 – Способ многоэлементного армирования

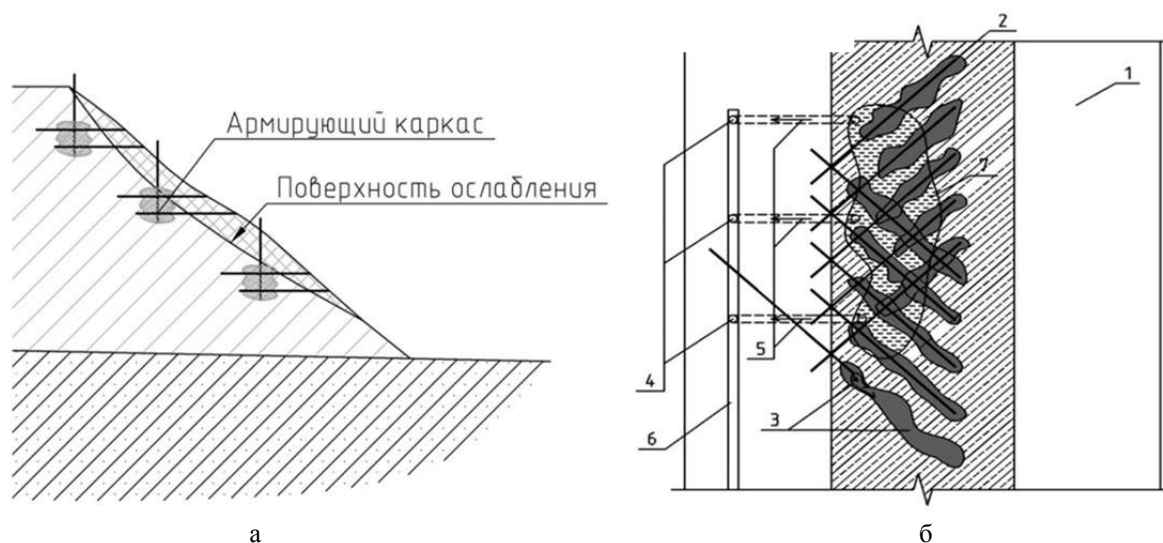


Рисунок 4 – Способ многоэлементного армирования: а – крепление откоса; б – вид сверху;
 1 – земляное полотно; 2 – армирующие анкерные элементы; 3 – твердеющий раствор; 4 – дрена;
 5 – удаление воды; 6 – водосборный коллектор; 7 – обводненная зона

Экспериментально-теоретические исследования подтвердили более высокую эффективность использования сеток из армирующих элементов по сравнению со стержнями, при этом использование армирующих каркасов существенно повышает деформационные характеристики слоев армирования.

На основе комплексного армирования разработано решение и для слабых оснований земляного полотна. Повышение прочностных и деформационных характеристик осуществляется путем погружения раскатывающего органа (рисунок 5), а образующаяся скважина заполняется твердеющим раствором, который подается через рабочий орган при его реверсивном ходе (патент РФ 147223 [6]). Усиление грунтов происходит за счет создания композитной структуры из уплотненных грунтов и более прочных элементов из затвердевшего инъецируемого раствора. При внедрении раскатывающего рабочего органа происходит последовательное послойное уплотнение окружающих грунтов от его оси к периферии. При этом в отличие от бурения выемки грунта из скважин не происходит. Грунт скважины втрамбовывается в стенки, в результате происходит уплотнение окружающего грунта до двух диаметров раскатчика, а возможность инъецирования твердеющего раствора через раскатывающее устройство позволяет существенно расширить границы использования способа и увеличить пределы значений физико-механических характеристик укрепляемых грунтов. Следует отметить также возможность использования способа для создания как вертикальных, так и наклонных скважин [7].

С научно-практической точки зрения интерес представляют результаты выполняемых работ, в данном случае значения физико-механических характеристик грунтов после усиления. К настоящему времени накоплен большой материал как по специально выполненным экспериментальным исследованиям, так и по результатам контроля качества, выполняемого на каждом объекте усиления. На рисунке 6 представлен шурф, выполненный при контроле качества на объекте 88 км линии Алтайская – Артышта Западно-Сибирской железной дороги. Отчетливо видны прослои затвердевшего раствора и уплотненного окружающего грунта. В таблице представлены нормативные значения физико-механических характеристик грунтов, усиленных напорной инъецией на экспериментальном полигоне. Модули деформаций получены штамповыми испытаниями, прочностные характеристики – методом консолидированного среза цилиндров диаметром 400 мм в соответствии с требованиями ГОСТ 20276-99.

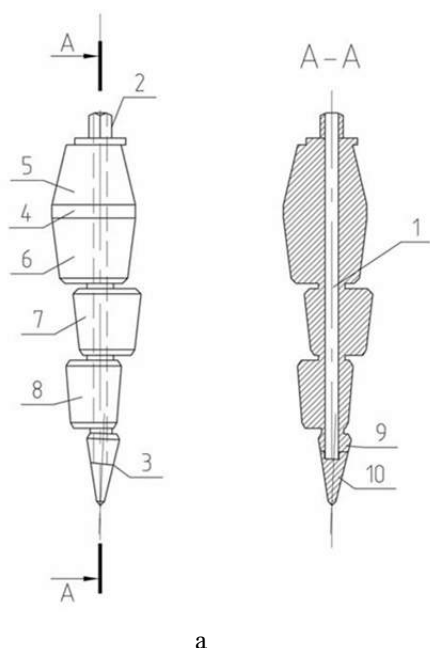


Рисунок 5 – Схема раскатывающего рабочего органа (патент РФ 147223):

1 – полый вал для инъецирования твердеющего раствора; 2 – хвостовик; 3 – наконечник;
4 – 8 – элементы, выполненные с эксцентриситетом; 9, 10 – хвостовая и головная части наконечника

Спустя месяц после выполнения работ по инъектированию твердеющего раствора в грунты земляного полотна и его основания проведены полевые исследования свойств упрочненного массива динамическим зондированием, штамповыми испытаниями, методом консолидированного среза целиков диаметром 400 мм в соответствии с требованиями ГОСТ 20276-99.

Частный случай усиления грунтов земляного полотна и основания напорной инъекцией представлен в таблице. Результаты усиления зависят от множества факторов: от инженерно-геологических условий, от технологии, используемого оборудования, от проектных решений и др. Следует отметить также существенное увеличение сцепления грунтов (прочность, устойчивость), увеличение модуля деформаций и модуля упругости (деформации, осадки) и в меньшей степени увеличение угла внутреннего трения.



Рисунок 6 – Вид контрольного шурфа

Нормативные характеристики усиленных грунтов

Слой грунтов	Модуль деформации E , МПа	Модуль упругости $E_{упр}$, МПа	Удельное сцепление c , кПа	Угол внутрен- него трения ϕ , град.
Насыпь до усиления	13	39	20	20,1
Насыпь после усиления	34	99	42	25,3
Основание до усиления	3,4	17	0	14,5
Основание после усиления	18	57	34	27,2

Использование многоэлементного армирования повышает степень увеличения характеристик, так как в работу включается армирующий каркас. Предложенные технологии позволяют использовать недорогое и доступное оборудование и выполнять работы без ограничения движения и с учетом расчета экономической эффективности могут быть рекомендованы для усиления земляного полотна железнодорожного пути и основания.

Список литературы

1. Ланис, А. Л. Применение метода напорной инъекции для усиления насыпей [Текст] / А. Л. Ланис // Путь и путевое хозяйство / ОАО «Российские железные дороги». – М., 2009. – № 6. – С. 33 – 35.

2. Грушевой, Н. Г. Земляное полотно зарубежных железных дорог [Текст] / Н. Г. Грушевой. – М.: Трансжелдориздат, 1961. – 138 с.

3. <http://www.haywardbaker.com/WhatWeDo/Applications/SubgradeStabilization/default.aspx>.

4. Пат. № 2277616 Российская Федерация, МПК E 02 D 3/12, E 01 B 1/00. Способ ремонта железнодорожного земляного полотна [Текст] / М. Я. Крицкий, А. Л. Ланис, В. Ф. Скоркин; заявитель и патентообладатель Сибирский гос. ун-т путей сообщения. – № 2004122283/03; заявл. 19.07.2004; опубл. 10.06.2006, Бюл. № 16.

5. Пат. № 2012112721 Российская Федерация, МПК E 02 D 17/20. Способ укрепления откосов земляного полотна [Текст] / А. Л. Ланис, В. Ф. Скоркин, С. А. Овчинников; заявитель и патентообладатель Сибирский гос. ун-т путей сообщения. – № 2012112721/03; заявл. 02.04.2012; опубл. 10.10.2013, Бюл. № 28.

6. Пат. № 147223 Российская Федерация, МПК E 02 F 5/16 Раскатчик для изготовления вертикальных и наклонных скважин [Текст] / А. Л. Ланис, П. О. Ломов, В. Ф. Скоркин; заявитель и патентообладатель Сибирский гос. ун-т путей сообщения. – № 2014116920/03; заявл. 25.04.2014; опубл. 27.10.2014, Бюл. № 30.

7. Ланис, А. Л. К вопросу определения грунтовых параметров, оказывающих влияние на диаметр раскатанной скважины [Текст] / Ланис А. Л., Ломов П. О. // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока / Новосибирская гос. академия водного трансп. – Новосибирск. – 2015. – № 3. – С. 92 – 97.

References

1. Lanis A. L. Applying pressure injection method for the amplification embankments [Primenenie metoda napornoj in'ektsii dlia usileniia nasypei]. *Put' i putevye khoziaistvo – Path and track facilities*, 2009, no. 6, pp. 33 – 35.

2. Grushevoi N. G. *Zemlianoie polotno zarubezhnykh zheleznnykh dorog* (Subgrade foreign railways). Moscow: Transzheldorizdat, 1961, 138 p.

3. <http://www.haywardbaker.com/WhatWeDo/Applications/SubgradeStabilization/default.aspx>.

4. Kritskii M.Ia., Lanis A.L., Skorkin V.F. *Patent RU 2277616 E 02 D 3/12, E 01 B 1/00*, 10.06.2006.

5. Lanis A. L., Skorkin V. F., Ovchinnikov S. A. *Patent RU 2012112721 E02D 17/20*, 10.10.2013.

6. Lanis A. L., Lomov P. O., Skorkin V. F. *Patent RU 147223 E 02 F 5/16*, 27.10.2014.

7. Lanis A.L., Lomov P.O. On the question of determining groundwater parameters affecting the diameter of the rolled wells [K voprosu opredeleniia gruntovykh parametrov, okazyvaiushchikh vliianie na diametr raskatannoi skvazhiny]. *Nauchnye problemy transporta Sibiri i Dal'nego Vos-toka – Scientific problems of transportation in Siberia and the Far East*, 2015, no. 3, pp. 92 – 97.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Ланис Алексей Леонидович

Сибирский государственный университет путей сообщения (СГУПС).

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

Начальник Управления научно-исследовательских работ, кандидат технических наук, доцент кафедры «Геология, основания и фундаменты», СГУПС.

Тел.: +7 (383) 328-04-55.

E-mail: lanisal@stu.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Lanis Alexey Leonidovich

Siberian Transport University (SSTU).

191, D. Kovalchuk st., Novosibirsk, 630049, the Russian Federation.

The Head of Scientific Research Office, PhD in Engineering, Associate Professor of Geology and Foundation Engineering Department, SSTU.

Phone: +7 (383) 328-04-55.

E-mail: lanisal@stu.ru

Ланис, А. Л. Способы усиления земляного полотна инъектированием [Текст] / А. Л. Ланис // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2016. – № 3 (27). – С. 117 – 124.

Lanis A. L. Methods of subgrade reinforcement by injection. Journal of Transsib Railway Studies, 2016, vol. 27, no. 3, pp. 117 – 124. (In Russian).

УДК 656.259.1

М. М. Соколов

Югорский государственный университет, г. Ханты-Мансийск, Российская Федерация

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ОБСЛУЖИВАНИЯ СТАНЦИОННЫХ РЕЛЬСОВЫХ ЦЕПЕЙ

Аннотация. В статье рассматривается процесс технического обслуживания устройств железнодорожной автоматики. Целью работы является предложение способа снижения трудозатрат на обслуживание рельсовых цепей железнодорожной автоматики. Предлагаются метод автоматизации процесса проверки рельсовых цепей на шунтовую чувствительность путем шунтирования рельсовой цепи на кроссовом стативе и схема устройства, реализующего этот метод. Рассчитаны значения сопротивления шунтирования, эквивалентного наложению нормативного шунта в заданных точках рельсовой цепи. Результаты применения разработанного метода, приведенные в статье, могут быть использованы при совершенствовании систем автоматики действующих железных дорог.

Ключевые слова: рельсовая цепь, устройства автоматики, автоматизация, техническое обслуживание.

Maxim M. Sokolov

Yugra State University (YSU), Khanty-Mansiysk, the Russian Federation

REDUCING THE TIME MAINTENANCE OF STATION TRACK CIRCUITS OF RAILWAY AUTOMATION

Abstract. This article discusses the process of maintenance of railway automation devices. The aim of the work is to reduce labor costs for maintenance of track circuits of railway automation. Presents the method for automating the process of checking on the shunt track circuits shunting sensitivity of track circuit by at cross-rack and scheme of the device that implements this method. The values of shunt resistance equivalent to the imposition of regulatory shunt at predetermined points of the track circuit are calculated. The results obtained in the paper can be used for the improvement of systems of automation of existing railways.

Keywords: track circuit, automatic devises of railroad, automation, maintenance.

Наряду с разработкой и внедрением микропроцессорных устройств и систем диагностики (создание современного малообслуживаемого напольного оборудования ЖАТ) одной из стратегических задач хозяйства автоматики и телемеханики является организация производства с применением современных материалов и ресурсосберегающих технологий. Использование такого оборудования позволит изменить технологию технического обслуживания и ремонта устройств СЦБ. Конечной целью всех разработок должно быть снижение эксплуатационных затрат, переход сначала к малообслуживаемым устройствам, а в перспективе – к устройствам, не требующим периодического технического обслуживания при условии сохранения требований по обеспечению безопасности движения в течение всего срока эксплуатации [1].

Одним из основных объектов внедрения современных материалов и технологий является напольное оборудование автоматики и телемеханики, в состав которого входит аппаратура рельсовых цепей (РЦ).

Одним из основных видов технического обслуживания рельсовых цепей является работа «Проверка станционных рельсовых цепей на шунтовую чувствительность двухниточных рельсовых цепей неразветвленных и разветвленных, параллельные ответвления которых контролируются путевыми реле». Работа входит в четырехнедельный план-график с периодичностью один раз в четыре недели. Шунтовую чувствительность рельсовых цепей на станции проверяют электромеханик и электромонтер. Наложение шунта ШУ-01м на каждую рельсовую цепь электромеханик согласовывает с дежурным по станции, используя имеющиеся в наличии средства связи. Шунт ШУ-01м накладывают на релейном и питающем концах рельсовой цепи [2].

Проанализируем возможность сокращения трудозатрат на техническое обслуживание на примере рельсовых цепей переменного тока частотой 25 Гц с фазочувствительными реле типа ДСШ-13А при электротяге постоянного тока (рисунок 1).

Рельсовая цепь содержит постовое оборудование, включающее в себя блоки аппаратуры питающего и релейного концов, путевое реле и напольное оборудование, состоящее из дроссель-трансформатора питающего конца, рельсовой линии, дроссель-трансформатора релейного конца. Рельсовая цепь отделена от соседних рельсовых цепей изолирующими стыками [3].

Автором предлагается осуществлять проверку рельсовых цепей на шунтовую чувствительность путем подключения такого сопротивления на кроссовом стативе постовой аппаратуры питающего (точки «а» и «б») и релейного (точки «с» и «д») концов рельсовой цепи, которое будет соответствовать наложению нормативного шунта (0,06 Ом) на питающий и релейный концы рельсовой линии соответственно.

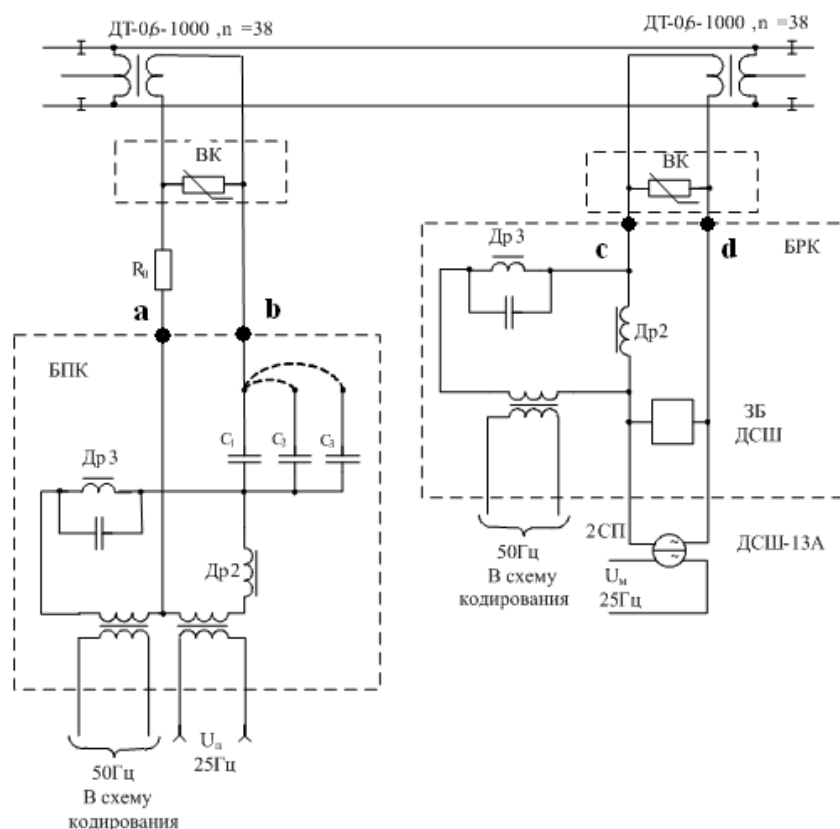


Рисунок 1 – Схема рельсовой цепи переменного тока частотой 25 Гц с фазочувствительными реле типа ДСШ-13А при электротяге постоянного тока

Произведем расчет сопротивлений между точками «а» и «б» (см. рисунок 1), эквивалентных наложению нормативного шунта в начале и в конце рельсовой линии. Этот блок находится на кроссовых стативах питающего и релейного концов. При проверке РЦ на шунтовую чувствительность необходимо зашунтировать РЦ таким сопротивлением, которое

суммарно с сопротивлением рельсовой цепи в нормальном режиме давало бы сопротивление рельсовой цепи в шунтовом режиме на питающем конце. Аналогично для шунта на релейном конце. Для расчета составим схему замещения РЦ (рисунок 2).

Схема замещения содержит [3]:

- питающий трансформатор (ПТ);
- реактор РОБС-3А;
- конденсатор С1;
- ограничительное сопротивление R_o ;
- дроссель-трансформатор питающего конца ДТ-0,6-1000;
- дроссель-трансформатор релейного конца ДТ-0,6-1000;
- сопротивление соединительных проводов $R_{ср}$;
- сопротивление кабеля R_k ;
- защитный блок ЗБ-ДСШ;
- путевое реле Z_p ;
- сопротивление блока шунтирования, эквивалентное наложению нормативного шунта 6 Ом) в начале рельсовой линии $R_{шп}$;
- сопротивление блока шунтирования, эквивалентное наложению нормативного шунта 6 Ом в конце рельсовой линии $R_{шр}$.

Исходные данные, необходимые для расчета:

- длина рельсовой цепи $L = 1,2$ км;
- удельное сопротивление рельсов на частоте 25 Гц $Z = 0,5 \cdot e^{j52^\circ}$ Ом/км;
- удельное сопротивление изоляции для двухниточной рельсовой цепи $r_{из} = 1$ Ом·км;
- напряжение полного подъема сектора путевого реле ДСШ-13А $U_p = 12 \cdot e^{j72^\circ}$ В;
- ток срабатывания путевого реле ДСШ-13А $I_p = 0,03$ А;
- сопротивление путевого реле Дсш-13А $Z_p = 405 \cdot e^{j72^\circ}$ Ом;
- ограничительное сопротивление $R_o = 50$ Ом;
- сопротивление нормативного шунта $R_{ш} = 0,06$ Ом;
- сопротивление кабеля $R_k = 150$ Ом;
- сопротивление соединительных проводов $R_{ср} = 0,5$ Ом;
- конденсатор С1- 10 мкФ;
- сопротивление реактора типа РОБС-3А $Z_{РОБС} = 45e^{j81^\circ}$ Ом;
- сопротивление защитного блока ЗБ-ДСШ $Z_{3,б} = 407e^{-j88^\circ}$ Ом;
- коэффициенты четырехполюсника питающего трансформатора

$$\begin{pmatrix} A_{\text{ПТ}} & B_{\text{ПТ}} \\ C_{\text{ПТ}} & D_{\text{ПТ}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0,25e^{j0} & 5,4e^{j20} \\ 0,0025e^{-j70} & 5e^{j0} \end{pmatrix}; \quad (1)$$

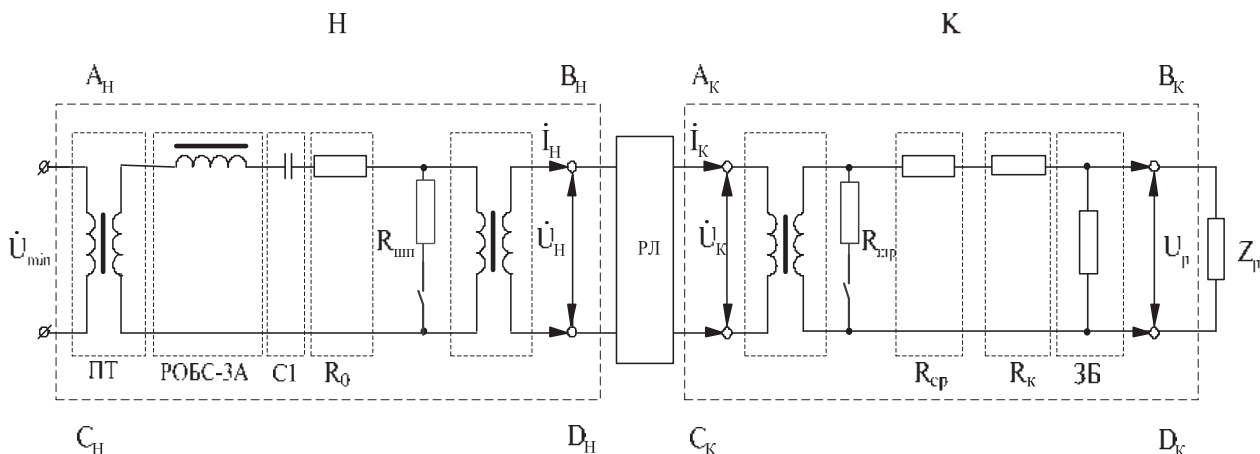


Рисунок 2 – Схема замещения рельсовой цепи

– коэффициенты четырехполюсника ДТ-0,6-1000 с коэффициентом трансформации питающего конца 38

$$\begin{pmatrix} A_{\text{ДТ1}} & B_{\text{ДТ1}} \\ C_{\text{ДТ1}} & D_{\text{ДТ1}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 39,5e^{-j2} & 0,2075e^{j60} \\ 0,084e^{-j83} & 0,0296e^{-j4} \end{pmatrix}; \quad (2)$$

– коэффициенты четырехполюсника ДТ-0,6-1000 с коэффициентом трансформации рельсового конца 38

$$\begin{pmatrix} A_{\text{ДТ2}} & B_{\text{ДТ2}} \\ C_{\text{ДТ2}} & D_{\text{ДТ2}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0,0296e^{-j4} & 0,2075e^{j60} \\ 0,084e^{-j83} & 39,5e^{-j2} \end{pmatrix}. \quad (3)$$

Коэффициенты рельсового четырехполюсника определяют по формуле:

$$\begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \text{ch}(\gamma l) & Z_B \text{sh}(\gamma l) \\ \frac{\text{sh}(\gamma l)}{Z_B} & \text{ch}(\gamma l) \end{pmatrix}, \quad (4)$$

где l – длина рельсовой линии;

γ – коэффициент распространения;

Z_B – волновое сопротивление.

Коэффициент распространения определяют по выражению:

$$\gamma = \sqrt{\frac{Z}{r_{\text{из}}}} = \sqrt{\frac{0,5 \cdot e^{j52^\circ}}{1}}; \quad (5)$$

$$\gamma = 0,707e^{j26} \text{ 1/км.}$$

Волновое сопротивление

$$Z_B = \sqrt{Z \cdot r_{\text{из}}}; \quad (6)$$

$$Z_B = 0,707e^{j26} \text{ Ом.}$$

Коэффициенты рельсового четырехполюсника

$$\begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \text{ch}(\gamma l) & Z_B \text{sh}(\gamma l) \\ \frac{\text{sh}(\gamma l)}{Z_B} & \text{ch}(\gamma l) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1,254e^{j14,075} & 0,646e^{j57,261} \\ 1,293e^{j5,261} & 1,254e^{j14,075} \end{pmatrix}. \quad (7)$$

Необходимо определить сопротивление всей рельсовой цепи при свободном состоянии. Для этого перемножим четырехполюсники, входящие в схему замещения после кроссового статива питающего конца.

Коэффициенты четырехполюсника РЦ в нормальном режиме:

$$\begin{pmatrix} A_{\text{н}} & B_{\text{н}} \\ C_{\text{н}} & D_{\text{н}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A_{\text{ДТ1}} & B_{\text{ДТ1}} \\ C_{\text{ДТ1}} & D_{\text{ДТ1}} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} \cdot \dots \cdot \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 1/Z_{36} & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 1/Z_p & 1 \end{pmatrix}; \quad (8)$$

$$\begin{pmatrix} A_{\text{н}} & B_{\text{н}} \\ C_{\text{н}} & D_{\text{н}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 3,828e^{j43,746} & 1323e^{j32,397} \\ 0,012e^{-j19,83} & 4,296e^{-j33,066} \end{pmatrix}. \quad (9)$$

Сопротивление всей рельсовой цепи в нормальном режиме

$$Z_{\text{РЦ}} = A_{\text{н}} / C_{\text{н}} = 3,828e^{j43,746} / 0,012e^{-j19,83}; \quad (10)$$

$$Z_{\text{РЦ}} = 332,814e^{j63,576} \text{ Ом.}$$

Для того чтобы найти сопротивление РЦ при наложении шунта в начале рельсовой линии, перемножим четырехполюсники, входящие в схему замещения после кроссового статива питающего конца, включая четырехполюсник нормативного шунта:

$$\begin{pmatrix} A_{\text{шп}} & B_{\text{шп}} \\ C_{\text{шп}} & D_{\text{шп}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A_{\text{ДТ1}} & B_{\text{ДТ1}} \\ C_{\text{ДТ1}} & D_{\text{ДТ1}} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 1/R_{\text{ш}} & 1 \end{pmatrix} \cdot \dots \cdot \begin{pmatrix} 1 & R_k \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 1/Z_{36} & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 1/Z_p & 1 \end{pmatrix}; \quad (11)$$

$$\begin{pmatrix} A_{\text{шп}} & B_{\text{шп}} \\ C_{\text{шп}} & D_{\text{шп}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 3,996e^{j47,953} & 1381e^{j36,599} \\ 0,054e^{j30,705} & 18,718e^{j18,352} \end{pmatrix}. \quad (12)$$

Сопротивление всей РЦ при наложение шунта в начале рельсовой линии

$$Z_{\text{шп}} = A_{\text{шп}} / C_{\text{шп}} = 3,996e^{j47,953} / 0,054e^{j30,705}; \quad (13)$$

$$Z_{\text{шп}} = 74,073e^{j17,248} \text{ Ом.}$$

Сопротивление шунтирования на кроссе питающего конца должно быть таким, которое суммарно с сопротивлением РЦ в нормальном режиме давало бы сопротивление рельсовой цепи в шунтовом режиме на питающем конце (рисунок 3):

$$Z_{\text{шп}} = \frac{Z_{\text{РЦ}} \cdot R_{\text{шп}}}{Z_{\text{РЦ}} + R_{\text{шп}}} \quad (14)$$

Выразим из уравнения (14) $R_{\text{шп}}$:

$$R_{\text{шп}} = \frac{Z_{\text{шп}} \cdot Z_{\text{РЦ}}}{Z_{\text{РЦ}} - Z_{\text{шп}}} = \frac{74,073e^{j17,248} \cdot 332,814e^{j63,576}}{332,814e^{j63,576} - 74,073e^{j17,248}}; \quad (15)$$

$$R_{\text{шп}} = 85,982e^{j6,478} \text{ Ом.}$$

Аналогичным образом получим значение сопротивления шунтирования на кроссе релейного конца:

$$R_{\text{шр}} = \frac{Z_{\text{шр}} \cdot Z_{\text{РЦ}}}{Z_{\text{РЦ}} - Z_{\text{шр}}} = \frac{74,261e^{j18,53} \cdot 332,814e^{j63,576}}{332,814e^{j63,576} - 74,261e^{j18,53}}; \quad (16)$$

$$R_{\text{шр}} = 86,649e^{j6,478} \text{ Ом.}$$

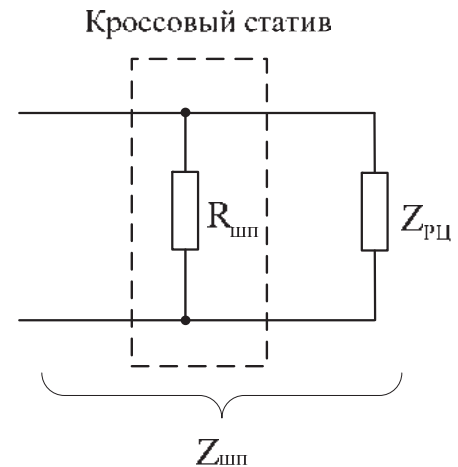


Рисунок 3 – Сопротивление блока шунтирования на кроссе питающего конца

По результатам расчетов видно, что сопротивление блока шунтирования является комплексным числом. На рисунках 4 – 7 приведены графики зависимости модуля и угла комплексного сопротивления шунтирования от сопротивления изоляции и длины рельсовой линии.

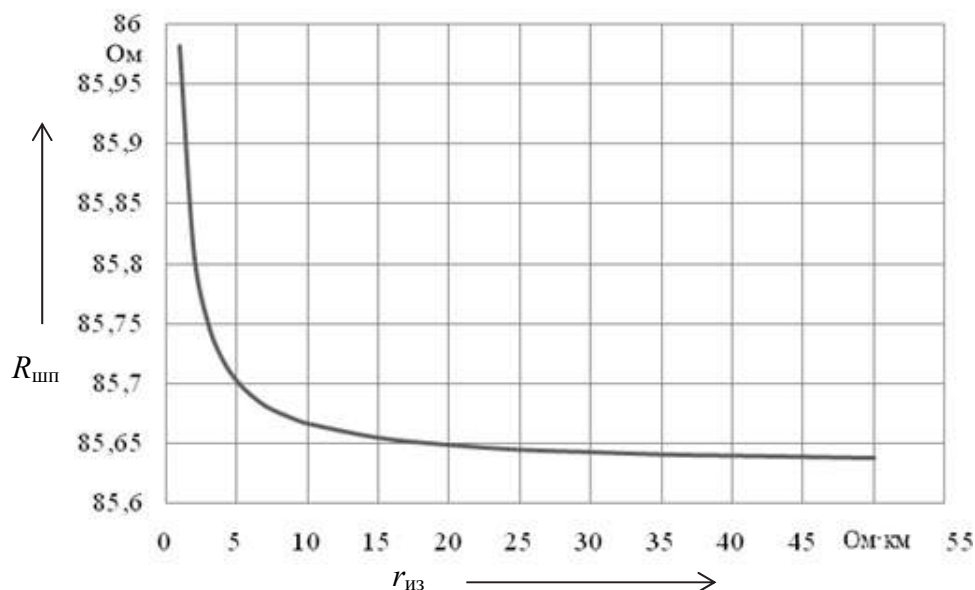


Рисунок 4 – График зависимости модуля сопротивления шунтирования от сопротивления изоляции

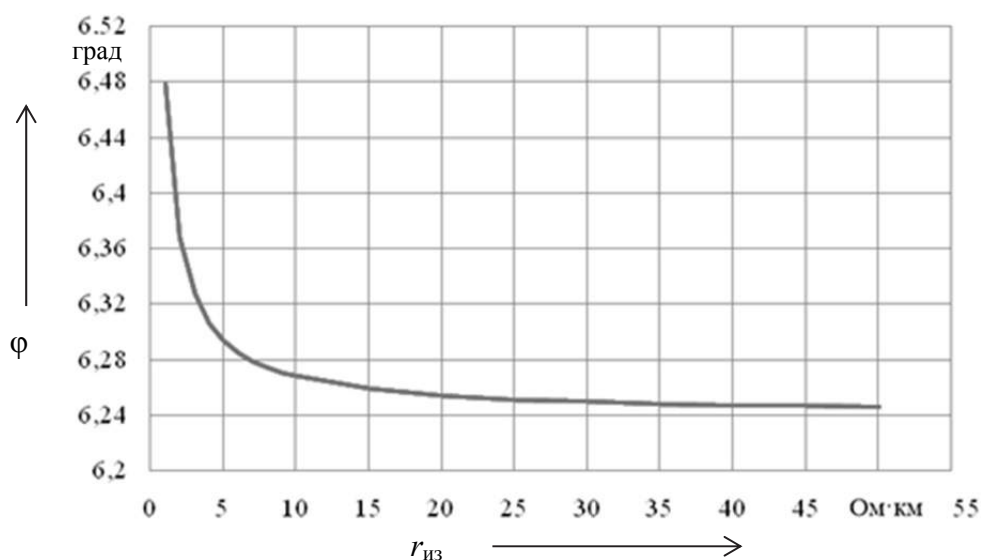


Рисунок 5 – График зависимости угла сопротивления шунтирования от сопротивления изоляции

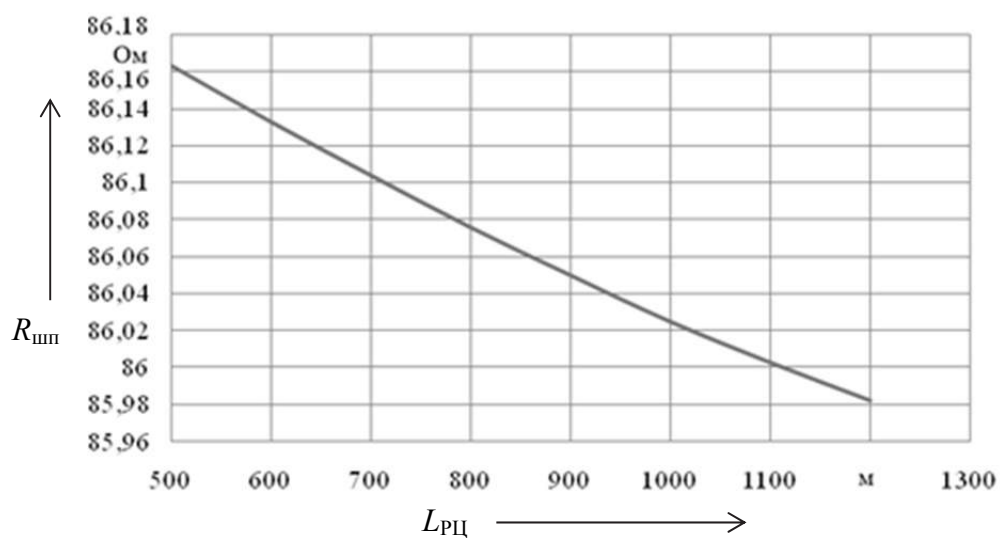


Рисунок 6 – График зависимости модуля сопротивления блока шунтирования от длины рельсовой линии

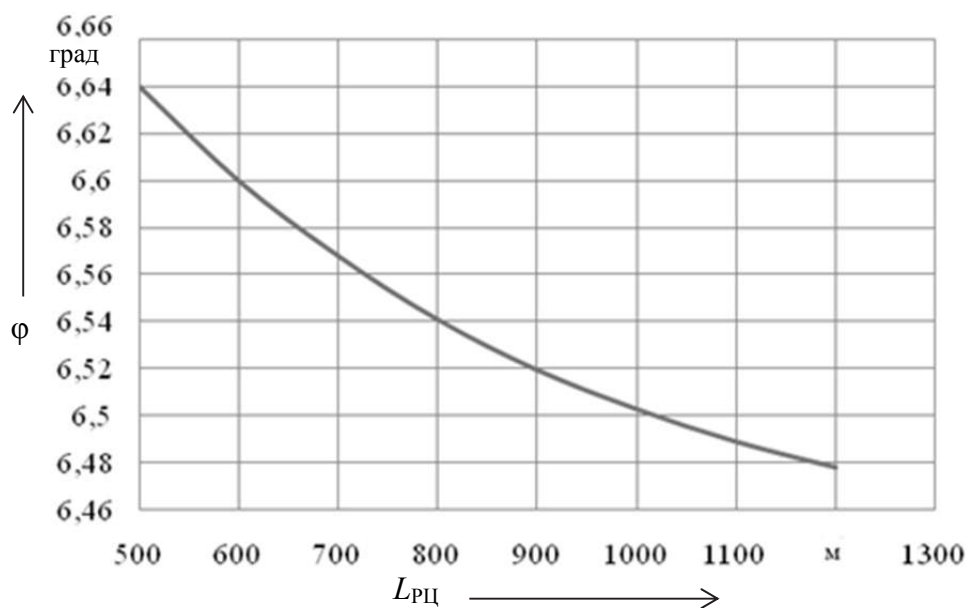


Рисунок 7 – График зависимости градуса сопротивления блока шунтирования от длины рельсовой линии

Из графиков на рисунках 4 – 7 видно, что значение сопротивления шунтирования меняется незначительно во всем диапазоне изменения длины рельсовой линии и сопротивления изоляции.

Из расчетов следует, что для шунтирования РЦ в начале рельсовой линии следует на крессовом стативе питающего конца (точки «а» и «б» на рисунке 1) включить сопротивление $R_{шп} = 85,982e^{j6,478}$ Ом, а для шунтирования РЦ в конце рельсовой линии следует на крессовом стативе релейного конца (точки «с» и «д» на рисунке 1) включить сопротивление $R_{шр} = 86,649e^{j6,478}$ Ом.

В качестве технической реализации предлагаемого метода автоматизации процесса проверки рельсовых цепей на шунтовую чувствительность может быть использовано устройство, изображенное на рисунке 8.

В действующую схему рельсовой цепи предлагается дополнительно ввести два блока шунтирования 8 и блок управления и индикации 9.

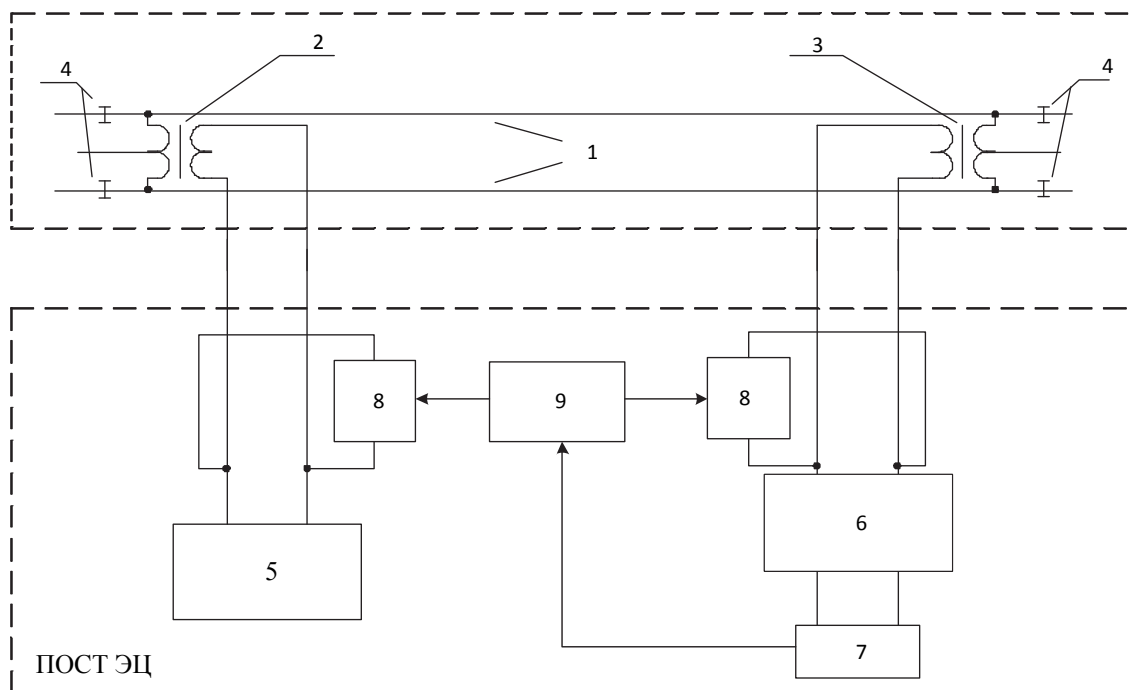


Рисунок 8 – Схема подключения блока шунтирования и блока управления и индикации

Электрический сигнал контроля рельсовой линии (КРЛ) от блока аппаратуры питающего конца 5 проходит через дроссель-трансформатор питающего конца 2 и поступает в рельсовую линию 1. После прохождения рельсовой линии 1 сигнал через дроссель-трансформатор релейного конца 3, через блок аппаратуры релейного конца 6 поступает на путевое реле 7. В случае целостности рельсовой линии 1, отсутствия поезда и исправного состояния элементов рельсовой цепи уровень сигнала на приемнике находится выше порога занятости, рельсовая цепь считается свободной (нормальный режим). Обратный тяговый ток через среднюю шину путевого дроссель-трансформатора 2 имеет дополнительный путь протекания в рельсовую линию соседней рельсовой цепи, отделенную от рассматриваемой цепи двумя изолирующими стыками 4. При наезде поезда на рельсовую цепь со стороны расположения изолирующих стыков или его приближении с противоположного конца вследствие шунтирования уровень сигнала на приемнике становится ниже порога занятости. Рельсовая цепь считается занятой.

Для автоматизации проверки рельсовой цепи на шунтовую чувствительность путем наложения нормативного шунта сначала в начале, затем в конце рельсовой линии на посту ЭЦ по сигналу блока управления и индикации 9 включается блок шунтирования 8, который шунтирует рельсовую цепь сначала сопротивлением эквивалентному наложению нормативного шунта 0,06 Ом в начале рельсовой линии 1, затем сопротивлением эквивалентному

наложению нормативного шунта 0,06 Ом в конце рельсовой линии 1, реакция путевого реле 7 передается на блок управления и индикации.

На представленную схему (см. рисунок 8) подана заявка на получение патента на изобретение.

При проверке рельсовых цепей на шунтовую чувствительность следует обращать внимание на состояние поверхности головок рельсов. Если из-за ржавчины, обледенения, напесковки снега или загрязнения головок рельсов (запесочивания локомотивом) возникает опасность ложной свободности рельсовой цепи при занятии подвижным составом, то необходимо сделать запись в Журнале осмотра для работников дистанции пути о необходимости очистки рельсов или ДСП о необходимости обкатки рельсовой цепи локомотивом и о необходимости проверки фактической свободности рельсовой цепи при организации движения по данному изолированному участку. Порядок проверки фактической свободности рельсовых цепей для таких случаев и порядок обкатки малодеятельных путей и изолированных участков устанавливаются технико-распорядительным актом (ТРА) станции.

Так как в предложенном методе шунтирование рельсовых цепей происходит без присутствия обслуживающего персонала на рельсовой линии и, как следствие, невозможностью обратить внимание на состояние поверхности головки рельсов, то следует контролировать состояние верхней поверхности головки рельсов при производстве других работ по обслуживанию РЦ. Наиболее подходящей для такого контроля работой является «Проверка на станции состояния изолирующих элементов рельсовых цепей, стыковых соединителей и перемычек», технологическая карта 3.1.1. Периодичность данной работы совпадает с проверкой на шунтовую чувствительность – один раз в четыре недели. Таким образом, безопасность движения поездов при применении описанного способа автоматизации процесса проверки рельсовых цепей на шунтовую чувствительность не снижается.

Предложенный метод позволит исключить работу по проверке РЦ на шунтовую чувствительность с непосредственным выходом на поле, что снизит трудозатраты на обслуживание.

Список литературы

1. Филюшкина, Т. Напольному оборудованию – современные технологии [Текст] / Т. Филюшкина // Автоматика, связь, информатика. – Москва, 2010. – № 9. – С. 2 – 6.
2. Инструкции по техническому обслуживанию и ремонту устройств и систем сигнализации, централизации и блокировки / ОАО «Российские железные дороги». – М., 2015.
3. Аркатов, В. С. Рельсовые цепи магистральных дорог. Справочник [Текст] / В. С. Аркатов. – М., 2006. – 496 с.

References

1. Filyushkina T. Outdoor equipment – modern technology [Napol'nomu oborudovaniyu – sovremennye tekhnologii]. Avtomatika, svyaz', informatika – Automation, communication, computer science, 2010, no. 9, pp. 2 – 6.
2. *Instrukcii po tekhnicheskomu obsluzhivaniyu i remontu ustrojstv i sistem signalizacii, centralizacii i blokirovki* (Instructions for maintenance and repair of devices and signal-tion systems, centralization and blocking). Moscow, ОАО «Rossijskie zheleznnye dorogi», 2015.
3. Arkatov V. S. *Rel'sovye cepi magistral'nyh dorog* (Track circuit trunk roads). Moscow, 2006, 496 p.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Соколов Максим Михайлович

Югорский государственный университет (ЮГУ).

Чехова ул., д. 16, г. Ханты-Мансийск, 628012,

Российская Федерация.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Sokolov Maxim Mikhailovich

Yugra State University (YSU).

16, Chehov st., Khanty-Mansiysk, 628012, the Rus-

sion Federation.

Кандидат технических наук, доцент, и. о. заведующего кафедрой «Нефтегазовое дело», ЮГУ.
E-mail: SokolovMM@mail.ru

Cand.Tech.Sci., Acting Head of the department «Oil and Gas Business», YSU.
E-mail: SokolovMM@mail.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Соколов, М. М. Совершенствование технологии обслуживания станционных рельсовых цепей [Текст] / М. М. Соколов // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2016. – № 3 (27). – С. 124 – 132.

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Sokolov M. M. Reducing the time maintenance of station track circuits of railway automation. Journal of Transsib Railway Studies, 2016, vol. 27, no. 3, pp. 124 – 132. (In Russian).

УДК 629.471

И. В. Пустовой

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

ИНКАПСУЛЯЦИЯ СТАТИСТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ УПРАВЛЕНИЯ В ИНФОРМАЦИОННУЮ СИСТЕМУ СЕРВИСНОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ И РЕМОНТА ЛОКОМОТИВОВ

Аннотация. Рассмотрена задача управления жизненным циклом локомотива при сервисной системе технического обслуживания и ремонта. Предложено инкапсулировать статистические методы в АСУ локомотивных депо. Рассмотрен пример управления неснижаемым запасом запчастей. В группе компаний «Локомотивные технологии» повышение эффективности технологических процессов технического обслуживания и ремонта решается в том числе за счет создания и внедрения в сервисных локомотивных депо информационно-управляющей системы АСУ «Сетевой график», внедрение которой начато в 2016 г. и должно быть завершено к концу 2017 г. Для практического применения методических подходов международных (ISO) и национальных (ГОСТ) стандартов менеджмента качества, управления надежностью, бережливого производства и статистических методов управления в условиях сервисных локомотивных депо предлагается применить принцип «Встроенное качество», когда логические построения, алгоритмы и формулы инкапсулируются в программное обеспечение АСУ «Сетевой график», тем самым существенно снижая требования к уровню подготовки персонала депо. Управление неснижаемым запасом запасных частей в сервисных локомотивных депо предлагается реализовать как элемент АСУ «Сетевой график» через инкапсуляцию в систему вероятностно-статистических методов расчета неснижаемого запаса по данным об интенсивности потребления деталей и времени их доставки в депо.

Ключевые слова: локомотивы, сервис, техническое обслуживание и ремонт, статистические методы управления, инкапсуляция.

Ilya V. Pustovoy

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

STATISTIC METHODS ENCAPSULATION IN LOCOMOTIVE SERVICE REPAIR DEPOT INFORMATION NET

Abstract. The article deals with the locomotive lifecycle problem at vehicle technical maintenance and repairing service. It proposes to encapsulate the statistic methods into the automatic locomotive depot control system basing on the example of management with the minimum stock spare parts level. In such a group of companies as "Locomotive technologies" the efficacy of maintenance and repairing technological processes is improved by creation and implementation of the information management control system "Network diagram" into the locomotive depot service. Its implementation was started in 2016 and should be completed by the end of 2017. In practice methodological approaches of international (ISO) and national (GOST) standards of management quality and reliability, lean manufacturing and statistic methods of management in conditions of locomotive depot service are proposed to be used basing on the principle of "Built-in quality". In this case logical constructions, algorithms and formulas are encapsulated into "Network diagram" software significantly reducing the training level demands of the depot personnel. The article also proposes to control the minimum level of stock spare parts in the locomotive depot in terms of "Network diagram" software

through encapsulation of probabilistic-statistical methods of minimum stock calculation according to the data on intensity of parts consumption and the time of their delivery to the depot.

Keywords: locomotives, service, repair and maintenance, statistic methods, encapsulation.

В группе компаний «Локомотивные технологии» в рамках совершенствования системы управления сервисным обслуживанием и ремонтом (ТОиР) локомотивов ведутся работы по созданию и внедрению Единой информационной системы (АСУ ЛТ) и ее подсистемы управления производственными процессами сервисных локомотивных депо (СЛД) под обобщенным названием «АСУ «Сетевой график» (АСУ СГ)».

В настоящее время достаточно глубоко продуман порядок управления группой компаний в целом, на уровне исполнительного аппарата, филиалов и СЛД. При этом на прежнем уровне развития остались собственно производственные процессы управления ТОиР. Внедрение АСУ СГ практически не влияет на доходы компании, которые определяются пробегом локомотивов в эксплуатации. Эффект достигается за счет сокращения потерь на производстве (рисунок 1) от некачественного планирования ремонтов, от штрафов за низкий коэффициент технической готовности локомотивов (КТГ), от выполнения неплановых и дополнительных работ, от большого объема ручной работы по учету и отчетам и др. Отдельную большую статью потерь составляют как пересодержание запасных частей (товарно-материальных ценностей – ТМЦ) на складе, так и их дефицит. Работа над проектом АСУ СГ начата в начале 2015 г. как развитие проекта «Автоматизированная система управления надежностью локомотивов» [1].



Рисунок 1 – Предпосылки внедрения АСУ «Сетевой график»

АСУ СГ является комплексной системой управления производственными процессами СЛД, включающей в себя следующие задачи (рисунок 2) [2, 3]:

мониторинг эксплуатации и технического состояния локомотивов (блок 1);

формирование графиков постановки локомотивов на ремонт (блок 2);

внутрипроизводственное планирование (блок 3);

управление производственными процессами (блок 4), включая материально-произ-

водственное обеспечение ремонтов и элементы системы качества.

Все процессы подвергаются факторному анализу (блок 5) согласно принципу постоянного улучшения (цикл PDCA) с принятием корректирующих мероприятий.

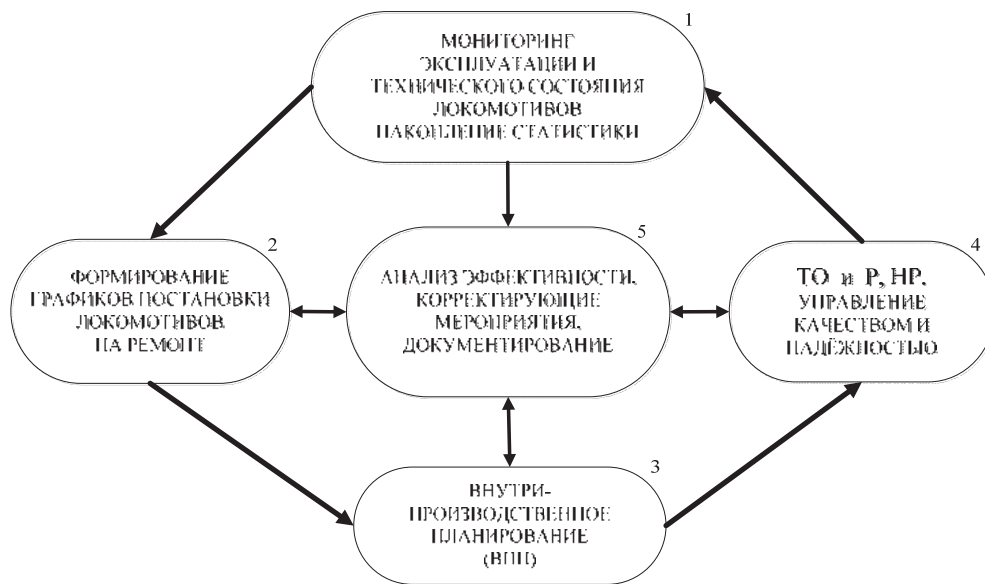


Рисунок 2 – Основные функциональные задачи АСУ «Сетевой график»

Основное назначение АСУ СГ – реинжиниринг и автоматизация технологических процессов планирования и выполнения ТОиР в СЛД, управление ресурсами в процессе выполнения ТОиР, управление качеством ТОиР по принципу «Встроенное качество», повышение надежности локомотивов.

АСУ СГ – это основа системы управления жизненным циклом локомотива, которая сейчас создается совместно с холдингом-производителем подвижного состава ЗАО «Трансмашхолдинг» и сервисной компанией ООО «Локомотивные технологии». Структура процессов АСУ «Сетевой график» представлена на рисунке 3 и соответствует структуре задач по рисунку 2. В процессе эксплуатации локомотива осуществляется мониторинг его эксплуатационных показателей по данным автоматизированной системы оперативного управления перевозками (АСОУП) (блок 1.1), технического состояния и режимов эксплуатации по данным бортовых микропроцессорных систем управления (МСУ) – блок 1.2 [4]. Одновременно с использованием данных мониторинга осуществляется прогнозное планирование постановки локомотивов на все виды ремонта на семь лет, год и квартал. До семи лет вперед (блок 2.1) – для планирования тяжелых ресурсов заводов и депо (блок 3.1 – например, новая оснастка под новые виды оборудования) и планирования МТО нестандартными и редкими запасными частями (блок 3.2 – например, снятые с производства). На год вперед (блок 2.2) – для планирования материально-технического обеспечения МТО (блок 3.3) и ресурсов СЛД и заводов (блоки 3.4, 3.5).

Данные мониторинга эксплуатации локомотивов, технического состояния и режимов эксплуатации (блоки 1.1 и 1.2) наряду с данными деповских систем технического диагностирования (блок 1.3) используются в другом виде планирования – оперативном трехсуточном и даже декадном (блок 2.3). На основании оперативного планирования осуществляется постановка локомотивов на ремонт (блок 2.4) с последующим выполнением собственно ремонта и (или) технического обслуживания. Одновременно осуществляется оперативное планирование ресурсов: МТО (блок 3.6) и подготовка производства (блок 3.7).

При возникновении отказа локомотива на линии осуществляется постановка локомотива на неплановый ремонт (НР – блок 2.7), который также оперативно планируется (блок 2.3), затем осуществляется приемка локомотива (блок 2.4) и собственно ремонт (блок 2.5).

При выполнении ремонтов (плановых и неплановых) осуществляется планирование загрузки производства (блок 4.1), планирование трудовых ресурсов (блок 4.2), материально-технического обеспечения ТООР (блок 4.3) и выдача ремкомплектов в цеха (блок 4.4).

Заключительный этап процесса – сдача локомотива заказчику (блок 2.6), оформление всех управляющих и бухгалтерских документов. На этом итерация жизненного цикла заканчивается. Параллельно по циклу PDCA осуществляется управление качеством и имеющимися проблемами (блок 1.4).

Все процессы управления жизненным циклом локомотива рассматриваются как неотъемлемая часть общей системы управления группы компаний «Локомотивные технологии» – так называемой ERP-системы, создаваемой на базе пакета программ 1С [5].

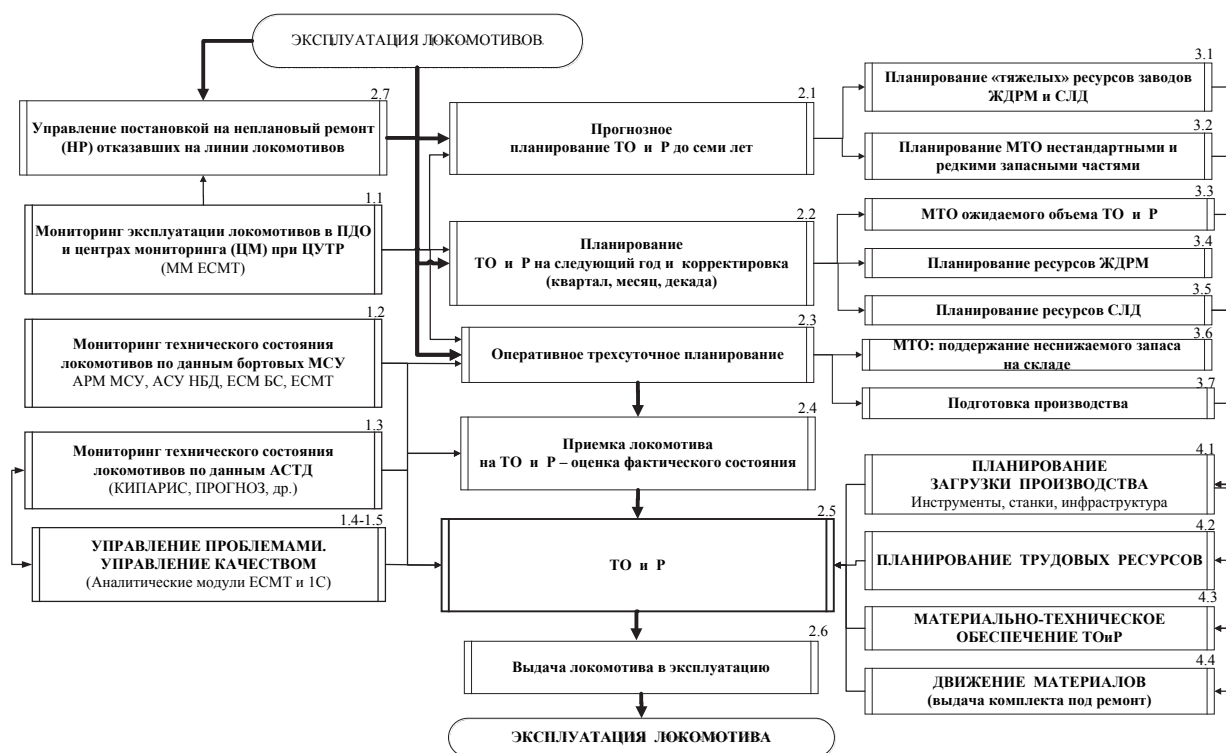


Рисунок 3 – Основные блоки АСУ «Сетевой график»

Для работников локомотивного депо АСУ «Сетевой график» доступна через дружественный интерфейс, представляющий собой систему окон. На самом деле за этими окнами стоят информационная система и инкапсулированные в нее математические методы и методы международных стандартов менеджмента качества, управления надежностью и рисками, а также бережливого производства. Анализ показал, что за последние 80 лет совершенствования системы управления производственными процессами и повышения надежности изделий разработан ряд пакетов международных (ISO) и национальных (ГОСТов) стандартов, содержащих методы, методики и алгоритмы управления, включая статистические методы управления. Применение этих ISO и ГОСТов позволяет существенно повысить эффективность ТООР в СЛД, однако их применение затруднено низкой квалификацией работников, сложившейся практикой ремонта. Решать проблему предлагается за счет методического подхода «Встроенное качество», когда методические подходы, алгоритмы и математические расчеты инкапсулируются в информационно-управляющие системы СЛД. Инкапсуляция наряду с полиморфизмом и наследственностью является неотъемлемым свойством современного объектно-ориентированного программирования, когда в объект включаются сложные вычисления, а интерфейс объекта позволяет легко использовать результаты вычислений. Например, пользователь, работая в MS Excel, может выполнить сортировку массива данных одним нажатием клавиши. При это во встроенном объекте Sheets будет запущена инкапсули-

рованная процедура Sort. При этом пользователь даже не знает, какой именно принцип сортировки применен.

При реализации проекта АСУ СГ предполагается инкапсуляция математических методов в следующие процессы:

- прогнозирование постановки локомотивов на ТООР моделированием на базе расчета математического ожидания и среднеквадратичного отклонения значений среднесуточного пробега локомотивов и времени простоя в депо;

- система поддержки принятия решений в процессе перехода от замечаний по локомотиву (диагностической карты) к дополнительным сверхцикловым работам с использованием вероятностных подходов, теории нечетких множеств и нейронных сетей;

- сокращение складских запасов за счет использования алгоритмов планирования запасных частей и материалов, в том числе с использованием математического аппарата теории очередей, сетевого планирования, методов статистического и факторного анализа и др.;

- контроль эффективности выполнения ТООР с использованием методов статистического и факторного анализа, теории графов, диаграмм Ганта и др.

Таким образом, АСУ «Сетевой график» представлена пользователям системой окон (рисунков 4), действия с которыми основываются на инкапсулированных методах управления, алгоритмах и математических формулах, прежде всего связанных со статистическими методами управления.

Окно «Прогнозное планирование»: по статистике среднесуточных пробегов и среднего простоя локомотивов в СЛД рассчитывается ожидаемое время постановки локомотивов на все виды ремонта и общая программа ремонта. Сформированные в окне данные являются основой для дальнейшего планирования ресурсов для выполнения ТООР: трудовых, инфраструктурных, инструментальных, МТО и др.

Окно «Оперативное планирование»: по данным АСОУП формируется приоритетный список кандидатов на ремонт, из которого с учетом ранее выполненного планирования формируется трехсуточный график постановки локомотивов на ТООР.

Окно «Статус» представляет собой схему СЛД с указанием дислокации локомотивов в депо и выполняемых над ними действий (статус локомотивов). Окно позволяет управлять логистикой СЛД, ликвидировать непроизводительные простои. В окне отображается фактическое месторасположение локомотивов на ремонтных позициях и тракционных путях.

Окно «Диагностическая карта» предназначено для комплексной регистрации всей информации для проведения ТООР. Состоит из нескольких закладок: Основные сведения (в окно вводятся исходные данные, такие как время постановки, вид ремонта, уровень топлива и др.), Комплектность (регистрируется комплектность локомотива в соответствии с требованиями), Замеры (закладка является комплексной и предназначена для регистрации всех видов замеров – как ручных, так и автоматизированных систем технического диагностирования), Замечания (закладка предназначена для регистрации всех видов замечаний по техническому состоянию локомотивов, возникающих на всех этапах нахождения локомотива в СЛД; по каждому замечанию указываются источник информации, дата и время регистрации; вкладка замечаний является исходным заданием мастерам цехов для формирования дополнительных (сверхцикловых) работ).

Окно «Работа»: основное окно мастеров цехов, в которых происходит назначение, контроль и закрытие нарядов.

Окно закрытия нарядов: промежуточное окно для формирования листа нарядов (подтверждения выполнения нарядов руководством депо, в том числе замом по ремонту), передаваемого в отдел труда и зарплаты. Формируется ежедневно в конце смены.

Окно выдачи ТМЦ со склада на подотчет мастерам позволяет автоматизировать формирование комплекса документов, связанных с выдачей и учетом товарно-материальных ценностей (ТМЦ), включая линейное оборудование и материалы повторного использования.

Организация производства на транспорте

Окна единой информационной системы компании: так как АСУ СГ является частью общей системы управления, значительная часть используемых окон не входит в ее состав, а является частью подсистем «Кадры», «Бухгалтерия», «Склад» и др. При этом база данных и нормативно-справочная информация АСУ СГ является общей.

В статье рассмотрен пример инкапсуляции математических методов и методов статистического управления в АСУ СГ для задачи внутрипроизводственного планирования (ВПП).

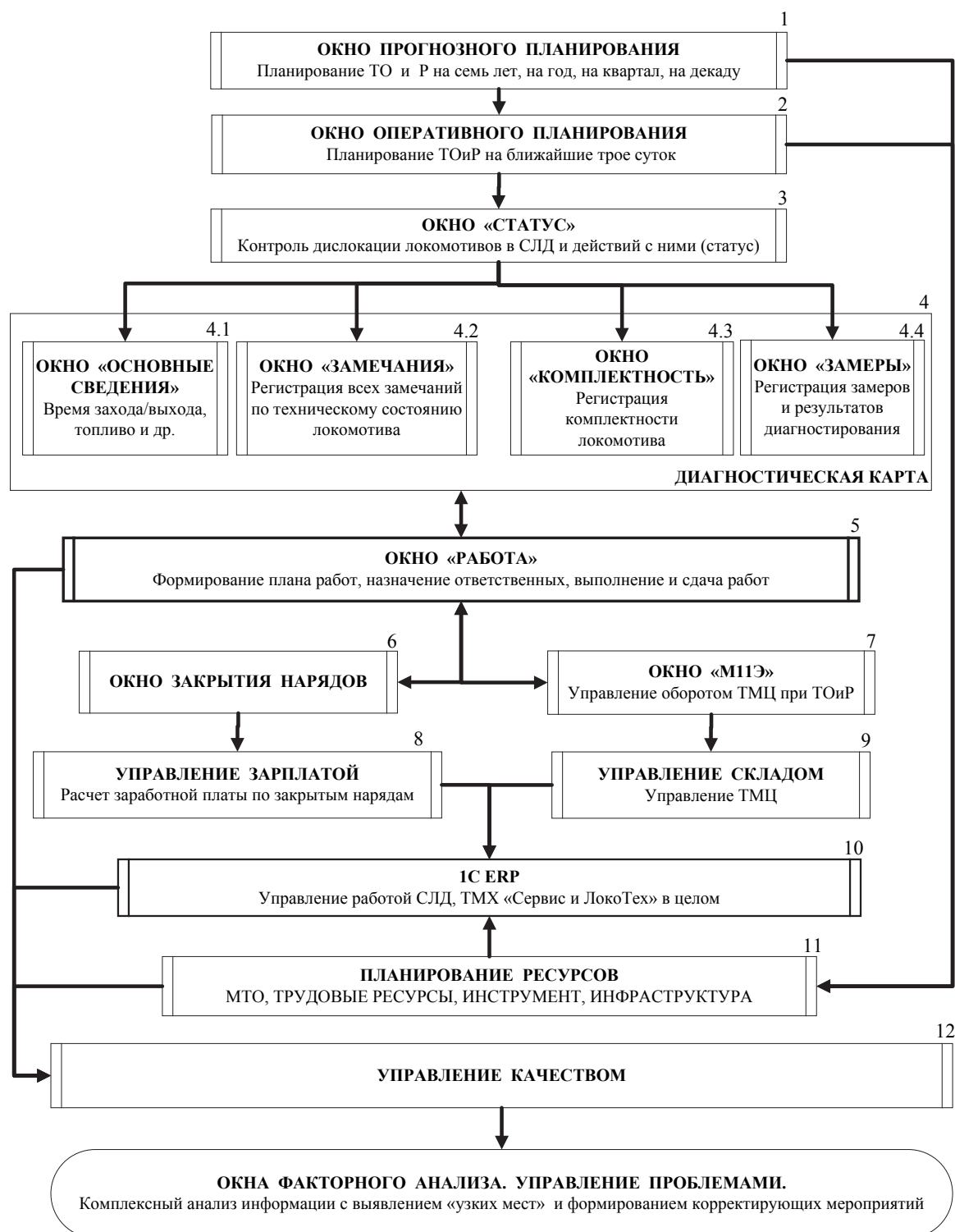


Рисунок 4 – Система окон АСУ «Сетевой график»

Обеспечение производственного процесса необходимыми ресурсами – основа устойчивой работы производства. Важной специфической чертой ТОиР в условиях СЛД является

низкая предсказуемость потребности в тех или иных запасных частях, ТМЦ. При проведении ТОиР в объеме ТО-2 (продолжительность 1,5 часа), ТО-3 (продолжительность 12 – 18 часов) и ТР-1 (18 – 36 часов) велика вероятность возникновения дополнительных работ – работ, выполняемых сверх цикла. На выполнение этих работ запасных частей ТМЦ на складе может не оказаться, что приведет к перепростоя локомотива в депо. Поэтому важно научиться управлять неснижаемым запасом ТМЦ на складе. В основу предлагается методики положить эмпирическую формулу [6] на базе статистики расхода и поступления тех или иных ТМЦ: зная средний расход деталей, прогнозировать потребность и, соответственно, неснижаемый запас как корень квадратный из суммы перекрытий «отклонения ритма» и отклонения потребности:

$$Q = Z \cdot \left(\sqrt{(\sigma_R^2 \cdot M^2) + \left(\frac{R \cdot \sigma_M^2}{T}\right)} \right), \quad (1)$$

где Q – требуемый объем неснижаемого запаса (шт., кг и др.);

M – математическое ожидание потребности в ТМЦ в сутки (шт., кг и др.),

$$M = \frac{\sum_{i=1}^{\max} x_i}{\max}, \quad (2)$$

где x_i – расход детали за i -й день;

$\max$ – число наблюдений, дней;

σ_M – среднеквадратическое отклонение среднемесячной потребности (СКО) M :

$$\sigma_M = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{\max} (x_i - MM)^2}{\max}}, \quad (3)$$

где $MM = 30 \cdot M$ – математическое ожидание потребления деталей за месяц;

R – математическое ожидание ритма поставки ТМЦ, дней:

$$R = \frac{\sum_{j=1}^{\max} y_j}{\max}, \quad (4)$$

где y_j – время j -й поставки;

$\max$ – число наблюдений поставок (число приходов);

σ_R – СКО R ;

$$\sigma_R = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^{\max} (y_j - R)^2}{\max}}. \quad (5)$$

(Ритм поставки R в формуле (5) автором предлагается заменить на время доставки детали с буферного склада, что более соответствует технологии работы СЛД);

T – количество дней в периоде расчета;

Z – уровень обслуживания (в единицах СКО) в зависимости от заданной вероятности наличия деталей:

95 %	$Z = 1,64$;
97 %	$Z = 1,88$;
99 %	$Z = 2,33$;
99,7 %	$Z = 2,75$;
99,99 %	$Z = 3,72$.

Рассмотрим пример. Пусть в день в депо потребляется $M = 100$ топливных фильтров. При этом среднемесячное СКО потребления фильтров пусть составляет $\sigma_M = 200$ фильтров. Поставка фильтров с буферного склада R составляет 10 дней при СКО σ_R , равном двум дням. Тогда при еженедельном контроле неснижаемого запаса и заданной вероятности наличия фильтров 95 % получим, что неснижаемый запас:

$$Q = 1,64 \cdot \sqrt{(2^2 \cdot 100^2 + (10 \cdot 200^2)/7)} = 511 \text{ фильтров}. \quad (6)$$

Другие примеры расчетов приведены в таблице. Таким образом, в рамках создаваемой системы АСУ СГ имеется возможность реализовать самообучающуюся систему расчета неснижаемого запаса по каждому виду ТМЦ: в процессе ремонта мастера заказывают со склада необходимые детали в необходимом им количестве. При этом запас на складе поддерживается автоматически за счет расчета и формирования заявки на буферный региональный склад.

Внедрение АСУ СГ начато в 2016 г. со специально выбранных пилотных СЛД: «Тюмень», «Югра» (г. Сургут), «Амурское» (г. Комсомольск-на-Амуре), «Тында-Северная», «Боготол-Сибирский», «Барабинск» и «Дальневосточное» (г. Хабаровск). Первым внедрялся модуль ТУ-28Э [3], позволяющий автоматизировать учет всех работ, выполняемых в цехе, с автоматизированной передачей данных в отдел труда и заработной платы (ОТиЗ) для расчета заработной платы (в модуле ЗиУП 1С). Именно на этом модуле отрабатывалась новая идеология взаимодействия рабочих и мастеров цехов с информационной системой.

Вторым по очереди внедрения АСУ СГ является модуль автоматизации учета выдачи материалов со склада в цех М11Э.

По мере внедрения ТУ-28Э и М11Э в системе реализуются математические методы статистического управления, в том числе описанный выше метод управления неснижаемым запасом ТМЦ.

Примеры расчета неснижаемого запаса ТМЦ

Параметр	Наименование параметра	Пример 1	Пример 2	Пример 3	Пример 4	Пример 5
Z	Уровень обслуживания	1,64	1,64	1,64	1,64	1,64
M	Математическое ожидание потребности в ТМЦ в сутки	100	100	150	50	1
R	Математическое ожидание ритма поставки ТМЦ	10	10	10	200	30
σ_M	Среднеквадратическое отклонение среднемесячной потребности M	200	400	200	200	0
σ_R	СКО R	2	2	2	10	0
T	Количество дней в периоде расчета	30	60	30	30	30
Q	Требуемый объем неснижаемого запаса	379	423	527	1179	0

Последующие СЛД проходят обучение на базе пилотных депо. Завершить внедрение АСУ СГ во всех 92 СЛД запланировано на 2017 г.

Эффект от внедрения АСУ СГ определяется объемом потерь на производстве в СЛД. АСУ СГ не сможет полностью ликвидировать потери, однако сможет снизить их не менее чем на 30 %. Экономический эффект (сокращение расходов на ТОиР) достигается через технические эффекты, представленные на рисунке 5.

Сокращение затрат на проведение цикловых работ. Низкая квалификация работников СЛД, недостаточная оснащенность производственных участков приводят к повышению себестоимости ремонта оборудования. АСУ СГ позволит за счет ВПП заранее планировать распределение ремонтов оборудования между заводами и депо. Например, аппаратные, топливные, автоматные переделы (участки) недостаточно оснащены, имеет место большой объем ручной низкопроизводительной работы. Переделы по ремонту МСУ, как правило, не имеют наладочных станков. Нет оборудования для диагностирования силовых электронных установок. В настоящее время возможности планирования и перераспределения работ нет. Одновременно планирование позволит определить достаточность инфраструктуры СЛД, наличие инструмента, трудовых и других ресурсов. Исследования показали, что за счет ВПП можно сократить затраты на цикловые работы минимум на 10 % (в мировой практике, в том числе Lean Production, эффект от процессного планирования оценивается не менее чем в 50 %, поэтому предложенная оценка не завышена). Эффект будет получен примерно через год после начала эксплуатации АСУ СГ.

Сокращение потерь из-за низкого КТГ. Невыполнение требований договора с заказчиком по уровню коэффициента технической готовности локомотивов приводит к дополнительным потерям из-за понижающего коэффициента. Анализ показал, что потери КТГ до 60 % определяются длительным простоем в ожидании ТОиР и НР [4]. За счет ВПП и управления логистикой СЛД (окно «Статус») простой в ожидании ремонта можно снизить в два раза.

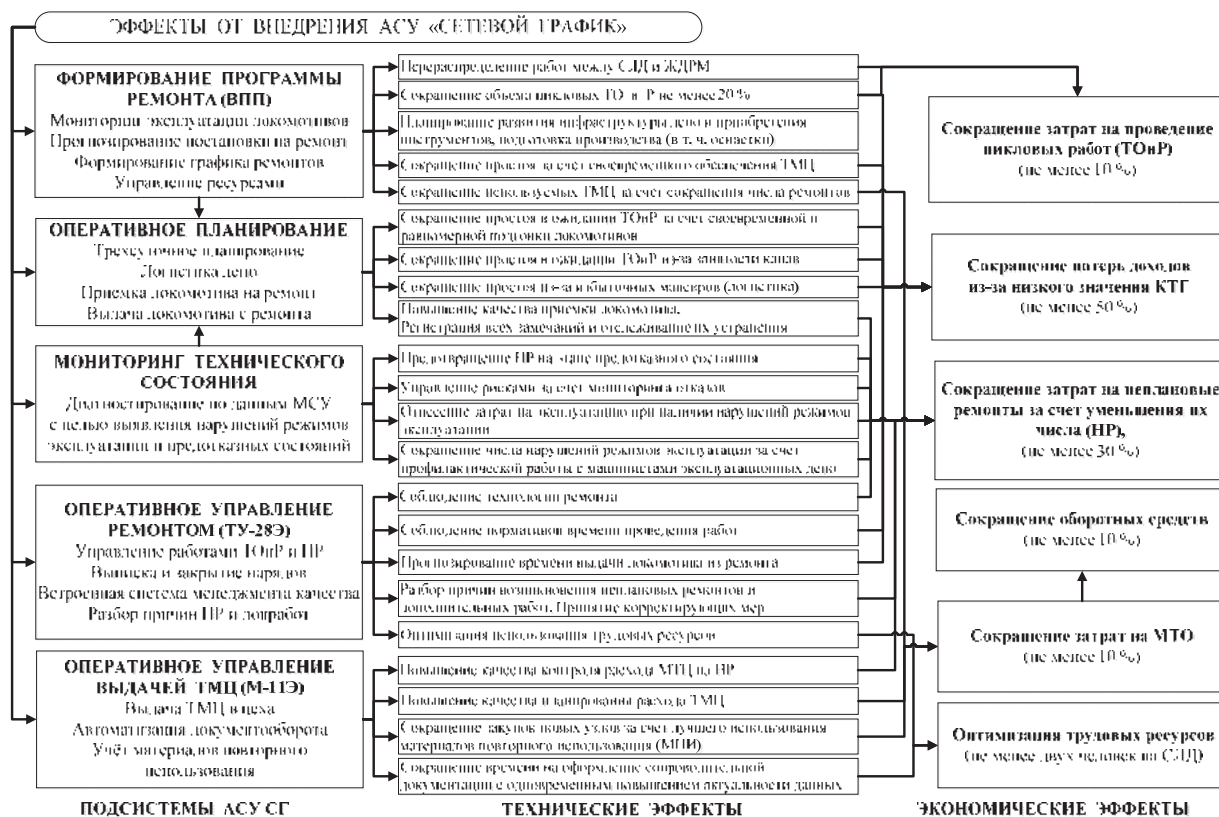


Рисунок 5 – Эффекты от внедрения АСУ «Сетевой график»

Сокращение потерь от выполнения unplanned и дополнительных работ. Значительная статья потерь – unplanned ремонты и дополнительные работы (по сути: unplanned ремонты во время выполнения цикловых работ). Учет всех сверхцикловых работ и их обязательный разбор (выявление одной из шести причин возникновения неисправностей: некачественный ремонт, некачественные или отсутствующие комплектующие, нарушения режимов эксплуатации, несоответствие технологической карты ремонта, конструкционные недостатки узла, деградационные причины). Управление инцидентами приведет к сокращению потерь от НР за счет исключения причин возникновения НР, планирования расходов на НР, а также дополнительно повысит КТГ за счет сокращения простоя на ремонте. Сократится и потребление ТМЦ.

Сокращение оборотных средств. Наведение порядка с ВПП, сокращение unplanned ремонтов и дополнительных работ, оптимизация запасов ТМЦ приведут к сокращению оборотных средств.

Сокращение трудовых ресурсов. Автоматизация формирования отчетных документов позволит снизить затраты на непроизводительные операции по формированию учетных и отчетных документов, которые в настоящее время формируются в рукописном виде или вручную с использованием программ Word или Excel. Непроизводительные потери на формирование отчетов в СЛД колеблется от трех до 12 человек.

Таким образом, реализации проекта АСУ «Сетевой график» в рамках создания единой информационной системы ООО «Локомотивные технологии» с использованием инкапсулированных методов управления, включая статистические, позволит повысить управляемость процессов сервисного обслуживания локомотивов и помочь в решении важнейших задач,

стоящих перед локомотиворемонтным комплексом: существенно повысить надежность локомотивов и сократить затраты на ТОиР.

На основании изложенного можно сделать выводы.

В группе компаний «Локомотивные технологии» повышение эффективности технологических процессов технического обслуживания и ремонта решается в том числе за счет создания и внедрения в СЛД информационно-управляющей системы АСУ СГ, внедрение которой начато в 2016 г. и должно быть завершено к концу 2017 г.

Для практического применения методических подходов международных (ISO) и национальных (ГОСТов) стандартов менеджмента качества, управления надежностью, бережливого производства и статистических методов управления в условиях СЛД предлагается применить принцип «Встроенное качество», когда логические построения, алгоритмы и формулы инкапсулируются в программное обеспечение АСУ СГ, тем самым существенно снижая требования к уровню подготовки персонала депо.

Управление неснижаемым запасом запасных частей в СЛД предлагается реализовать как элемент АСУ СГ через инкапсуляцию в систему вероятностно-статистических методов расчета неснижаемого запаса по данным об интенсивности потребления деталей и времени их доставки в депо.

Список литературы

1. Концепция автоматизированной системы управления надежностью локомотивов (АСУНТ) / К. В. Липа, В. И. Гриненко и др. / ООО «ТМХ-Сервис» — М., 2012. — 159 с.
2. Пустовой, И. В. Сетевое планирование ремонта сервисных локомотивов / И. В. Пустовой, И. И. Лакин // Локомотив. — 2015. — № 7. — С. 6 — 10.
3. Пустовой, И. В. Электронный журнал учета ремонта локомотивов ТУ-28Э / И. В. Пустовой, А. И. Баранов, Д. В. Галкин // Локомотив. — 2016. — № 3. — С. 12 — 14.
4. Мониторинг технического состояния и режимов эксплуатации локомотивов в ТМХ-Сервис Теория и практика / К. В. Липа, А. А. Белинский и др. / ООО «Локомотивные технологии». — М., 2015. — 212 с.
5. Функциональные требования на АСУ «Сетевой график» / ООО «Локомотивные технологии». — М., 2016. — 139 с.
6. Методика расчета потребности, неснижаемого запаса и заявки на закупку товарно-материальных ценностей / ООО «Локомотивные технологии». — М., 2016. — 30 с.

References

1. Lipa K. V., Grinenko V. I., Lyangasov S. L., Lakin I. K., Abolmasov A. A., Melnikov V. A. *Kontseptsiiia avtomatizirovannoi sistemy upravleniia nadezhnost'iu lokomotivov (ASUNT)* (The concept of the automated control system reliability of locomotives (ASUNT). Moscow: LLC «TMH-Service», 2012, 159 p.
2. I. V. Pustovoy, I. I. Lakin *Setevoe planirovanie remonta servisnykh lokomotivov* [The network planning of maintenance service of locomotives]. *Lokomotiv — Locomotive*, 2015, no. 7, pp. 6 — 10.
3. Pustovoy I. V., Baranov A. I., Galkin D. V. *Elektronnyi zhurnal ucheta remonta lokomotivov TU-28E* [The Electronic journal of repair of locomotives TU-28E]. *Lokomotiv — Locomotive*, 2016, no. 3, pp. 12 — 14.
4. Lipa K. V., Belinsky A. A., Pustovoy V. N., Lakin I. K. *Monitoring tekhnicheskogo sostoiianiia i rezhimov ekspluatatsii lokomotivov v TMKh-Servis Teoriia i praktika* (Monitoring of the technical condition and operating modes of a locomotive at TMH-Service. Theory and practice). Moscow: LLC «Locomotive Technologies», 2015, 212 p.
5. *Funktsional'nye trebovaniia na ASU «Setevoi grafik»* (The functional requirements for «Network diagram» software). Moscow: «Locomotive technologies», 2016, 139 p.

6. *Metodika rascheta potrebnosti, nesnizhaemogo zapasa i zaiavki na zakupku tovarno-material'nykh tsennostei* (The method of calculation of requirements minimum level and requisition of inventory). Moscow: LLC «Locomotive Technologies», 2016, 30 p.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Пустовой Илья Владимирович

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) 37-60-82.

E-mail: ipustovoy@yandex.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Pustovoy Ilya Vladimirovich

Omsk State Transport University (OSTU).

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

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

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

E-mail: ipustovoy@yandex.ru.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Пустовой, И. В. Инкапсуляция статистических методов управления в информационную систему сервисного обслуживания и ремонта локомотивов [Текст] / И. В. Пустовой // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2016. – 2016. – № 3 (27). – С. 132 – 142.

BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Pustovoy I. V. Statistic methods encapsulation in locomotive service repair depot information net. Journal of Transsib Railway Studies, 2016, vol. 27, no. 3, pp. 132 – 144. (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 представляется:

рукопись статьи на белой бумаге формата А4 в двух экземплярах, а также в электронном виде (на любом носителе или по e-mail), имя файла определяется по фамилии первого автора: фамилия.doc;

рукопись статьи включает в себя УДК, ФИО авторов, аффилиацию (место работы или учебы) авторов, название статьи, аннотацию, ключевые слова (5 – 10 слов) на русском и английском языках, текст статьи, список литературы (более 10 наименований), транслитерацию списка литературы в романском алфавите, сведения об авторах и библиографическое описание статьи на русском и английском языках;

рукопись статьи оформляется в соответствии с образцом;

сведения об авторах включают в себя фамилию, имя, отчество, ученую степень и звание, место работы с указанием почтового адреса, должность, контактные телефоны, e-mail для обратной связи;

один экземпляр текста статьи должен быть подписан всеми авторами на оборотной стороне каждой страницы.

Требования к аннотации статьи:

аннотация должна быть кратким точным изложением содержания статьи, включающим в себя основные фактические сведения и выводы описываемой работы;

текст аннотации должен быть лаконичным и четким, свободным от второстепенной информации, должен отличаться убедительностью формулировок;

сведения, содержащиеся в заглавии статьи, не должны повторяться в тексте аннотации;

объем аннотации на русском и английском языках должен содержать от 200 до 250 слов;

аннотация на русском и английском языках должна включать в себя следующие аспекты содержания статьи: предмет, цель работы; метод или методологию проведения работы; результаты работы; область применения результатов; выводы;

дополнительно англоязычная аннотация должна быть оригинальной (не быть калькой русскоязычной аннотации); содержательной (отражать основное содержание статьи и результаты исследований); структурированной (следовать логике описания результатов в статье); англоязычной (написанной качественным английским языком); необходимо использовать активный, а не пассивный залог.

Требования к рукописи статьи:

рукопись статьи должна содержать УДК (в левом верхнем углу, обычный, 12 пт), инициалы и фамилию на русском языке (по центру, 12 пт), аффилиацию авторов на русском языке (по центру, 10 пт), название статьи на русском языке (по центру, прописными буквами, полужирный, 12 пт), аннотацию на русском языке (курсив, по ширине, 10 пт), ключевые слова на русском языке (курсив, по ширине, 10 пт), инициалы и фамилию на английском языке (по центру, 12 пт), аффилиацию авторов на английском языке (по центру, 10 пт), название статьи на английском языке (по центру, прописными буквами, полужирный, 12 пт), аннотацию на английском языке (курсив, по ширине, 10 пт), ключевые слова на английском языке (курсив, по ширине, 10 пт);

текст статьи должен быть набран в редакторе Word, размер страницы: формат А4 (210 × 297 мм);

размер полей: 20 мм (все четыре поля), размер и тип шрифта основного текста: Times New Roman, 12 пт;

размеры символов в формулах (Equation): обычный – 12 пт, крупный индекс – 7, мелкий – 5, крупный символ – 15, мелкий – 12 пт;

буквы латинского алфавита набираются курсивом, буквы греческого и русского алфавитов, математические символы такие, например, как cos, sin, max, min, – прямым шрифтом;

текст в таблицах, подрисовочные подписи и названия таблиц набираются шрифтом Times New Roman, 10 пт;

межстрочный интервал одинарный, абзацный отступ – 0,75 см;

каждый рисунок дополнительно должен быть представлен в оригинальном файле (формат JPEG или TIFF, разрешение – не ниже 300 пикс/дюйм);

рисунки, выполненные в редакторе Word, должны быть вставлены как объект;

после текста статьи следует список литературы на русском языке и в романском алфавите (латинице) с переводом названий литературных источников на английский язык;

ссылки на литературу в тексте статьи указываются в квадратных скобках, список литературы имеет заголовки *Список литературы* (не более 10 наименований), библиографическое описание источников на русском языке оформляется по требованиям ГОСТ 7.1-2003;

в романском алфавите (латинице) список литературы имеет заголовок *References* и оформляется по следующему образцу: Author1 A.A., Author2 A.A., Author3 A.A., Author4 A.A., Author5 A.A. Title of article [Nazvanie stat'i v romanskom alfavite]. Nazvanie zhurnala v romanskom alfavite – *Title of Journal*, 2014, no. 1, pp. 54 – 57.

Рукописи статей, опубликованных ранее или переданных в другие издания, не принимаются.

Число соавторов не должно превышать трех человек. Рекомендуемый объем статьи – не менее пяти и не более 10 страниц. В ином случае вопрос по объему статьи необходимо согласовать с редакцией журнала. Иллюстрации, схемы, таблицы, включаемые в текст статьи, учитываются в общем объеме текста.

Авторы должны избегать повторения одних и тех же данных в таблицах, на графиках и в тексте статьи.

В случае представления двух или более статей одновременно необходимо указывать желательную очередность их публикации.

В случае возвращения статьи автору для устранения замечаний или для ее сокращения датой представления статьи считается день получения редакцией журнала окончательного текста.

Принятые к публикации рукописи статей не возвращаются авторам.

Материалы, оформленные не в соответствии с указанными выше требованиями, не принимаются к публикации и не возвращаются.

Редакционный совет оставляет за собой право литературного редактирования статьи без согласования с авторами.

Научное издание

Научно-технический журнал «Известия Транссиба»

№ 3 (27) 2016

Научно-технический журнал «Известия Транссиба» зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор) 3 июня 2009 г., свидетельство о регистрации СМИ ПИ № ФС77-66605 от 21 июля 2016 г.

Номер ISSN – 2220-4245.

Подписной индекс в общероссийском каталоге НТИ агентства «Роспечать» – 66087.

Издание обрабатывается в системе Российского индекса научного цитирования (РИНЦа).

Журнал включен в Перечень российских рецензируемых научных журналов, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук.

Издание выходит с периодичностью 4 номера в год.

Цена свободная.

Редактор – Майорова Н. А.

Компьютерная верстка – Захаренко Е. И.

Адрес редакции (издательства) и типографии: 644046, г. Омск, пр. Маркса, 35;
тел.: (3812) 31-05-54; e-mail: izvestia_transsiba@mail.ru

Подписано в печать 28.11.2016.

Тираж 500 экз.

Дата выпуска: 30.11.2016.

