

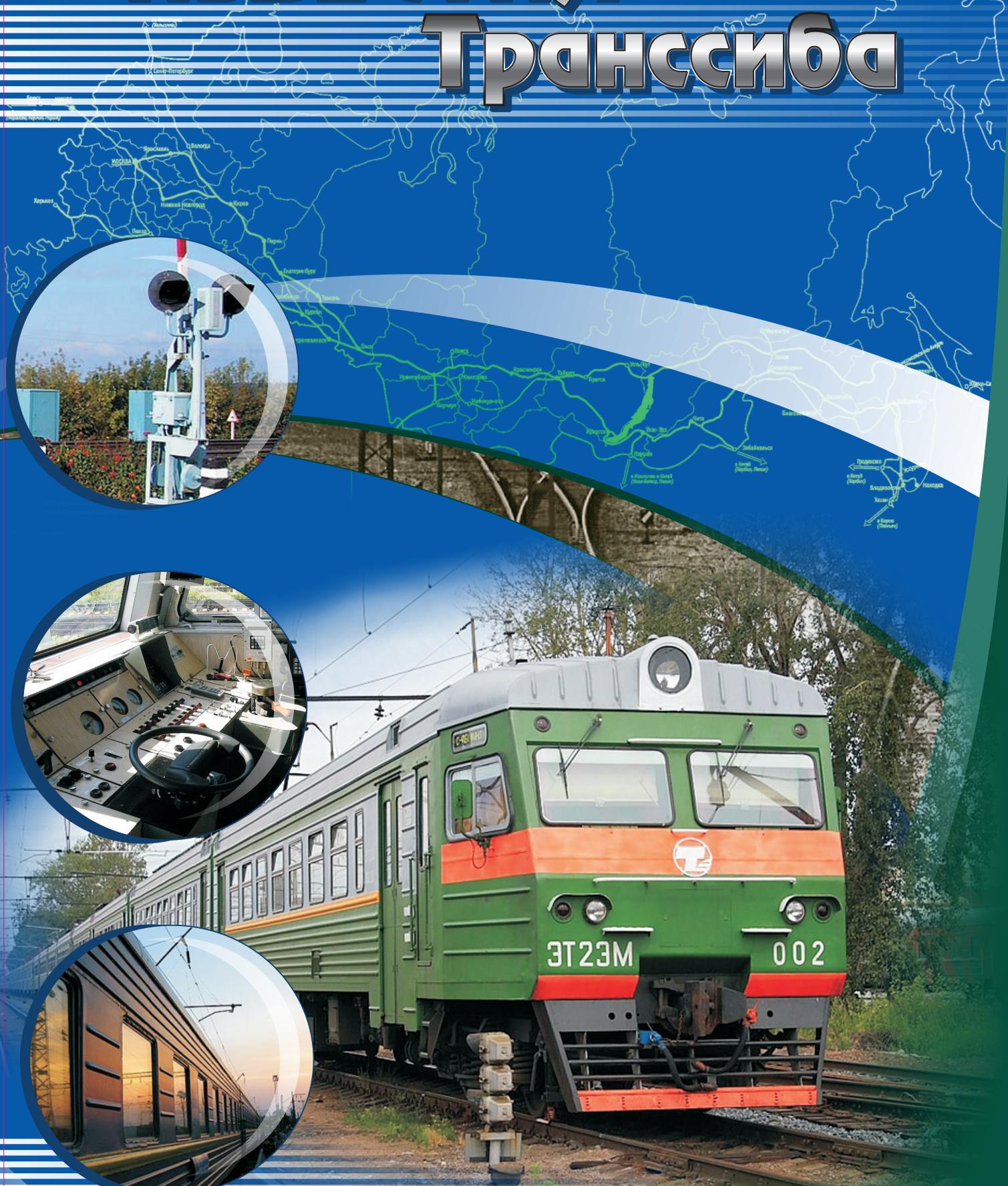
научно - технический

ISSN 2220-4245

журнал

ИЗВЕСТИЯ Транссиба

№ 3(11)
2012



**РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ
ЖУРНАЛА**

- 1. Галиев Ильхам Исламович** – главный редактор, президент ОмГУПСа, д.т.н., профессор, заслуженный деятель науки и техники РФ.
- 2. Черемисин Василий Титович** – зам. главного редактора, проректор по научной работе и инновациям ОмГУПСа, д.т.н., профессор.
- 3. Володин Александр Иванович** – первый проректор ОмГУПСа, д.т.н., профессор, заслуженный деятель науки РФ.
- 4. Бокарев Сергей Александрович** – проректор по научной работе СГУПСа, д.т.н., профессор (Новосибирск).
- 5. Бирюков Виталий Васильевич** – проректор по научной работе СибАДИ, д.э.н., профессор (Омск).
- 6. Каргапольцев Сергей Константинович** – проректор по научной работе ИрГУПСа, д.т.н., профессор (Иркутск).
- 7. Косарев Александр Борисович** – зам. генерального директора ОАО «ВНИИЖТ», д.т.н., профессор (Москва).
- 8. Косьых Анатолий Владимирович** – проректор по научной работе ОмГТУ, д.т.н., профессор (Омск).
- 9. Серенко Андрей Федорович** – проректор по научной работе ДВГУПСа, д.т.н., доцент (Хабаровск).
- 10. Чугуй Юрий Васильевич** – зав. лабораторией конструкторско-технологического института научного приборостроения СО РАН, д.т.н., профессор, заслуженный деятель науки РФ (Новосибирск).
- 11. Шантаренко Сергей Георгиевич** – д.т.н., начальник НИЧ ОмГУПСа (Омск).
- Захаренко Елена Игоревна** – ответственный секретарь (Омск).

СОДЕРЖАНИЕ

Подвижной состав железных дорог

Бабенко Э. Г., Кузьмичев Е. Н., Новачук Я. А. К вопросу применения керамических флюсов на основе минеральных концентратов для восстановления деталей подвижного состава	2
Балагин Д. В. Исследование надежности работы и средств диагностирования технического состояния топливной аппаратуры дизелей	7
Белан Д. Ю., Ражковский А. А. Повышение эксплуатационных характеристик электрических машин методом химико-термической обработки	14
Володин А. И., Сергеев С. В., Кирьяков М. Н. Применение микропроцессорных систем управления электропередачей тепловозов для реализации оптимальных режимов работы дизелей	18
Громов А. Ю. Экспериментальные исследования вагонного кондиционера с повышенной термодинамической эффективностью	23
Гурова Е. Г. К применению супермагнитов в устройствах виброзащиты подвижного состава	30
Маслов Г. П., Чепурко А. Е. Рациональная аэродинамическая характеристика токоприемника по условиям токосъема	34
Матяш Ю. И., Крохин С. Н., Сосновский Ю. М. Применение современных физико-химических подходов к оценке теплопроводности на примере тормозных колодок	40
Томилова О. С. Расчет эффективности УФ-стерилизатора модернизированной системы водоснабжения пассажирского вагона	46
Шилер В. В. Результаты исследований напряженного состояния рельсов и геометрии их поверхностей катания	54

Транспортная энергетика

Кандаев В. А., Авдеева К. В., Слептерева Н. К. Оценка коррозионной опасности алюминиевых кабелей в полимерном изолирующим покрове в условиях работы электрифицированного железнодорожного транспорта	59
Кандаев В. А., Мухин В. А., Сырецкая А. О. Определение поляризационных параметров заземляющих устройств	65
Комякова О. О., Комяков А. А., Вильгельм А. С. Анализ качества электрической энергии, возвращаемой инверторами тяговых подстанций постоянного тока в сеть энергосистем	71
Милованова Е. А., Милованов А. А., Милованов А. И. Применение идеи «передачи Нечаева» при разработке компоновочной схемы тягового привода локомотива с параллельными потоками мощности	78
Пустоветов М. Ю. О прямом пуске асинхронного двигателя с двухступенчатой компенсацией реактивной мощности в составе вспомогательного привода электровоза	83
Соколов М. М. Контроль технического состояния линии электроснабжения устройств железнодорожной автоматики	88

Информационные технологии, автоматика, связь, телекоммуникации

Альтман Е. А., Елизаров Д. А. Повышение точности оценки параметров сигналов в электрической сети в системе тягового электроснабжения	95
Грицутенко С. С., Сидоренко А. С. Компенсация эффекта Доплера в OFDM-сигнале	100
Шахов В. Г., Вишнякова Е. П. Логистика как прикладная задача технической кибернетики	106

Путь и искусственные сооружения

Мещеряков В. Б., Аунг З. Л. Поведение тонкостенных стержней при ударных нагрузках	113
АННОТАЦИИ	124

УДК 621.791.75

Э. Г. Бабенко, Е. Н. Кузьмичев, Я. А. Новачук

К ВОПРОСУ ПРИМЕНЕНИЯ КЕРАМИЧЕСКИХ ФЛЮСОВ НА ОСНОВЕ МИНЕРАЛЬНЫХ КОНЦЕНТРАТОВ ДЛЯ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ ПОДВИЖНОГО СОСТАВА

Представлены результаты экспериментальных исследований по созданию легирующих вольфрамодержащих керамических флюсов для автоматической наплавки углеродистых и низколегированных сталей на основе многокомпонентного минерального сырья Дальнего Востока. Созданы флюсы, при использовании которых содержание вольфрама в наплавленном металле составляет 0,3 – 6,9 мас. % и можно формировать покрытия с широким диапазоном эксплуатационных свойств.

Инвентарный парк тепловозов ОАО «РЖД» составляет 20,3 тыс. единиц, из них 9,8 тыс. электровозов и 10,5 тыс. тепловозов, около 33 % приходится на локомотивы со сроком службы от 20 до 25 лет. Фактический износ локомотивов на 2011 г. достиг 78,7 %, при этом по электровозам он составляет 75,2 %, а по тепловозам – 82,2 [1].

Для обеспечения надежной и экономичной работы локомотивов предпринимаются попытки их модернизации с заменой основных узлов на новые при производстве капитального ремонта. Одновременно идет обновление парка за счет поставки новых локомотивов. Однако огромные затраты труда и капитала приходятся на долю текущих и средних ремонтов, которые выполняются в базовых локомотивных депо по планово-предупредительной системе ремонта.

При выполнении текущих видов ремонта успешно применяют современные технологии восстановления узлов и деталей, которые обеспечивают долговечность отремонтированных узлов. Важное значение в этой связи приобретают и сварочно-наплавочные технологии восстановления изношенных деталей.

До 80 % деталей, выбраковываемых при ремонте, после восстановления пригодны к дальнейшей эксплуатации. Опыт показывает, что себестоимость такого ремонта, как правило, не превышает 65 – 70 % стоимости новых изделий, а расход материалов в 15 – 20 раз меньше, чем на их изготовление [2]. Известно, что большинство выбракованных по износу деталей теряют не более 2 % исходной массы, при этом прочность практически остается на прежнем уровне. По целому ряду наименований наиболее металлоемких и дорогостоящих изделий их вторичное использование значительно больше, чем потребление новых запасных частей. Отмеченное особенно характерно для железнодорожного подвижного состава.

В настоящее время в ремонтной практике подвижного состава широкое применение находят сварочно-наплавочные технологии, причем предпочтение отдается механизированной электрической наплавке под флюсом, которая позволяет наносить слои большой толщины, имеет высокую производительность, дает более широкие возможности при формировании наплавленных покрытий.

В конструкциях подвижного состава основным материалом являются стали в виде отливок или проката различного профиля. В связи с тяжелыми условиями эксплуатации (большие динамические, знакопеременные и ударные нагрузки) применяемые стали должны характеризоваться высокими физико-механическими свойствами, быть ремонтопригодными, иметь хорошую свариваемость и в то же время быть относительно недорогими. Данным требованиям наиболее полно удовлетворяют конструкционные и низколегированные стали, которые и превалируют в металлоемких узлах подвижного состава. Основными легирующими элементами этих сталей являются кремний и марганец в пределах 0,05 – 0,5 и 0,25 – 1,8 мас. % соответственно. В незначительных количествах присутствуют хром и никель. Аналогичные свойства имеют и низколегированные стали, в частности содержащие вольфрам в пределах 0,5 – 1,5 мас. %. [3]

При восстановлении изношенных поверхностей особое внимание следует уделять тому,

Подвижной состав железных дорог

чтобы наплавленный металл (особенно работающий в тяжелых условиях эксплуатации) характеризовался высокими физико-механическими свойствами, которые достигаются введением в формируемые покрытия легирующих элементов. Основные способы легирования покрытий при автоматической наплавке под флюсом заключаются в использовании легирующего электродного (присадочного материала) и нелегирующего флюса и в применении нелегирующего электродного материала и легирующего флюса.

Экономически выгодные масштабы внедрения в ремонтное производство первого способа существенно ограничиваются в первую очередь сложностью производства и высокой стоимостью легированной проволоки. Так, например, цена таких элементов (добавляемых в углеродистую сталь при ее легировании), как марганец, хром, титан, вольфрам, молибден, превышает цену железа в 10, 20, 25, 90, 120, 170 раз соответственно. Кроме того, легированная проволока существенно усложняет технологический процесс наплавки, сокращает сроки эксплуатации сварочного оборудования.

Следует также отметить, что легирующие элементы, поступающие в сварочную ванну с проволокой и присадочным материалом, подвергаются большим потерям (окислению), вызывают в сварочном шве и в зоне термического влияния значительные внутренние напряжения, усложняют metallургические процессы. Все это не дает возможности точно подобрать необходимый присадочный материал (ввиду его ограниченной номенклатуры) для формирования в наплавленном металле свойств, равнозначных свойствам основного металла.

Отмеченное дает основание считать более целесообразным при восстановлении деталей использование второго варианта, т. е. формирование покрытий с необходимыми свойствами за счет использования легирующих флюсов. При этом в качестве электродного материала следует применять сравнительно дешевую низкоуглеродистую сварочную проволоку.

Результаты исследований [3 – 6] показывают, что минеральные концентраты, минуя стадию глубокой технологической переработки и извлечения чистого вольфрама, могут быть использованы в шихте флюсов для легирования низкоуглеродистой сварочной проволоки. В связи с этим при восстановлении деталей локомотивов и вагонов предлагается использовать керамические легирующие флюсы в сочетании с недорогой низкоуглеродистой сварочной проволокой.

Для решения поставленной задачи на начальном этапе в качестве основы шихты флюсов использовался шеелитовый концентрат, содержащий до 30 % CaWO₄, флюоритовый концентрат (CaF₂) и графит. По химическому составу разработанные флюсы согласно рекомендациям Международного института сварки (МИСа) относятся к группе фторидно-основных (FB). Экспериментальная проверка возможности использования флюса проводилась на ряде опытных наплавок с использованием низкоуглеродистой сварочной проволоки Св-08А на подложке из низкоуглеродистой стали марки Ст3.

В результате проведения опытных наплавок с флюсами установлено, что они не имеют технологических свойств, необходимых при автоматической сварке под флюсом.

Возбуждение дуги происходит не в зоне сварочной ванны, а между электродной проволокой и поверхностным слоем сухого флюса и приводит к ее отгоранию через интервал 10 – 15 мм без образования на подложке сварочной ванны. Такая особенность процесса вызвана, по нашему мнению, наличием в шихте флюса токопроводящего графита.

Для исследования влияния графита на технологические свойства флюсов при автоматической сварке была проведена серия опытных наплавок с различным содержанием углерода в составе шихты флюса. Установлено, что наиболее технологичными являются флюсы с содержанием графита в шихте не более 3 %. При сварке с помощью этих флюсов происходит качественное формирование шва, они обеспечивают защиту сварочной ванны от воздействия окружающей атмосферы, хорошую отделимость шлаковой корки. Однако такого количества графита оказалось недостаточно для полного восстановления вольфрама, что было подтверждено химическим анализом металла швов и шлака (таблица 1).

Как показали результаты опытов, использовать углерод в качестве восстановителя

Подвижной состав железных дорог

вольфрама нецелесообразно, так как в этом случае не обеспечивается полный переход вольфрама из шлаковой ванны в металл шва. Поэтому следующий этап исследований предусматривает выбор других восстановителей, обеспечивающих требуемую технологичность флюса и максимальный переход легирующего элемента в переплавляемую электродную сталь.

Таблица 1 – Химический состав опытного сплава и шлака после переплава

Флюс	Материал	Содержание компонентов, мас. %							
		C	W	Si	Mn	Ti	Al	Ca	Mg
ОФА1	Металл	0,02	0,1	0,03	0,20	0,03	0,02	–	0,01
	Шлак	–	6,6	2,2	0,32	0,09	2,0	>11	0,02
ОФА2	Металл	0,03	0,7	0,04	0,30	0,05	0,02	–	0,01
	Шлак	–	5,8	2,1	0,35	0,06	2,1	>9	0,03
ОФА3	Металл	0,06	1,4	0,02	0,30	0,08	0,03	–	0,01
	Шлак	–	4,7	2,4	0,40	0,07	2,0	>8	0,02

Согласно термодинамическим расчетам наиболее близкими к свойствам графита являются кремний и алюминий, что и подтверждается температурной зависимостью потенциала Гиббса ΔG , (кДж/моль), полученной согласно расчетам (таблица 2) по предполагаемым реакциям:

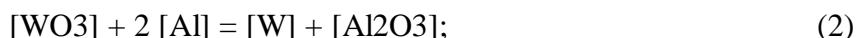


Таблица 2 – Потенциал Гиббса ΔG , кДж/моль

Temperatura, K	Восстановитель		
	C	Al	Si
200	34,68	-194,29	-124,25
400	22,121	-191,62	-123,57
600	9,904	-188,75	-122,79
800	-2,038	-185,38	-122,03
1000	-13,691	-181,11	-121,14
1200	-25,142	-176,72	-120,17
1400	-36,457	-172,33	-119,22
1600	-47,046	-167,31	-116,36
1800	-55,966	-160,74	-113,67

В качестве активных раскислителей при формировании шихты флюса были использованы флюорит, порошок алюминия и ферросилиций, а для увеличения степени неравновесности шлаковой ванны, улучшения условий формирования необходимых параметров шва и облегчения шлакоотделения добавлялся гранит в количестве 10 мас. % (таблица 3).

Таблица 3 – Состав опытных флюсов

Флюс	Состав, мас. %					Основность, В
	шеелит	флюорит	гранит	Al	FeSi	
ОФА1.2	70	20	10	–	–	3,41
ОФА2.2	60	15	10	15	–	3,37
ОФА2.3	60	15	10	–	15	3,49

Проверка сварочно-технологических свойств созданных флюсов показала их пригодность для практического использования: дуга устойчива, формирование шва и шлакоотделение хорошие, газопроницаемость удовлетворительная, коэффициент формы шва колеблется от 1,47 до 1,73, что практически исключает подрезы и залегания протяженных шлаковых включений.

Несмотря на практически одинаковое количество шеелита во всех рассматриваемых сис-

Подвижной состав железных дорог

темах разница содержания вольфрама в наплавленных покрытиях отличается на значительную величину (таблица 4), что объясняется различной степенью активности раскислителей. Так, при использовании во флюсе только флюорита количество перешедшего вольфрама составляет 1,83 мас. %. Добавление в шихту порошка алюминия (флюс ОФА2.2) и ферросилиция (флюс ОФА2.3) увеличивает содержание вольфрама до 3,22 и 6,9 мас. % соответственно. Таким образом, экспериментальная проверка показывает, что из созданных флюсов наиболее рациональный состав шихты имеет флюс ОФА2.3, мас. %: шеелитовый концентрат – 60; гранит – 10; флюорит – 15; ферросилиций – 15.

Таблица 4 – Химический состав покрытий, наплавленных под опытными флюсами

Флюс	Состав покрытий, мас. %					
	C	W	Mn	Si	S	P
ОФА2.1	0,060	1,83	0,87	0,34	0,035	0,028
ОФА2.2	0,055	3,22	0,70	0,83	0,038	0,023
ОФА2.3	0,056	6,90	0,75	0,51	0,036	0,024

Наиболее распространенным в ремонтной практике подвижного состава в настоящее время является флюс марки АН-348 [7, 8]. В связи с этим был проведен сравнительный анализ физико-механических свойств металла, наплавленного с помощью опытного флюса, и металла, наплавленного с помощью флюса АН-348. Наплавка велась низкоуглеродистой сварочной проволокой Св-08А, в качестве подложки использовалась низкоуглеродистая сталь обычного качества марки Ст3. В результате проведенных исследований установлено, что покрытия, наплавленные с помощью разработанных керамических легирующих флюсов, по сравнению с покрытиями, полученными с использованием плавленого флюса АН-348, имеют больший предел прочности, превышают значения твердости и ударную вязкость (таблица 5).

Таблица 5 – Механические свойства покрытий, наплавленных с использованием плавленых флюсов и разработанных керамических флюсов

Свойства покрытий	Флюс			
	АН-348А	ОФА2.1	ОФА2.2	ОФА2.3
$\sigma_{\text{в}}$, кгс/мм ²	42	47	46	45
α_h , кгс·м/см ²	18,3	18,4	18,5	18,7
α_{h45} , кгс·м/см ² T = -60°C	4,2	5,6	5,5	5,3
НВ	185...205	179...192	228...245	246...262
Коэффициент формы шва	1,48...1,54	1,47...1,52	1,58...1,61	1,71...1,73
Угол загиба, град	180	180	180	180

В отличие от покрытий, сформированных с помощью флюса АН-348, ударная вязкость металла, наплавленного с помощью разработанных керамических флюсов, сохраняет свои значения при воздействии низкой температуры.

Коэффициент износстойкости покрытий, наплавленных с помощью керамических легирующих флюсов, составляет от 1,04 до 1,35, в то время как покрытия, наплавленные под флюсом АН348, имеют коэффициент износстойкости 0,87 (рисунок).

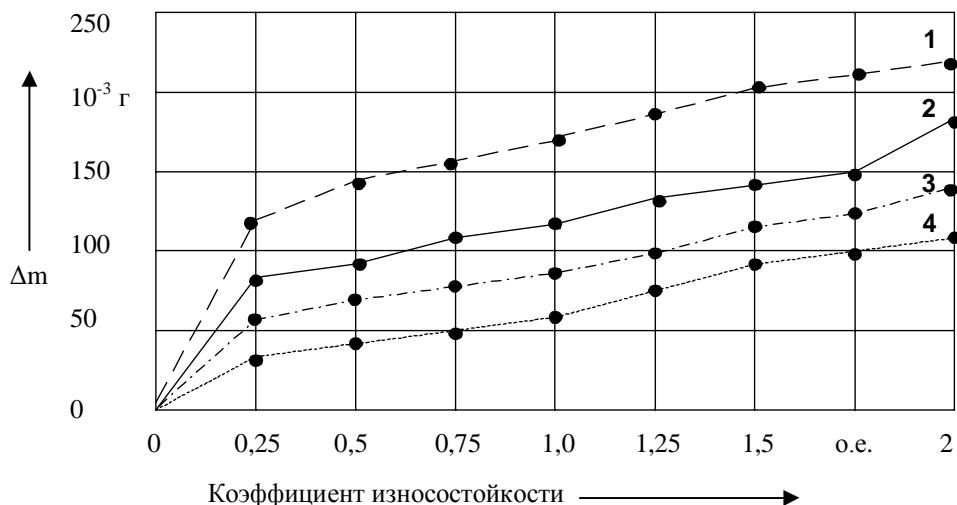
Покрытия, сформированные с использованием керамических легирующих флюсов на основе комплексного использования шеелитового концентрата, показывают высокую работоспособность в условиях ударных нагрузок, вибраций, имеют высокую износстойкость, что соответствует условиям эксплуатации деталей подвижного состава.

Результаты опытной проверки показывают, что при восстановлении деталей подвижного состава с использованием разработанных авторами керамических легирующих флюсов можно получать вольфрамсодержащие покрытия, формируемые в широком диапазоне физико-механических свойств. Разработанная методика позволяет подбирать состав компонентов флюса в зависимости от требуемых эксплуатационных свойств восстанавливаемой детали.

Результаты исследований показывают, что опытный флюс марки ОФА 2.1 может быть использован при восстановлении деталей, изготовленных из углеродистых сталей марок Ст3 - Ст5, таких как шейки валов вертикальной передачи и изношенные места в эластичных муф-

Подвижной состав железных дорог

таких приводов. Опытный флюс ОФА 2.3 можно рекомендовать для наплавочных работ деталей, изготовленных из сталей марок 20, 45, 60Г и т. п., например, поверхностей трения балансиров, деталей пружинного опорно-осевого подвешивания тяговых электродвигателей, рессорных подвесок и опор рессор, т. е. тех деталей, где требуется повышенная износостойкость восстанавливаемых поверхностей. Флюс ОФА 2.2 можно использовать для восстановления наплавкой стаканов, втулок, стоек пружинных гнезд экипажной части локомотивов, изношенных частей шкворневых и надрессорных балок и под пятников вагонов, изготовленных из сталей марок 35ЛН, 25ФЛ, 20ГЛ и т. п.



Потери массы покрытий относительно закаленной стали 40ХН:
покрытие, нанесенное с флюсом АН-348 (1), с флюсом ОФА2.1 (2),
с флюсом ОФА2.2 (3) и с флюсом ОФА2.3 (4)

Технология производства предлагаемых флюсов достаточно проста, не требует больших затрат на сложное оборудование и поэтому может быть организована в местах добычи минерального сырья, которое без первичной технологической переработки и извлечения чистых элементов используется для производства сварочно-наплавочных материалов.

Таким образом, концентрируя изношенные детали подвижного состава на специализированных предприятиях или участках ремонта, можно организовать восстановление этих деталей с формированием необходимых эксплуатационных свойств.

Список литературы

1. Воротилкин, А. В. Локомотивному комплексу – устойчивое развитие [Текст] / А. В. Воротилкин. Локомотив. – 2012. – №1 – С. 2 – 4.
2. Восстановление деталей машин: технология и оборудование [Текст] / В. Е. Конарчук, А. Д. Чигринец и др. – М.: Транспорт, 1995. – 303 с.
3. Терещенко, Н. А. Конструкционные стали. Неорганическое материаловедение в СССР [Текст] / Н. А. Терещенко. – Киев. – Наукова думка, 1983. С. 42 – 96.
4. Бабенко, Э. Г. Основные аспекты транспортного минералогического материаловедения [Текст] / Э. Г. Бабенко, А. Д. Верхотуров, В. Г. Григоренко. – Владивосток: Дальнаука, 2004. – 224 с.
5. Бабенко, Э. Г. Разработка и исследование легированных сталей, полученных электрошлаковым переплавом низкоуглеродистой стали с использованием минеральных ассоциаций [Текст] / Э. Г. Бабенко, А. Д. Верхотуров, Е. Н. Кузьмичев // Перспективные материалы. – № 1. – 2003. – С. 67 – 72.
6. Каллиников, В. Т. Перспективы использования минерально-сырьевой базы Карело-Кольского региона для производства сварочных материалов – электродов и флюсов [Текст] /

Подвижной состав железных дорог

В. Т. Каллиников, А. И. Николаев, Ю. Д. Брусницын // Вопросы материаловедения. – 2006. – № 1 (45). – С. 201 – 219.

7. Инструкция по сварочным и наплавочным работам при ремонте тепловозов, электропоездов, электропоездов и дизель-поездов [Текст]. – М., 1996. – 236 с.

8. Инструкция по сварке и наплавке при ремонте грузовых вагонов [Текст]. – М.: Транспорт – Трансинфо, 1999. – 255 с.

УДК 629.424.3:621.436

Д. В. Балагин

ИССЛЕДОВАНИЕ НАДЕЖНОСТИ РАБОТЫ И СРЕДСТВ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ТОПЛИВНОЙ АППАРАТУРЫ ДИЗЕЛЕЙ

В статье выполнен анализ отказов и эффективности средств диагностирования технического состояния топливной аппаратуры дизелей в условиях эксплуатации.

Система впрыска топлива является одной из важнейших систем дизеля, она предназначена для обеспечения нормального питания дизеля топливом при различных режимах его работы. От степени совершенства топливной системы и ее технического состояния в процессе эксплуатации в значительной степени зависят показатели рабочего процесса дизеля, его надежность и долговечность, а также эксплуатационные характеристики [1].

В связи с этим к топливным системам дизелей предъявляются высокие требования, связанные с эффективностью их работы, надежностью, долговечностью, простотой обслуживания и ремонта и др.

К топливной аппаратуре (ТА) тепловозов предъявляются следующие основные требования:

- стабильность показателей рабочего процесса в течение всего периода эксплуатации дизеля;
- удобство обслуживания отдельных узлов и регулирования, возможность монтажа и демонтажа форсунок и насосов, разборки и замены отдельных изношенных деталей;
- надежная работа всех узлов в течение установленного срока службы;
- обеспечение необходимых скоростных и нагрузочных характеристик подачи топлива;
- возможность изменения угла опережения подачи в зависимости от режимных условий работы дизеля;
- устойчивая работа дизеля на малых скоростных и нагрузочных режимах без пропусков подач топлива отдельными форсунками;
- возможность прокачки объемов с целью удаления из них воздуха и отвода паров топлива из подводящей магистрали [5].

Условия работы тягового подвижного состава в значительной степени влияют на выполнение перечисленных требований к качеству работы топливной аппаратуры тепловозов.

Анализ результатов диагностирования топливной аппаратуры показывает, что основными неисправностями топливных форсунок и насосов высокого давления являются следующие: малый подъем и «подклинивание» иглы; закоксовывание сопловых наконечников; излом или «просадка» пружины форсунки; малая плотность плунжерных пар; нестабильность цикловой подачи и нестабильность впрыска топлива; потеря упругости пружин плунжера и нагнетательного клапана; потеря герметичности нагнетательного клапана по запирающему конусу.

Основные и часто возникающие причины неисправностей топливной аппаратуры высокого давления тепловозных дизелей можно свести к следующим: несвоевременное и неква-

Подвижной состав железных дорог

лифицированное техническое обслуживание; нарушение режимов эксплуатации дизеля; использование топлива низкого качества и нарушения в работе фильтров; естественный износ трущихся прецизионных пар [4].

Если учесть общеизвестный факт, что большой процент отказов дизелей приходится на топливную аппаратуру, то становится очевидным, что в общем объеме издержек основную часть составляют топливные потери.

Анализ отчетных данных ОАО «РЖД» за период с 2005 по 2010 г. позволил установить процентное соотношение неисправностей основных узлов тепловозов, возникающих в процессе эксплуатации [8 – 13].

Согласно отчетным данным ОАО «РЖД» 2005 – 2010 гг. и отчетам РБ-2Т за 2005 – 2010 гг. (таблица 1) общий процент неисправностей по дизельному оборудованию локомотивов по всем дорогам ОАО «РЖД» составил 40 % от всех отказов на ТПС, в том числе 12 – 13 % по топливной аппаратуре. Круговая диаграмма распределения неисправностей по основным узлам тепловозов представлена на рисунке 1.



Рисунок 1 – Процентное соотношение неисправностей по основным узлам тепловозов за период 2005 – 2010 гг.

Таблица 1 – Процентное соотношение неисправностей по основным узлам тепловозов за период 2005 – 2010 гг.

Узлы локомотива	Отчетный период, г						
	2005	2006	2007	2008	2009	2010	В среднем
Дизель	38,6	39,41	42,32	41,08	39,02	41,07	40,25
Вспомогательное и тормозное оборудование	15,16	14,49	14,09	15,89	15,66	15,14	15,07
Электрическое оборудование	33,84	32,72	32,76	30,80	31,21	31,95	32,21
Колесные пары	6,84	6,48	6,51	7,05	6,98	7,15	6,84
Прочее оборудование	5,90	6,49	3,78	5,51	6,85	5,23	5,63

Распределение количества отказов по узлам и системам дизелей за указанный период эксплуатации представлено в таблице 2 и в виде круговой диаграммы на рисунке 2.

Подвижной состав железных дорог

Таблица 2 – Распределение количества отказов по узлам и системам дизелей за период 2005 – 2010 гг.

Год	Доля в общем количестве					
	порч и неисправностей	коленчатый вал и его подшипники	цилиндропоршневая группа	топливная аппаратура	система охлаждения дизеля	воздухонагнетатели
2005	38,6	3,08	16,30	4,97	8,01	6,24
2006	39,41	4,04	16,05	4,82	7,68	6,82
2007	42,32	4,82	17,18	5,45	8,72	6,15
2008	41,08	4,71	17,45	4,92	7,25	6,75
2009	39,02	3,58	15,44	5,12	8,24	6,64
2010	41,07	4,79	16,63	4,64	8,12	6,89

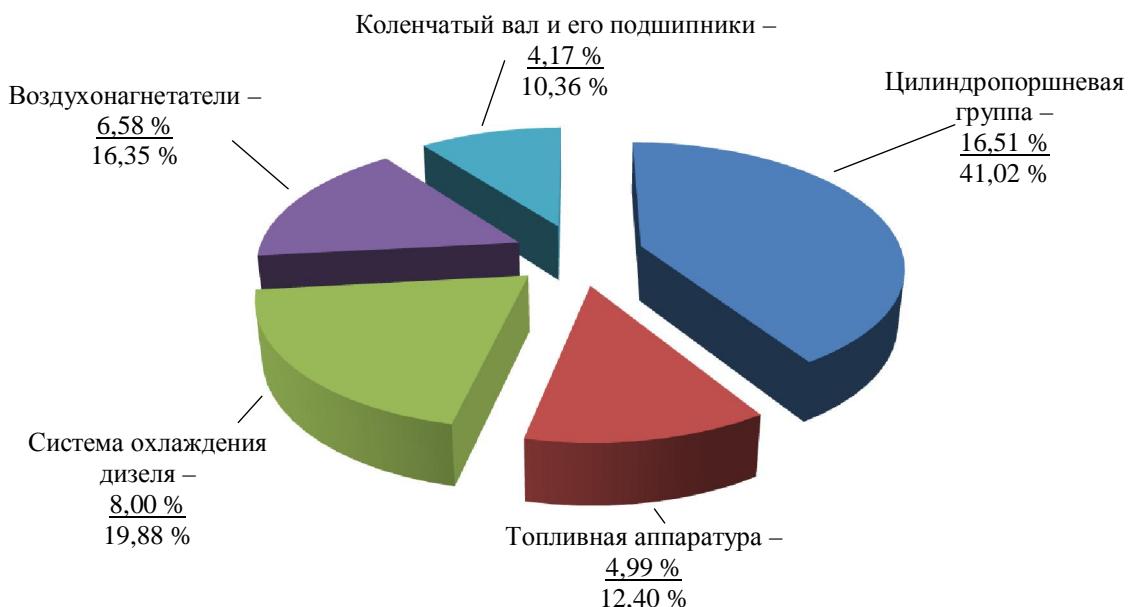


Рисунок 2 – Процентное соотношение неисправностей по дизелю за период 2005 – 2010 гг.: числитель – доля в общем количестве неисправностей; знаменатель – доля от общего количества неисправностей дизеля

Анализ отчетных данных позволяет сделать вывод о том, что ситуация с надежностью работы топливной аппаратуры, несмотря на широкое внедрение современных средств диагностирования и ремонта, остается без существенных изменений. В среднем за период с 2005 по 2010 г. динамика изменения основных неисправностей топливной аппаратуры дизелей приведена на рисунке 3.

Каждый третий случай непланового ремонта тепловозов связан с выходом из строя топливной аппаратуры. Эксплуатация тепловозов часто характеризуется условиями, когда и отдельные агрегаты, и двигатель в целом работают до частичной потери работоспособности без проведения достаточных профилактических мероприятий. Так, по статистическим данным в условиях эксплуатации число отказов наименее надежных составных частей топливной аппаратуры дизеля происходит по двум явно выраженным причинам:

- закоксовывание распылителя форсунки, нарушение подвижности ее иглы;
- разрегулировка топливного насоса высокого давления (ТНВД), износ плунжерных пар и нагнетательных клапанов, понижение давления впрыска.

Топливная система должна обеспечивать бесперебойную подачу топлива для работы дизеля на любых возможных режимах его эксплуатации. Дизельное топливо при транспортировке и последующем хранении может загрязниться, в него может попадать пыль из воздуха. Возможно засорение дизельного топлива и при экипировке тепловозов, особенно если за-

Подвижной состав железных дорог

правка топливного бака производится одновременно с набором песка или после этой операции [4].

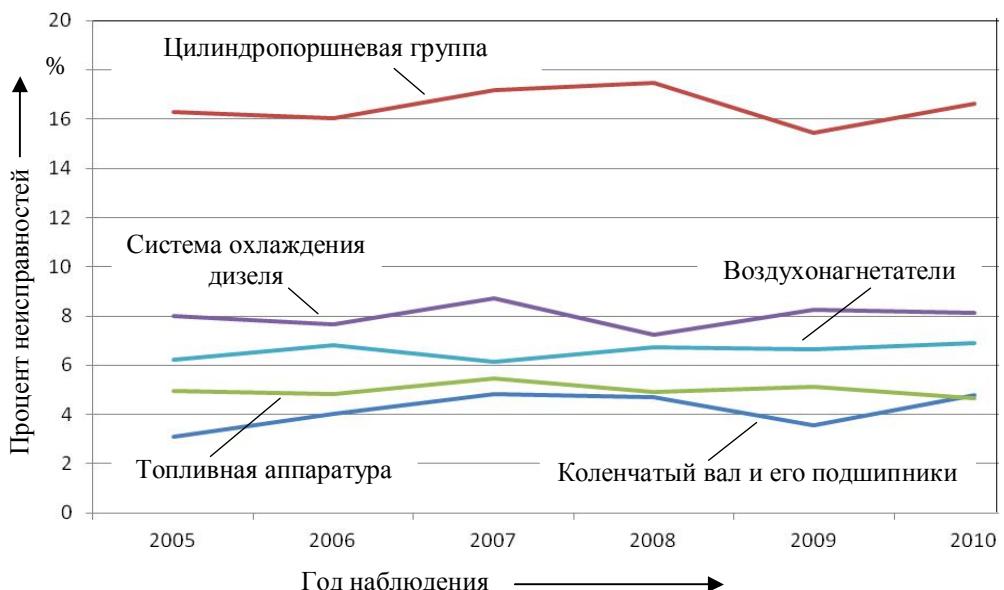


Рисунок 3 – Динамика изменения основных неисправностей топливной аппаратуры тепловозов за период 2005 – 2010 гг.

В результате в дизельное топливо могут попасть вредные для работы системы механические примеси (главным образом мелкие частицы кремне- и глинозема). Эти частицы имеют очень высокую твердость, равную или даже превышающую твердость сталей, применяемых для изготовления деталей топливной аппаратуры. Попадая в зазор между плунжером и гильзой топливного насоса, такие частицы могут заклиниваться в нем и при работе насоса будут истирать поверхности плунжера и гильзы. Заклиниванию частиц способствует также то, что в момент подачи топлива под действием его давления гильза топливного насоса деформируется, как бы «раздается», увеличивается зазор между плунжером и гильзой. В этот увеличенный зазор (он может быть в два – три раза больше первоначального, который составляет 2 – 3 мкм) могут проникать в более крупные частицы. После отсечки и падения давления гильза стягивается и зажимает проникшие в зазор частицы. В результате по мере износа деталей плунжерной пары радиальный зазор между ними возрастает, увеличиваются утечки и снижается давление подачи [5].

Для надежной эксплуатации дизеля необходима постоянная и тщательная очистка топлива, и поэтому в топливную систему дизеля для этой цели обязательно включают топливные фильтры.

Надежная работа форсунок возможна только при строгом выполнении профилактических работ по смене и очистке фильтроэлементов, предотвращающих попадание грязи и воды, соблюдении чистоты при проведении ремонтных операций. Особенно важно не допустить попадания в распылитель из каналов форсунки и топливопроводов технологической грязи (шлам от механических и сварочных работ, продукты износа во время приработки и сборки) в начальный период эксплуатации [6].

Расчеты, выполненные в МИИТе (даже по заниженным оценкам), показывают, что по отмеченным выше причинам дизель магистрального тепловоза в современных условиях эксплуатации перерасходует в среднем в год 14 – 26 т топлива (двухсекционный тепловоз перерасходует цистерну дизельного топлива) и увеличивает выброс в атмосферу вредных компонентов: СО – на 300 – 650 кг, СН – на 120 – 350 кг. При этом отклонение энергоэкономических параметров (мощность и топливная экономичность) от номинальных значений составляет 8 – 15 % и более. Это означает, что в условиях реальной эксплуатации тепловоз будет расходовать топлива на 10 – 18 % больше [1].

Подвижной состав железных дорог

Отказы в эксплуатации говорят о необходимости дальнейшего совершенствования в равной мере как конструкции отдельных узлов, так и системы их технического обслуживания и ремонтов.

К методам контроля технического состояния топливной аппаратуры (ТА) с позиции диагностирования предъявляются следующие требования:

- обеспечение достаточной достоверности результатов диагностирования;
- установление обобщенных параметров, количество которых должно быть меньше общего количества параметров, полностью характеризующих состояние объекта диагностирования;
- определение неисправности по обобщенным параметрам;
- простота и применимость в условиях депо.

Наличие сложной структуры дизель-генераторной установки (ДГУ) и существенное взаимное влияние работоспособности ее блоков предопределило многоуровневую стратегию диагностирования технического состояния и применение разнообразных методов и систем технического диагностирования.

При эксплуатации локомотива, т. е. в поездке, качество работы топливной аппаратуры практически не оценивается (за исключением «прощелкивания» насосов и прослушивания нехарактерных для нормальной работы дизеля стуков). Оснащение тепловозов бортовыми системами контроля проблему контроля технического состояния топливной аппаратуры в полном объеме не решает.

Доведенная до предельного технического состояния топливная аппаратура в соответствии с существующей системой планово-предупредительного ремонта попадает в ремонтное депо. Однако и здесь ее технические характеристики не восстанавливаются в полном объеме.

Стендовое оборудование топливных отделений для испытания топливной аппаратуры морально и технически устарело. В моечных отделениях эксплуатируются (да и то далеко не во всех депо) моечные машины, конструкция которых разрабатывалась в первой половине двадцатого столетия.

Для испытаний в депо топливной аппаратуры разработаны различные модели стендов (A2589, A106, A53, A760 и др.). Не касаясь конструктивных преимуществ и недостатков данных разработок, следует признать их общее «слабое место» в организации цехового ремонта топливной аппаратуры – отсутствие объективного контроля качества выполненных на стенах работ и «обезличивание» элементов топливной системы после снятия с дизеля. Например, подачу насосов регулируют в комплекте с образцовыми (контрольными) трубопроводами высокого давления и форсунками, при этом гидравлические характеристики форсунок и топливных трубок, с которыми реально будут работать данные ТНВД, игнорируются. Испытание форсунок на существующем стенде ведется «на глазок», проверочные режимы далеки от эксплуатационных. Поэтому форсунки, которые проходят стендовый контроль, при постановке на дизель изменяют свои рабочие характеристики [7].

Технологический процесс ремонта и настройки топливных насосов, форсунок и трубопроводов высокого давления состоит из следующих основных операций:

- разборка, промывка и замена неисправных деталей;
- определение размера В насоса (расстояние от торца хвостовика плунжера при перекрытии его головкой всасывающего отверстия в гильзе до привалочной плоскости корпуса насоса);
- определение плотности плунжерных пар топливных насосов;
- обкатка насоса на стенде и регулировка его минимальной и максимальной производительности;
- определение плотности распылителя форсунки;
- проверка разработки отверстий сопловых наконечников форсунки;
- настройка и регулировка форсунки по давлению впрыска на стенде;
- опрессовка нагнетательных трубок для выявления трещин и других дефектов, восста-

Подвижной состав железных дорог

новление конусов путем наплавки с последующей механической обработкой [1].

Проверка разработки отверстий сопловых наконечников форсунок проводится при помощи длинномера. Этот метод позволяет произвести отбраковку сопловых наконечников, имеющих или сильно разработанные, или закоксовые отверстия. Деление годных сопловых наконечников на группы в зависимости от действительного проходного сечения не производится.

При восстановлении конусов трубопроводов меняются проходное сечение и форма трубопровода, т. е. изменяются его гидравлические характеристики.

Разброс гидравлических характеристик форсунок и нагнетательных трубопроводов существующей технологией ремонта при подборе комплекта топливной аппаратуры не учитывается.

В настоящее время в локомотивных депо для диагностирования топливной аппаратуры применяют автоматизированный комплекс «Кипарис» (на сегодняшний день на все дороги ОАО «РЖД» поставлено более 120 комплексов), такие переносные комплексы, как «ДЭСТА», «ИСТАД», ярославская разработка АЛ-030-05, Diesel Master ДМ-100 из Санкт-Петербурга, переносные микропроцессорные устройства для диагностики дизель-генераторных установок «ПМУ ДГУ» разработки НИИТКД и др. [5].

Недостатками применения таких комплексов, как «ДЭСТА», «ИСТАД», а также «Кипарис» является применение большого числа датчиков для снятия информации с оборудования, и нередко установка датчиков на объект диагностирования требует проведения слесарных работ, недостатком является и наличие кабелей связи датчиков с блоком преобразования сигналов. Большое количество датчиков может привести к их неправильной установке, может возникнуть обрыв кабеля [7].

Тепловизионный контроль как метод диагностирования представляет собой метод теплового неразрушающего контроля, основанный на использовании электронных средств тепловидения, на анализе теплового изображения с помощью термограмм, на основании которого принимается экспертное решение о состоянии топливного оборудования. Распределение температуры по поверхности диагностируемого аппарата несет информацию не только о его общем тепловом состоянии, но и о наличии теплопроводных неоднородностей. Распределение температуры фиксируется приборами на термограмме, которая представляет собой цветное плоское тепловое изображение поверхности объекта, где каждому цвету соответствует определенная температура поверхности [3].

Преимуществами тепловизионного контроля являются следующие:

- дистанционность (для ИК-систем – тепловизоров тепловых дефектоскопов);
- высокая скорость обработки информации;
- высокая производительность испытаний;
- возможность контроля при одно- и двустороннем подходе к изделию;
- теоретическая возможность контроля любых материалов;
- многопараметрический характер испытаний;
- возможность взаимодополняющего сочетания тепловизионного неразрушающего контроля с другими видами неразрушающего контроля;
- сочетаемость со стандартными системами обработки информации;
- возможность поточного контроля и создания автоматизированных систем контроля и управления технологическими процессами;
- выявление дефектов неразрушающим методом;
- предотвращение аварий и повреждений оборудования;
- достоверность, объективность и точность получаемых сведений;
- безопасность при проведении обследования оборудования;
- не требуется отключение и демонтаж оборудования;
- большой объем выполняемых работ за единицу времени;
- возможность определения дефектов на ранней стадии развития.

Подвижной состав железных дорог

Сложность внедрения тепловизионного метода связана с тем, что практически не развиты диагностические модели (формализованное описание объекта, необходимое для решения задач диагностирования), отсутствуют термограммы или термопрофилограммы исправного оборудования, их тепловые характеристики.

На основе выполненных теоретических исследований установлено:

– процент отказов топливной аппаратуры тепловозов по сети железных дорог за период с 2005 по 2010 г. сохраняется на высоком уровне;

– выход из строя топливной аппаратуры связан не только с особенностями эксплуатации, но и с несовершенством существующей системы технического обслуживания и ремонта;

– анализ методов и технических средств контроля работы топливной аппаратуры выявил перспективное направление в развитии средств диагностирования. Исследованы возможности применения тепловизионного метода контроля.

Для реализации поставленной задачи на кафедре «Локомотивы» ОмГУПСа выполняются исследование процессов топливоподачи и нагрева узлов топливной системы тепловозного дизеля;

экспериментальные исследования возможности применения тепловизионного метода для контроля работоспособности топливной аппаратуры;

теоретические и экспериментальные исследования оценки состояния топливной аппаратуры и качества протекания рабочего процесса в цилиндре дизеля по температуре топливных трубопроводов высокого давления;

разработка методики оценки рабочего процесса в цилиндрах дизеля по температуре трубопроводов насоса высокого давления.

Список литературы

1. Лышевский, А. С. Питание дизелей: Учебное пособие [Текст] / А. С. Лышевский / Новочеркасский политехн. ин-т – Новочеркаск, 1974. – 468 с.
2. Володин, А. И. Исследование процессов теплопередачи в тепловозном дизеле [Текст] / А. И. Володин, Д. В. Балагин, Ю. С. Комкова // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2011. – № 4 (8). – С. 6 – 10.
3. Алексенко, В. М. Тепловая диагностика элементов подвижного состава: Монография [Текст] / В. М. Алексенко. – М.: Маршрут, 2006. – 398 с.
4. Блинов, П. Н. Модель процесса топливоподачи топливной аппаратурой тепловозных дизелей с учетом технологических характеристик ее деталей [Текст] / П. Н. Блинов, А. П. Блинов // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2010. – № 3 (3). – С. 2 – 7.
5. Блинов, П. Н. Совершенствование технического обслуживания и ремонта топливной аппаратуры тепловозных дизелей: Дис. доктора техн. наук [Текст] / П. Н. Блинов. – Омск, 1986. – 178 с.
6. Четвергов, В. А. Математические модели внезапных отказов деталей локомтивов в эксплуатации [Текст] / В. А. Четвергов // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2011. – № 2 (6). – С. 51 – 59.
7. Блинов, П. Н. Автоматизация стендовых испытаний топливной и регулирующей аппаратуры тепловозных дизелей [Текст] / П. Н. Блинов, А. П. Блинов // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2010. – № 1 (1). – С. 8 – 15.
8. Анализ технического состояния тепловозов и дизельного мотор-вагонного подвижного состава федерального железнодорожного транспорта России за 2005 год [Текст] – М.: Трансиздат, 2006 – 68 с.
9. Анализ технического состояния тепловозов и дизельного мотор-вагонного подвижного состава федерального железнодорожного транспорта России за 2006 год [Текст] – М.: Трансиздат, 2007. – 81 с.

Подвижной состав железных дорог

10. Анализ технического состояния тепловозов федерального железнодорожного транспорта России за 2007 год. – М.: Желдориздат, 2008 [Текст] – 64 с.

11. Анализ технического состояния тепловозов федерального железнодорожного транспорта России за 2008 год. – М.: Желдориздат, 2009 [Текст] – 74 с.

12. Анализ технического состояния тепловозов и дизельного мотор-вагонного подвижного состава федерального железнодорожного транспорта России за 2009 год [Текст] – М.: Желдориздат, 2010. – 64 с.

13. Анализ технического состояния тепловозов и дизельного мотор-вагонного подвижного состава федерального железнодорожного транспорта России за 2010 год [Текст] – М.: Желдориздат, 2011. – 64 с.

УДК 629.423.31

Д. Ю. Белан, А. А. Ражковский

ПОВЫШЕНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН МЕТОДОМ ХИМИКО-ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

Данная статья посвящена описанию методики упрочнения углеродом медной поверхности коллектора. Для улучшения коммутационных характеристик и повышения надежности работы электрических машин предлагается использовать метод химико-термической обработки.

Анализ основных показателей технического состояния локомотивного парка по сети магистральных железных дорог за последние годы показывает, что общее число неисправных локомотивов сохраняется на уровне 10 – 12 %. Наиболее часто выходят из строя электрическая аппаратура – 44 – 55,0 % и тяговые электродвигатели (ТЭД) – 13 – 17 % от общего числа отказов. Неисправности коллекторно-щеточного узла (КЩУ) составляют 10 – 15 % от общего количества отказов ТЭД электровозов [1]. Качество работы электрических машин во многом зависит от работы коллекторно-щеточного узла [2]. Эксплуатация ТЭД постоянно проходит в условиях прерывистого контактного взаимодействия поверхностного слоя медных коллекторных пластин с угольным материалом щетки. На коммутационные характеристики электрической машины существенное влияние оказывают как состояние пары «щетка – коллектор» (шероховатость, слабое нажатие щеток, абразивный износ, заволакивание межщеточного пространства медью, различные дефекты при изготовлении коллектора и т. д.), так и механические свойства коллекторной меди. Известно, что изготавливаются пять марок меди: от М0 с содержанием не менее 99,5 % меди до М4 с содержанием меди не менее 99,0 %. Из этих марок делают проводники тока, а также прокатываемые и литейные сплавы на медной основе. Коллекторные пластины изготавливают из холоднотянутой меди специального трапециoidalного профиля. Для большинства коллекторов применяют медь марок М0, М1, МЛ, а для коллекторов скоростных машин – кадмиевую медь (с содержанием 1% кадмия) с большей механической прочностью, меньшим износом при трении по сравнению с холоднокатаной коллекторной медью и увеличением твердости поверхностного слоя до 80 – 90 НВ, что позволяет улучшить коммутационные характеристики электрических машин постоянно-го тока и увеличить межремонтные пробеги.

Проблема повышения эксплуатационных свойств (износо-, жаро-, коррозионной стойкости) деталей электрических машин постоянного тока, инструментов, приборов методами поверхностного легирования и упрочнения приобретает все большую актуальность. Одним из наиболее перспективных методов упрочнения поверхностей коллекторных пластин тяговых электродвигателей является объемное и поверхностное изменение структуры и свойств термообработкой.

При ремонте коллектора необходимо стремиться получать поверхность коллектора и по-

Подвижной состав железных дорог

лированием коллектора абразивными материалами. Абразивная обработка рабочей поверхности коллектора отрицательно сказывается на работе КЩУ [3, 4]. Для того чтобы обеспечить стабильную передачу тока от щетки к коллектору и безыскровую работу скользящего контакта, предлагается использовать химико-термической метод (ХТМ) обработки. Одним из наиболее широко применяемых вариантов поверхностной обработки являются химико-термические методы. При ХТМ, проводимых с целью повышения эксплуатационных характеристик изделий, изменяются химический состав, структура и свойства поверхностных слоев [5 – 8].

Внедрение дополнительной операции по упрочнению коллекторных пластин в технологическом процессе ремонта углеродом позволит получить высокие эксплуатационные свойства в поверхностных слоях за счет насыщения поверхности коллектора аналогичным материалом щетки (углеродом). Во время приработки на трущихся поверхностях пары «щетка – коллектор» образуется ориентированная пленка графита с низким коэффициентом трения (0,09 – 0,15), который зависит от содержания водяных паров. Десорбированные пары жидкостей значительно улучшают смазывающие свойства графита. Известно, что графит – это минерал – наиболее устойчивая при стандартных условиях кристаллическая модификация углерода. Кристаллическая решетка графита состоит только из атомов углерода.

Медь – малоактивный металл, который характеризуется достаточно высокой стойкостью к коррозии, влажной атмосфере, содержащей углекислый газ. Углерод входит в состав сталей и сплавов в элементном состоянии и в виде карбидов. Насыщение медной поверхности углеродом при высокой температуре значительно увеличивает поверхностную твердость, износостойкость и повышает надежность работы коллекторно-щеточного узла и электрической машины в целом. Поэтому предлагается упрочнить углеродом медные коллекторные пластины методом химико-термической обработки.

Авторами были проведены теоретические и экспериментальные исследования по повышению прочности коллекторных пластин углеродом для создания однородного материала в работе контакта «щетка – коллектор».

В эксперименте среда являлась неоднородной, так как диффундируют два материала в вакууме медь и графит. В практике химико-термической обработки часто имеют дело с реакционной диффузией, когда полученный слой состоит из нескольких фаз, расположенных последовательно одна за другой. Для этих случаев разработаны также методы расчета коэффициентов диффузии.

Предложен новый метод определения коэффициентов диффузии для случая, когда в поверхностной зоне насыщаемого металла образуется несколько последовательно расположенных фаз. По форме концентрационной кривой можно определить коэффициент диффузии во всех полученных фазах, в том числе и в твердом растворе. Предполагается, что коэффициент диффузии в каждой фазе не зависит от концентрации и рост фаз подчиняется параболическому закону. Для расчета коэффициента диффузии в любой фазе достаточно знать положение границ данной фазы в какой-либо момент времени (и соответствующее этому моменту отношение интегральных потоков через эти границы). Эти данные можно получить из экспериментальной концентрационной кривой. Так, например, если при диффузии элемента в металле вначале образуется γ -твердый раствор, а затем по достижении предела насыщения этой фазы возникает и растет слой α -фазы, то коэффициент диффузии в α -фазе может быть рассчитан по формуле:

$$D_{\alpha} = \frac{y_1^2}{4t \ln \left(\frac{M_0}{M_1 - c_1 y_1} \right)},$$

где D_{α} – коэффициент диффузии в α -фазе; y_1 – толщина слоя α -фазы в сантиметрах; t – время в секундах; M_0 – масса диффундировавшего вещества, определяемая общей площадью, ограниченной кривой и осями координат; M_1 – масса продиффундировавшего вещества в части кривой, отвечающей γ -фазе (берется соответствующая площадь); c_1 – концентрация элемента в

Подвижной состав железных дорог

точке перегиба кривой (граница α - и γ -фаз). Результаты расчета позволили выявить линейную зависимость толщины упрочненного слоя в медном образце коллекторной пластины тягового электродвигателя от коэффициента диффузии в α -фазе (рисунок 1). Данная диаграмма показывает, что при увеличении значения коэффициента диффузии в α -фазе медного образца коллекторной пластины тягового электродвигателя ТЛ-2К1 происходит увеличение толщины упрочненного слоя.

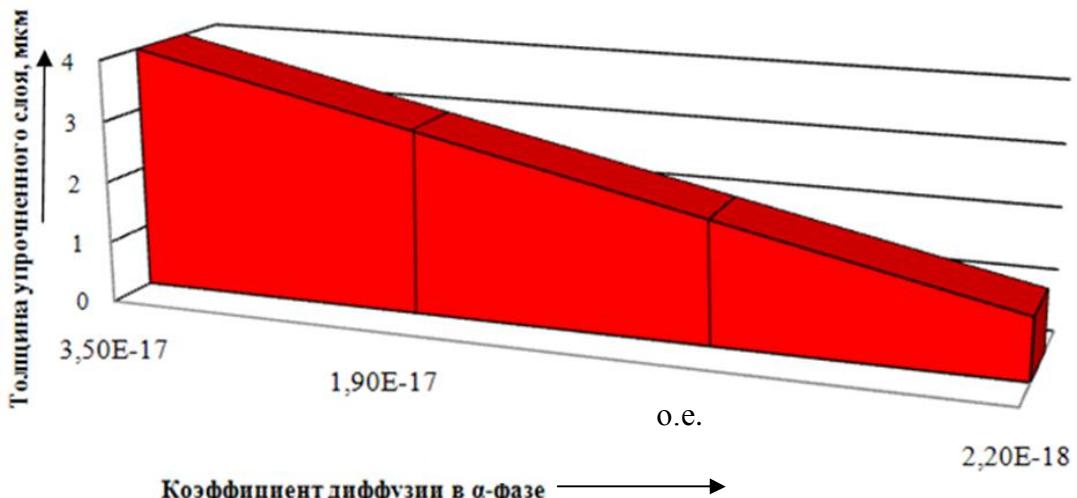


Рисунок 1 – Диаграмма зависимости толщины упрочненного слоя медного образца от коэффициента диффузии в α -фазе

Приведенное выше выражение позволило теоретически рассчитать концентрацию диффундирующего металла, глубину проникновения углерода в поверхность медного образца и коэффициент диффузии в разных фазах при различной температуре.

Часть медной коллекторной пластины тягового электродвигателя ТЛ-2К1 была обработана химико-термическим методом. Процесс химико-термической обработки протекал при нагревании в течение 24 часов при температуре нагрева от 200 до 1000 °С. Результаты эксперимента приведены на рисунке 2.

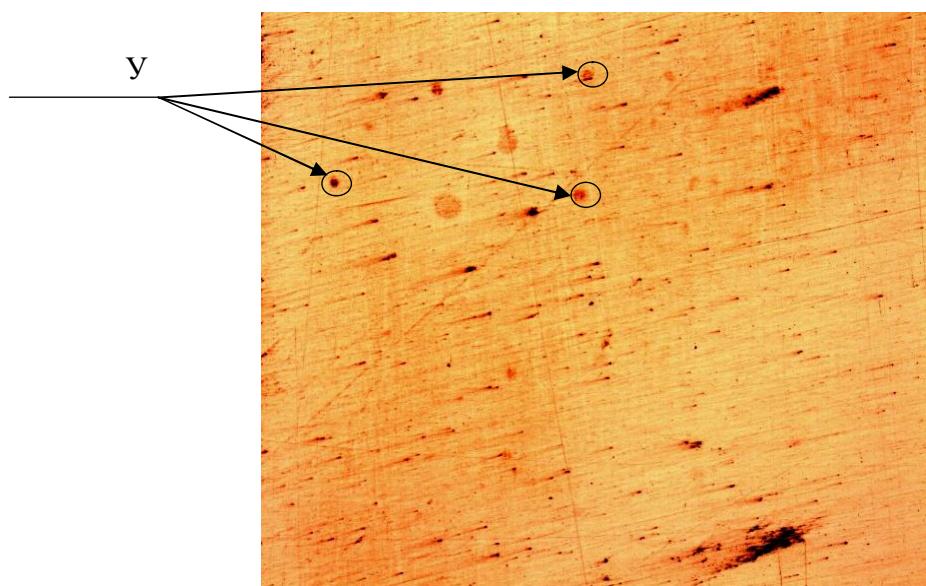


Рисунок 2 – Упрочненная углеродом часть коллекторной пластины тягового электродвигателя ТЛ-2К1 ($\times 500$)

На рисунке 2 отчетливо видны включения однообразной геометрической формы, о которых предположительно можно судить как об атомах углерода, внедренных в поверхность экспериментального медного образца. В результате на медной поверхности коллекторной

Подвижной состав железных дорог

пластины тягового электродвигателя ТЛ-2К1 сформировался слой новой композиционной структуры и состава (рисунок 3). Верхний слой 1 представляет собой пленку, состоящую из графита, сплошность которой зависит от режимов упрочнения, физико-механических свойств материала, в котором содержится медная пластина, и времени обработки. Под ним располагается зона 2, состоящая из смеси графита и меди, – слой, сформированный за счет диффузии химических элементов углерода в упрочненном материале медного образца.

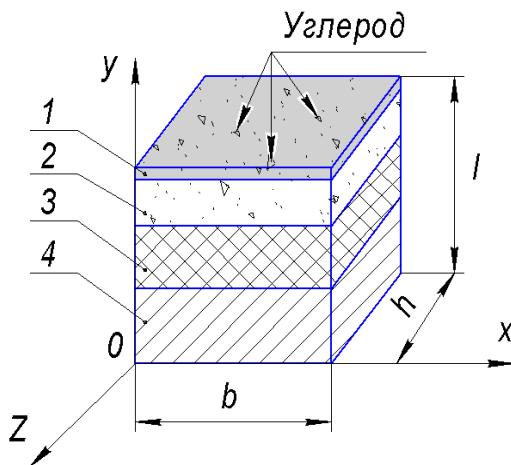


Рисунок 3 – Композиционная структура контактного элемента коллекторной пластины тягового электродвигателя: 1 – верхний слой; 2 – диффузионная зона; 3 – зона термического влияния; 4 – основной металл; b – ширина контактного элемента; h – длина контактного элемента; l – глубина упрочненного углеродом слоя контактного элемента

Для более детального изучения новой композиционной структуры, полученной после эксперимента, был проведен микроструктурный анализ медного образца M1 (рисунок 4).

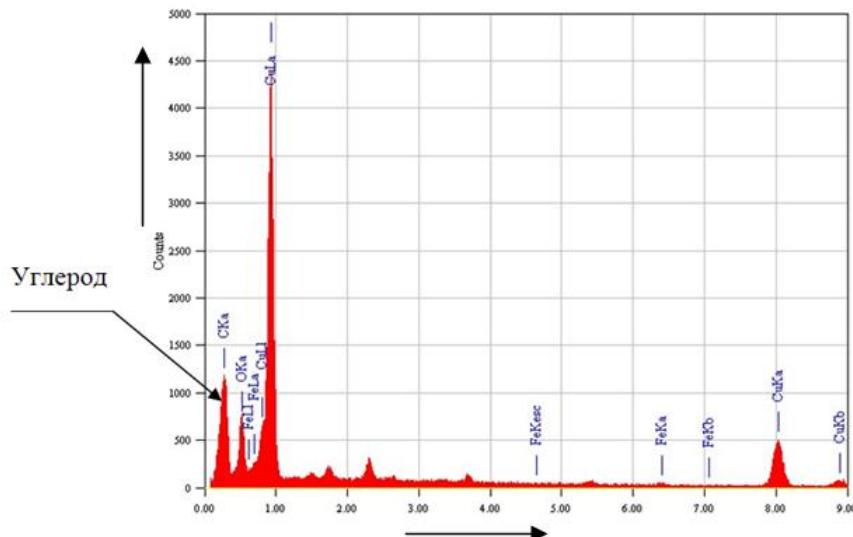


Рисунок 4 – Микроструктурный анализ медного образца M1

Анализ полученных данных новой композиционной структуры показал, что глубина внедрения углерода в медный образец коллекторной пластины тягового электродвигателя ТЛ-2К1 составила порядка 3 – 4 мкм (рисунок 5).

Данные измерения производились на микроскопе JCM-5700 для микроструктурного анализа металлов и сплавов.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что эксперимент по упрочнению поверхностного слоя медной коллекторной пластины углеродом оказался положительным. Об этом свидетельствует анализ теоретических и экспериментальных данных, полученных с помощью микроскопа JCM-5700. Поэтому коллекторная пластина тягового электродвигателя после химико-термической обработки улучшит вольт-амперные характеристики коллекторно-

Подвижной состав железных дорог

щеточного узла в различных условиях работы электрической машины постоянного тока за счет однородности материала контакта пары «щетка – коллектор» и повысит надежность работы электрической машины в целом.

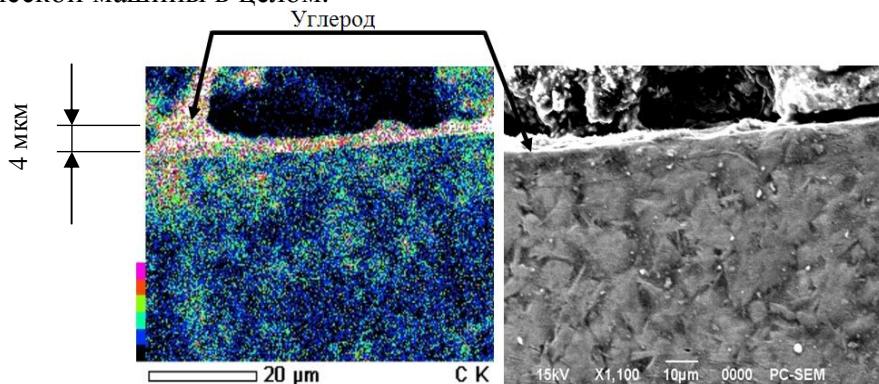


Рисунок 5 – Глубина внедрения углерода в медную коллекторную пластину

Список литературы

1. Анализ технического состояния электровозного парка по сети железных дорог России за 2009 год [Текст] – М.: Желдориздат, 2009. – 77 с.
2. Харламов, В. В. Диагностирование состояния коммутации коллекторных электродвигателей с использованием прибора ПКК-5М [Текст] / В. В. Харламов, П. К. Шкодун, А. П. Афонин // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2011. – № 3 (7). – С. 52 – 57.
3. Авилов, В. Д. К вопросу о повышении коммутационной устойчивости коллекторных электрических машин постоянного тока [Текст] / В. Д. Авилов, П. Г. Петров, Е. М. Моисеенок // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2010. – № 2 (2). – С. 2 – 6.
4. Авилов, В. Д. Методика нормирования качества коммутации в тяговых электрических машинах [Текст] / В. Д. Авилов, Ш. К. Исмаилов // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2012. – № 2 (10). – С. 2 – 7.
5. Белан, Д. Ю. Повышение надежности работы коллекторно-щеточного узла тяговых электродвигателей [Текст] / Д. Ю. Белан, В. М. Лузин // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2010. – № 4 (4). – С. 6 – 11.
6. Дубинин, Г. Н. О перспективах развития химико-термической обработки металлов [Текст] / Г. Н. Дубинин // Металловедение и термическая обработка металлов. – 2004. – № 7. – С. 5, 6.
7. Новиков, И. И. Металловедение, термообработка и рентгенография [Текст] / И. И. Новиков, Г. Б. Строганов, А. И. Новиков / Московский ин-т стали и сплавов. – 1994. – 480 с.
8. Влияние смазочного материала и термической обработки на формирование приповерхностных слоев и износостойкость стали 40Х при трении скольжения [Текст] / В. Г. Но-вицкий, В. П. Гаврилюк и др. // Трение и износ / Национальная академия наук Беларуси. – 2002. – Т. 23. – № 2. – С. 201 – 206.

УДК 621.333-83: 629.424.1

А. И. Володин, С. В. Сергеев, М. Н. Кирьяков

ПРИМЕНЕНИЕ МИКРОПРОЦЕССОРНЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧЕЙ ТЕПЛОВОЗОВ ДЛЯ РЕАЛИЗАЦИИ ОПТИМАЛЬНЫХ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ДИЗЕЛЕЙ

В данной статье описано применение микропроцессорных систем управления электропередачей тепловозов для реализации оптимальной тепловозной характеристики, обеспечивающей минимальный расход топлива тепловозами в эксплуатации.

Подвижной состав железных дорог

Экономичность тепловозных дизель-генераторных установок во многом зависит от уровня мощности, потребляемой на тягу. В работе [1] приведен расчет нагрузки, потребляемой на тягу в виде оптимальных тепловозных характеристик для дизелей 10Д100, Д49, ПД1М. Расчет произведен с целью оптимизации тепловозных характеристик по удельному расходу топлива.

Полученные зависимости мощности от частоты вращения коленчатого вала дизеля можно реализовать на базе микропроцессорной системы управления электропередачей тепловозов, которая позволит автоматизировать процесс управления мощностью дизель-генераторной установки и повысить качество управления технологическими процессами.

Для реализации расчетных характеристик предлагается использовать микропроцессорную систему управления электропередачей тепловозов, структурная схема которой приведена на рисунке 1.

Структура микропроцессорной системы управления электропередачей тепловозов (МСУ) включает в себя три составные части: вычислительную, интерфейсную и подсистему электропитания.

Вычислительная часть МСУ представляет собой модуль, в котором располагается микроЭВМ, она предназначена для обработки числовой информации о состоянии объекта регулирования и определения необходимых управляющих воздействий на объект. Вычислительное устройство МСУ оперирует не физическими величинами, характеризующими состояние объекта, а их числовыми представлениями.

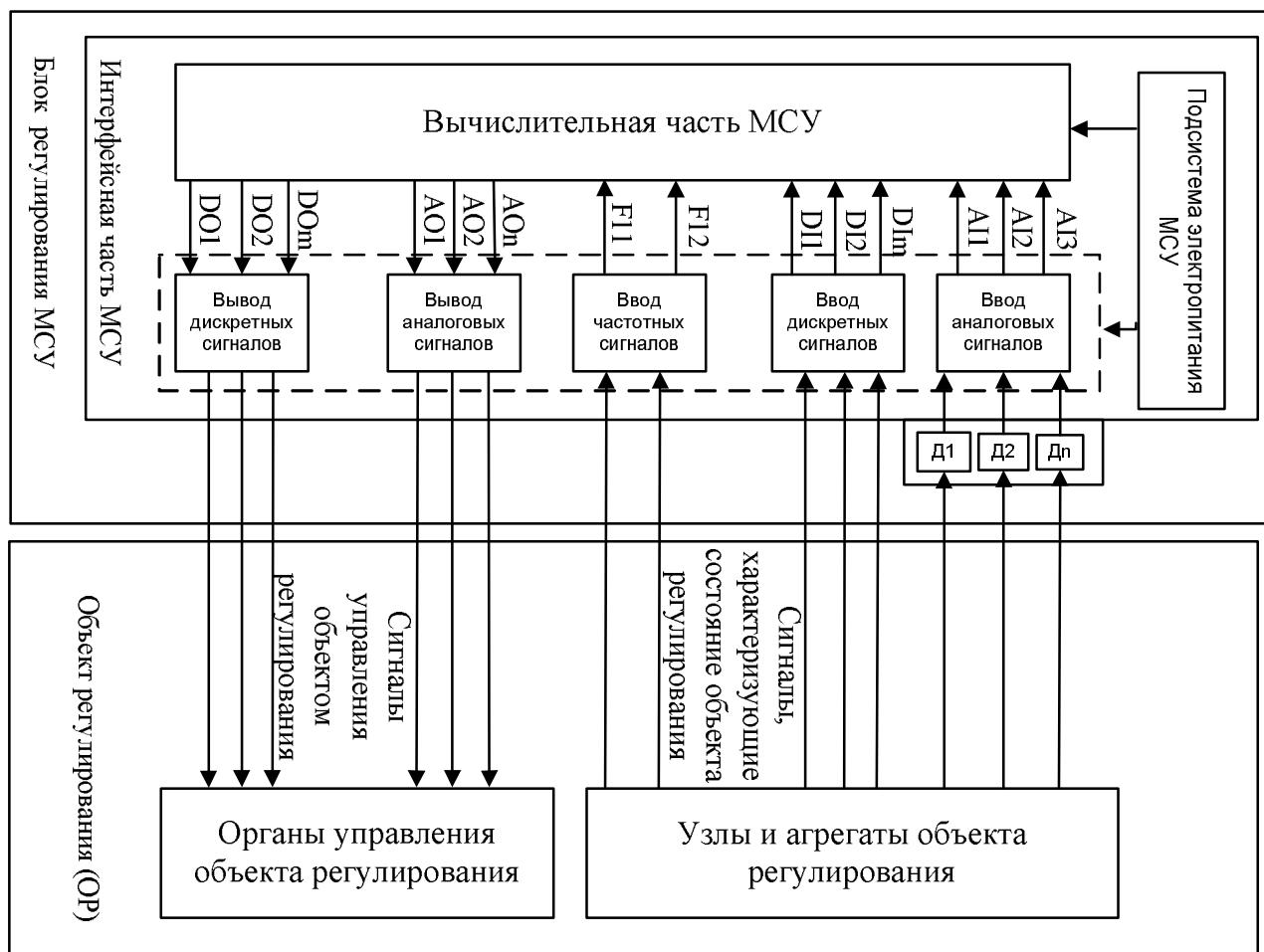


Рисунок 1 – Структурная схема микропроцессорной системы управления

Интерфейсная часть системы включает в себя средства ввода аналоговых, дискретных и частотных сигналов, средства вывода дискретных и аналоговых управляющих сигналов и предназначена для обеспечения связи вычислительной части системы с объектом управле-

Подвижной состав железных дорог

ния. К интерфейсной части системы относятся также датчики, обеспечивающие первичное преобразование аналоговых сигналов, характеризующих режим работы дизель-генераторной установки тепловоза.

Интерфейсная часть системы выполняет следующие основные функции:

ввод в вычислительную часть аналоговых (непрерывных) гальванических развязанных сигналов (AI1, AI2, ..., AIn), характеризующих значения параметров состояния объекта управления (таких, например, как ток, напряжение генератора, выход реек топливных насосов высокого давления дизеля и т. д.);

ввод в вычислительную часть частотных сигналов, т. е. сигналов, характеризующих частоту повторения какого-либо процесса в объекте управления (например, частоты вращения коленчатого вала дизеля или колесной пары локомотива);

ввод в вычислительную часть дискретных релейных сигналов (DI1, DI2, ..., DIm), характеризующих состояние объекта управления; дискретные сигналы формируются по принципу «есть – нет» и используются для определения признака включения или невключения какого-либо устройства или аппарата;

передачу от вычислительного устройства к объекту управления гальванически развязанных аналоговых управляющих сигналов (AO1, AO2, ..., AOn), используемых для плавного (непрерывного) управления объектом (например, для регулирования тока обмотки возбуждения генератора);

передачу от вычислительного устройства к объекту управления дискретных (релейных) управляющих сигналов (DO1, DO2, ..., DOm), используемых для включения или отключения каких-либо аппаратов или механизмов (например, включение или отключение контакторов и реле электрической схемы объекта).

При работе с высоковольтными аналоговыми электрическими сигналами (например, напряжение и ток тягового генератора тепловоза) масштабирование (пропорциональное понижение уровня) сигнала осуществляется в специальных устройствах, называемых датчиками (D1, D2, ..., Dn). При измерении неэлектрических величин (например, выход реек топливных насосов высокого давления дизеля, давление воздуха и т. д.) датчики осуществляют также преобразование физической природы сигнала (например, перемещение реек ТНВД преобразуется с определенным масштабным коэффициентом в электрическое напряжение на соответствующем входе интерфейсной части МСУ и т. д.).

Подсистема электропитания предназначена для формирования напряжения питания, необходимого для работы всех составных частей МСУ. Эта подсистема обязательно присутствует в бортовых системах управления силовых установок транспортных средств, поскольку бортовые сети последних не приспособлены для питания подобных устройств, но она может отсутствовать в стационарных системах, питаемых от внешних источников питания.

Аппаратура МСУ осуществляет прием информации от датчиков или командных устройств, логическую обработку этой информации в заданной последовательности и вывод полученных результатов для управления исполнительными устройствами. Задачи, решаемые каждым конкретным устройством, определяются алгоритмом его работы – упорядоченной последовательностью действий с конечным числом операций, приводящей к получению определенного результата. Последовательность выполнения операций – программа работы – закладывается в структуру электрической схемы и связи между аппаратными и программными средствами – электронными и электромеханическими элементами, входящими в состав системы.

Логика любой МСУ, т. е. порядок ее взаимодействия с объектом управления, полностью определяется управляющей программой вычислительной части системы.

Управляющая программа обеспечивает определенный порядок взаимодействия микропроцессорной системы управления с объектом управления. На рисунке 2 приведена структурная схема управляющей программы, состоящая из основной программы и программ обработки прерываний с циклом 10 мс, от последовательного канала связи и от частотных сигналов 1 и 2.

Подвижной состав железных дорог

Основная программа состоит из бесконечного цикла. Перед входом в цикл проходит блок инициализации. В этом блоке производится начальная установка режимов работы самого микропрограммного обеспечения и настройка периферийных устройств на плате процессора.

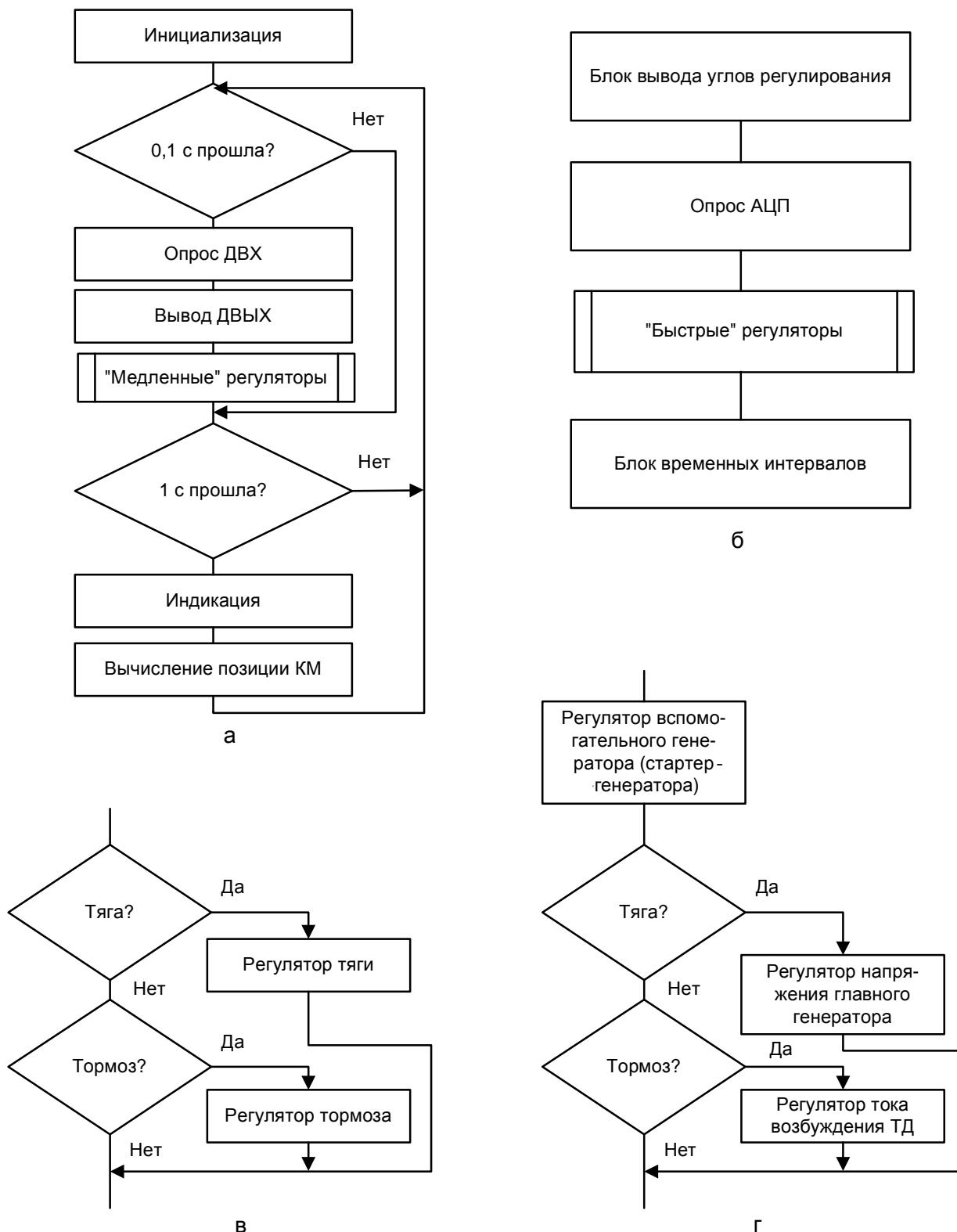


Рисунок 2 – Структурная схема управляющей программы: а – основная программа; б – программа обработки прерывания; в – «медленные» регуляторы; г – «быстрые» регуляторы

Бесконечный цикл включает в себя два блока обработки:

- 1) блок обработки информации с циклом 0,1 с, в котором производится опрос дискрет-

Подвижной состав железных дорог

ных входов; выдача команд на выходные ключи (включение/выключение исполнительных аппаратов); "медленные" регуляторы (регуляторы мощности и тормоза):

а) регулятор тяги вычисляет темпы изменения напряжения тягового генератора в зависимости от рассогласования по мощности, наличия боксования, усиления/ослабления поля (работает в режиме тяги);

б) регулятор тормоза вычисляет темпы изменения тока возбуждения тяговых двигателей в зависимости от тормозного тока, наличия юза;

2) блок обработки информации с циклом 1 с, в котором производится выдача информации на светодиоды, расположенные на лицевой стороне блока регулирования, и вычисляется номер позиции контроллера машиниста.

Программа обработки прерываний с циклом 10 мс работает по переполнении внутреннего таймера микроконтроллера и состоит из следующих блоков:

1) блока опроса каналов АЦП;

2) блока временных интервалов, который вырабатывает временные интервалы, необходимые для работы программы в целом;

3) блока "быстрых" регуляторов:

а) регулятор напряжения тягового генератора вычисляет величину, пропорциональную скважности ШИМ-сигнала, в зависимости от рассогласования напряжения уставки и измеренного значения напряжения тягового генератора (работает в режиме тяги);

б) регулятор вспомогательного генератора (стартер-генератора) вычисляет величину, пропорциональную скважности ШИМ-сигнала, в зависимости от рассогласования напряжения уставки и измеренного значения напряжения вспомогательного генератора (стартер-генератора);

в) регулятор тока возбуждения двигателей в тормозном режиме вычисляет величину, пропорциональную скважности ШИМ-сигнала, в зависимости от рассогласования тока уставки и измеренного значения тормозного тока;

4) блока выдачи углов регулирования, в котором формируются ШИМ-сигналы.

Программа обработки прерываний от последовательного канала связи работает по прерываниям, вырабатываемым при обмене информации с внешней ЭВМ.

Данная микропроцессорная система управления электропередачей является унифицированной и подходит для использования на любых сериях тепловозов.

Увеличивая количество дополнительных сигналов, характеризующих состояние и режимы работы объекта регулирования, можно реализовывать достаточно сложные алгоритмы управления, тем самым повышая эксплуатационные технико-экономические показатели тепловозов, от уровня которых зависит топливная экономичность тепловоза.

Использование описанной микропроцессорной системы позволяет не только обеспечить реализацию оптимальных тепловозных характеристик, рассчитанных в работе [1], но и оптимизировать процессы управления мощностью дизель-генераторных установок, повышая тем самым топливную экономичность тепловозов.

Список литературы

1. Володин, А. И. Оптимизация тепловозной характеристики дизеля для микропроцессорных систем управления электропередачей тепловозов [Текст] / А. И. Володин, М. Н. Кирьяков // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2012. – № 1. – С. 12 – 19.
2. Микропроцессорные системы автоматического регулирования электропередачи тепловозов [Текст] / А. В. Грищенко, В. В. Грачев и др. – М.: Маршрут, 2004. – 172 с.
3. Грудин, Н. А. Унифицированная система автоматического регулирования электропередачи и электроприводов тепловозов 2ТЭ10М, 2М62УК, ЧМЭЗК и ТЭП70: Учебное по-

Подвижной состав железных дорог

собие [Текст] / Н. А. Грудин / Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте. – М., 2009. – 144 с.

4. Овчаренко, С. М. Моделирование расходных характеристик с учетом технического состояния дизель-генераторной установки тепловоза [Текст] / С. М. Овчаренко, П. С. Корнеев // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – № 4. – С. 26 – 30.

5. Сидоренко, А. С. Ограничения алгоритмов параллельных вычислений в цифровой обработке сигналов [Текст] / А. С. Сидоренко // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2010. – № 3. – С. 89 – 93.

6. Грицутенко, С. С. Адекватность использования аналогий в цифровой обработке сигналов [Текст] / С. С. Грицутенко // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2010. – № 2. – С. 80 – 86.

УДК 629.4.048.3:681.5.017

А. Ю. Громов

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВАГОННОГО КОНДИЦИОНЕРА С ПОВЫШЕННОЙ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТЬЮ

В статье представлены методика и результаты экспериментальных исследований возможности повышения холодопроизводительности установки кондиционирования воздуха в составе пассажирского вагона без дополнительных затрат электрической энергии на работу компрессора.

В работах [1 – 5] приведены теоретические исследования особенностей функционирования вагонного кондиционера.

В результате численного исследования построенной математической модели, описывающей процессы теплопоступлений в вагон, дана количественная оценка влияния солнечной радиации на тепловую нагрузку, воздействующую на пассажирское помещение.

При рассмотрении процессов, протекающих между крышей вагона и набегающим воздушным потоком, с учетом аэродинамических особенностей его движения при различных режимах, установлено существенное увеличение тепловых потоков, проходящих через поверхность крыши, при переходе на низкие скорости движения поезда. Это увеличение составляет порядка 1,5 кВт [1].

Кроме того, поток от солнечной радиации, проходящий через крышу вагона при низких скоростях движения поезда, оказывает существенное влияние на предварительно охлажденный воздух, движущийся по нагнетательному воздуховоду системы вентиляции.

Определено, что при низких скоростях движения поезда температура воздуха, подаваемого в последнее купе вагона, может превышать допустимый температурный уровень более чем на 4 °C.

С учетом возможности использования термостойких красок и энергосберегающих мембран, позволяющих снизить радиационный поток через ограждения вагона более чем на 15 %, установлено, что необходимое значение холодопроизводительности вагонного кондиционера при наихудших климатических условиях эксплуатации вагона (температура наружного воздуха 32 °C, относительная влажность 40 %, интенсивность прямой солнечной радиации – 900 Вт/м²) должно составлять более 31 кВт [1, 2].

Номинальная холодопроизводительность существующих моноблочных кондиционеров типа УКВ-31 и УКВ ПВ различных модификаций имеет среднее значение около 28 кВт.

С целью совершенствования существующих кондиционеров была разработана принципиальная пневмогидравлическая схема установки кондиционирования воздуха для пассажирского вагона с повышенной термодинамической эффективностью.

Подвижной состав железных дорог

Теоретические исследования показали, что предлагаемая схема при наихудших климатических условиях эксплуатации вагона позволяет повысить холодопроизводительность УКВ на величину порядка 3 кВт за счет использования энергии рециркуляционного воздушного потока, удаляемой из вагона в процессе воздухообмена [3, 5].

Включение в замкнутую холодильную систему ультракоротких волн (УКВ) дополнительного теплообменного агрегата, обеспечивающего переохлаждение жидкого хладагента, поступающего из конденсаторов, за счет энергии рециркуляционного воздушного потока в целом дает возможность повысить эффективность данной системы по сравнению с существующими установками. Повышение эффективности выражается в экономии около 1 кВт электроэнергии на работу компрессора при достижении одного и того же уровня по холодопроизводительности [4].

В связи с этим основными задачами проведенного экспериментального исследования были следующие:

экспериментальное подтверждение сделанных теоретических выводов о работоспособности УКВ с повышенной термодинамической эффективностью в условиях, характерных для эксплуатации в пассажирском вагоне;

подтверждение адекватности построенной математической модели.

Моделирование реальных параметров на макетной установке проводилось с использованием масштабирования как геометрических размеров реальных агрегатов, так и протекающих теплофизических процессов.

Для исследования параметров теплообменных агрегатов использовались критериальные уравнения термодинамического подобия теплофизических процессов.

Температурные и физические поля вокруг геометрически подобных тел являются подобными, когда температура и скорость вокруг границ этих тел подобны, а критерии Рейнольдса, Прандтля, Нуссельта и Эккерта имеют постоянную величину.

Система уравнений для определения параметров потока, записанная в безразмерной форме, имеет вид [6]:

$$\begin{cases} u' = f(x', \text{Re}); \\ p' = f(x', \text{Re}); \\ Nu = f(x', \text{Re}, \text{Pr}); \\ Nu = \left(\frac{\partial \Delta t'}{\partial n'} \right)_w, \end{cases} \quad (1)$$

где $u' = u / u_s$, $p' = p / pu_s^2$, $\Delta t' = \Delta t / \Delta t_w$ – безразмерные зависимые переменные скорости, давления и температурного напора;

$x' = x / d$ – безразмерная независимая переменная координаты произвольной точки поверхности.

Выражения (1) позволяют определить параметры установки в условиях эксплуатации в составе вагона.

Полученные значения безразмерных величин термодинамического подобия дают возможность перевести геометрические и теплофизические параметры УКВ на макетный образец.

Холодильный цикл системы охлаждения вагонного кондиционера в координатах $i - lgp$ схематично приведен на рисунке 1.

Из рисунка 1 видно, что значение холодопроизводительности кондиционера Q_0 определяется разностью энталпий процесса дросселирования хладагента (участок 6 – 8) и на выходе из испарителя (характеристическая точка состояния 10).

Процесс кипения хладагента в испарителе протекает при постоянных температуре t_0 и давлении p_0 , а величина перегрева в точке 10 регулируется расходом рабочего тела через

Подвижной состав железных дорог

терморегулирующий вентиль (участок 6 – 8) в зависимости от значения энталпии хладагента на его входе (точка состояния 6).

Таким образом, значение холодопроизводительности кондиционера будет полностью определяться параметрами хладагента в точке 6 [4].

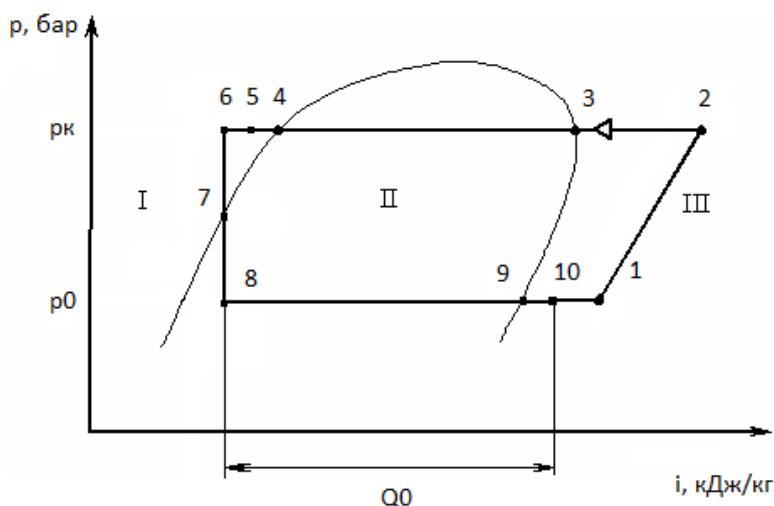


Рисунок 1 – Цикл кондиционера на диаграмме $i - lgp$:
 i – удельная энталпия хладагента; p – абсолютное давление хладагента;
I – область однофазного состояния хладагента (жидкости);
II – область двухфазного состояния хладагента (жидкость и пар);
III – область однофазного состояния хладагента (перегретый пар)

В связи с этим для оценки возможности повышения холодопроизводительности установки кондиционирования воздуха за счет использования энергии рециркуляционного воздушного потока с параметрами, характерными для условий в пассажирском вагоне, необходимо и достаточно количественно исследовать снижение температуры хладагента перед входом в терморегулирующий вентиль.

При создании экспериментального стенда в холодильный контур действующей УКВ был включен дополнительный теплообменный агрегат, выбранный согласно результатам теоретического исследования его параметров для реальной установки и выполненный в геометрии и массогабаритных размерах, характерных для макетной установки.

Таким образом, экспериментальные исследования сводятся к определению параметров жидкого хладагента на выходе из теплообменного агрегата при различных расходе и значениях температуры омывающего его поверхность воздушного потока.

В таблице представлены геометрические и теплофизические параметры для рассматриваемого теплообменного агрегата для условий эксплуатации на вагоне и условий для макетной установки, полученные с помощью безразмерных величин термодинамического подобия теплофизических процессов.

Геометрические и теплофизические параметры для рассматриваемого теплообменного агрегата для условий эксплуатации на вагоне и для макетной установки

Параметр	Рабочие параметры теплообменника-переохладителя	
	для условий эксплуатации на вагоне	для макетной установки
Площадь теплообменной поверхности, м^2	0,602	0,064
Тепловая нагрузка на теплообменник, кВт	2	0,237
Массовый расход хладагента, кг/с	0,185704	0,0222535
Скорость хладагента в трубке, м/с	2,55	0,3
Интервал исследуемых объемных расходов воздуха через теплообменник, $\text{м}^3/\text{ч}$	800 – 1000	90 – 120
Интервал значений исследуемой температуры воздуха на входе в теплообменник, $^\circ\text{C}$	24 – 26	24 – 26

Подвижной состав железных дорог

При проектировании экспериментальной УКВ особое внимание обращалось на уменьшение числа влияющих факторов окружающей среды на контролируемые параметры. Для этого была предусмотрена дополнительная теплоизоляция как самого теплообменника, так и хладоновых трубопроводов, соединяющих агрегаты. Для повышения достоверности измерений теплообменный агрегат был помещен в специальный алюминиевый короб, покрытый снаружи слоем теплоизоляции и отражающим солнечные лучи материалом.

Схема экспериментального стенда представлена на рисунке 2.

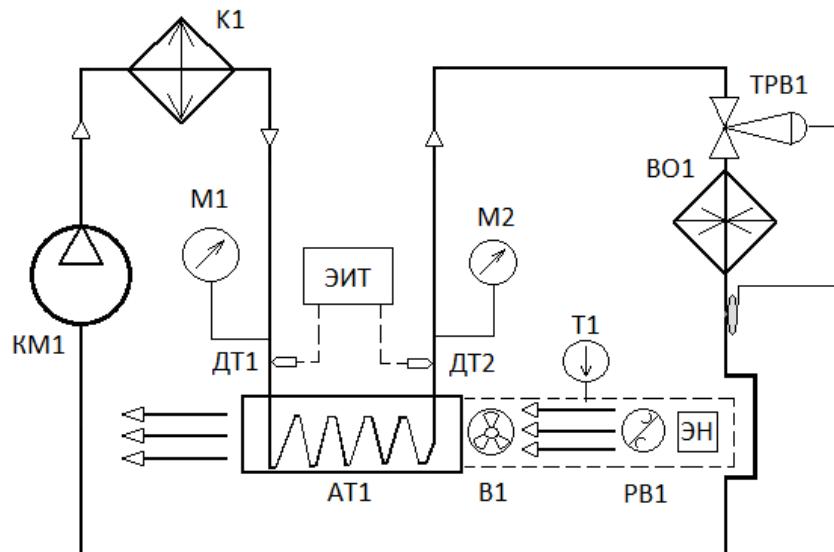


Рисунок 2 – Схема экспериментального стенда:

KM1 – компрессор; K1 – конденсаторный блок; AT1 – теплообменник-переохладитель;
TPB1 – терморегулирующий вентиль; BO1 - воздухоохладитель; M1 и M2 – манометры;
ЭИТ1 – электронный индикатор температуры; DT1 и DT2 – датчики температуры хладагента;
B1 – осевой воздушный вентилятор; T1 – термометр; PB1 – крыльчатый анемометр;
ЭН – электронагреватель воздуха

Основным элементом созданного стенда экспериментальной установки является автономный кондиционер воздуха (АКВ) КВО.6760.00 для кабины машиниста тепловоза, который серийно выпускается предприятием ООО НТК «Криогенная техника» г. Омска [6].

Рабочее давление на входе и выходе теплообменника AT1 измерялось с помощью образцовых манометров M1 и M2 со шкалой 0 – 100 кгс/см², а температура – с помощью датчиков температуры ИС567А (на схеме DT1 и DT2) с классом точности 2 и диапазоном значений измеряемой температуры от 77,15 до 473,15 К, сигналы с которых подавались на 8-канальный электронный индикатор (ЭИТ) УКТ-38.

Температурные параметры воздушного потока, подаваемого в теплообменник осевым вентилятором B1, регулировались с помощью воздушного электронагревателя и замерялись электронным термометром T1.

Расход воздуха через теплообменник контролировался с помощью крыльчатого анемометра ДА-4000 с пределом измерения 4000 м³/ч.

Для созданного экспериментального стенда разработана методика проведения исследований, позволяющая оценить результаты измерений и провести проверку адекватности теоретических вычислений.

Количество факторов, влияющих на результаты данного эксперимента, достаточно велико – это температура хладагента на входе в теплообменник $t_{x\text{ вх}}$, давление жидкого хладагента на входе в теплообменник $p_{x\text{ вх}}$, температура и расход воздуха через теплообменник $t_{v\text{ вх}}$, V_v , температура и давление окружающей среды, качество теплообменной поверхности и обременения, наличие загрязнений внутри трубок теплообменника, влажность воздуха, работа других агрегатов установки и др.

Подвижной состав железных дорог

Если оптимизировать работу теплообменника по всем перечисленным параметрам, то необходимо проводить многофакторный эксперимент с числом факторов около 10.

Проводить такой эксперимент и затем обрабатывать его результаты сложно, поэтому при исследовании принимались в расчет два основных фактора – $t_{\text{вых}}$ и $V_{\text{в}}$, которые должны наиболее сильно влиять на работу теплообменника.

Оптимизация для выбранных факторов проводится по величине температуры хладагента на выходе из агрегата $t_{\text{вых}}$.

Из теоретического исследования работы теплообменника-переохладителя известно, что между каждой независимой ($t_{\text{вых}}, V_{\text{в}}$) и зависимой ($t_{\text{вых}}$) переменными существует линейная связь, следовательно, функция $t_{\text{вых}} = f(t_{\text{вых}}, V_{\text{в}})$ также является линейной, следовательно, уравнение регрессии будет множественным линейным и в общем виде запишется следующим образом [7]:

$$t_{\text{вых}} = a_1 t_{\text{вых}} + a_2 V_{\text{в}} + b_0, \quad (2)$$

где a_i – коэффициенты уравнения регрессии;

b_0 – случайная величина, выражаяющая случайный характер результирующей переменной $t_{\text{вых}}$.

При проведении экспериментальных исследований использовались значения параметров хладагента R134a и его теплофизических свойств, выбранные из таблиц его состояния [8].

На рисунке 3 представлены результаты экспериментальных исследований, а также график линейной регрессии, показывающий усредненную зависимость между расходом воздуха через теплообменник и температурой хладагента на выходе из него, полученную по экспериментальным данным, с учетом случайного характера результирующей переменной.

Для проверки адекватности математической модели действительным процессам, протекающим в теплообменнике, было проведено сравнение результатов теоретических и экспериментальных исследований.

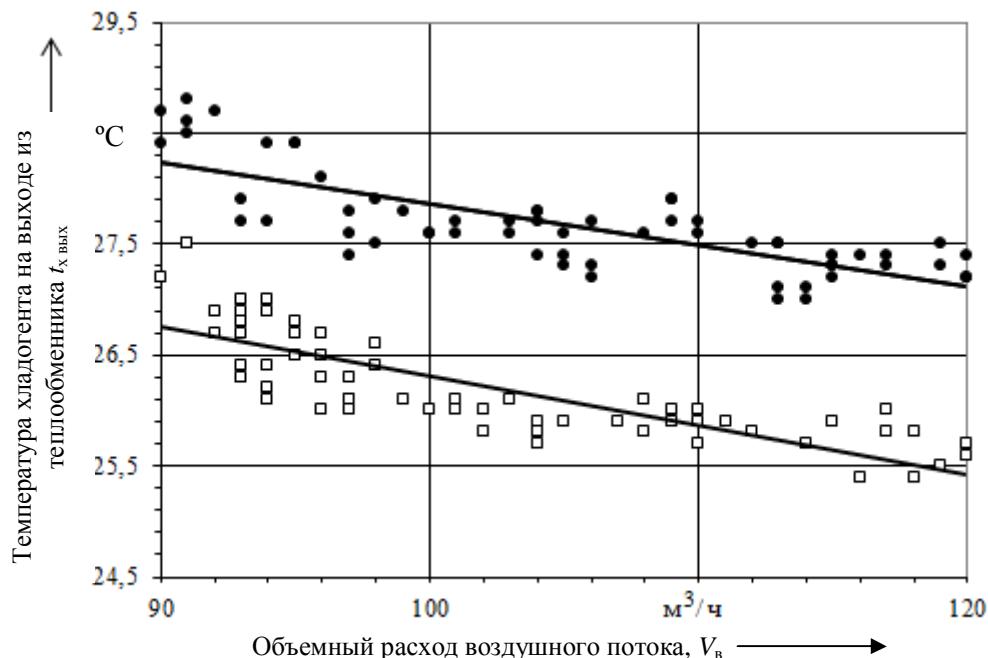


Рисунок 3 – Результаты экспериментальных исследований зависимости между объемным расходом воздуха через теплообменник и температурой хладагента на его выходе

Сопоставление экспериментальных и расчетных данных зависимости температуры хладагента на выходе из теплообменника от расхода воздушного потока представлено на рисунке 4.

Подвижной состав железных дорог

Зависимости, представленные на рисунке 4, построены для температуры воздуха на входе в теплообменник $t_{\text{вых}}$, равной 26°C .

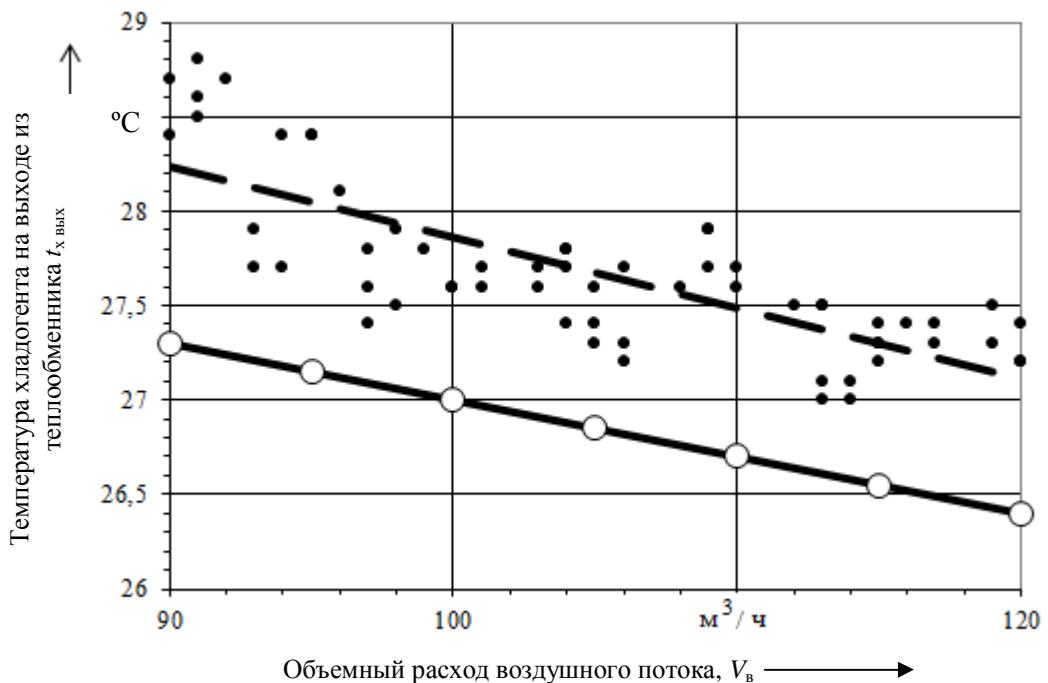


Рисунок 4 – Сопоставление экспериментальных и расчетных данных зависимости температуры хладагента на выходе из теплообменника от расхода воздушного потока

График зависимости тепловой нагрузки на теплообменник от объемного расхода воздушного потока при наложении расчетной зависимости на эксперимент приведен на рисунке 5.

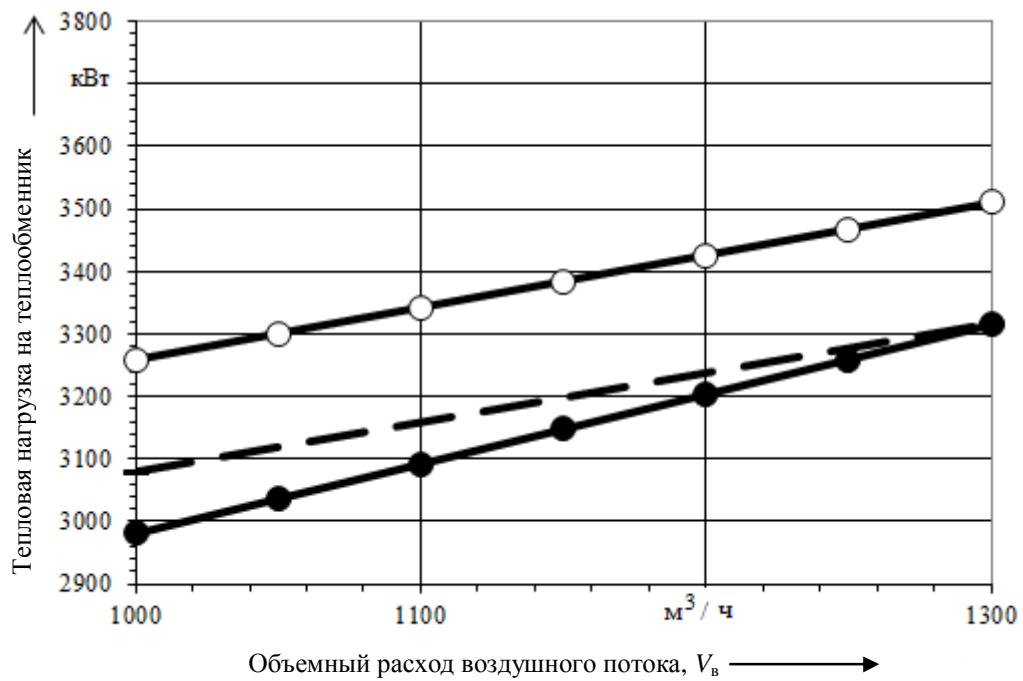


Рисунок 5 – График зависимости тепловой нагрузки на теплообменник от объемного расхода воздушного потока при наложении расчетной зависимости на эксперимент

Зависимости, показанные на рисунке 5, построены для условий эксплуатации теплообменника в вагоне на основании данных, представленных на рисунке 4.

Чем большее значение имеет величина расхода воздушного потока через теплообменник,

Подвижной состав железных дорог

тем больше расчетные данные приближаются к экспериментальным.

Согласно данным, представленным на рисунке 5, при объемном расходе воздушного потока 1000 м³/ч экспериментальное и расчетное значения тепловой нагрузки различаются на 9 %, а при расходе 1300 м³/ч – на 5 %.

С целью уменьшения погрешности аналитических исследований в выражение для определения величины тепловой нагрузки на теплообменник введен коэффициент корреляции 0,945. Построенная с учетом данного коэффициента теоретическая кривая во всем рассматриваемом диапазоне расхода воздушного потока отличается от экспериментальной не более чем на 5 %.

Кроме того, представленная на рисунке 5 экспериментальная зависимость подтверждает результаты теоретических исследований о том, что во всем рассматриваемом диапазоне объемного расхода воздуха, идущего из вагона, и при наихудших условиях в исследуемом температурном интервале теплообменный агрегат в состоянии отводить от жидкого хладагента тепловой поток в размере 3 кВт.

Проведенная проверка предпосылок регрессионного анализа показала, что для модели выполняются все условия Гаусса – Маркова.

Температура жидкого хладагента на выходе из теплообменника изменяется по линейному закону в зависимости от параметров воздушного потока. Коэффициент Фишера для полученных расчетных и практических значений составил 0,90 (см. рисунок 4).

Таким образом, на основании проведенных теоретических и экспериментальных исследований можно сделать вывод о том, что предложенное схемное решение, направленное на повышение холодопроизводительности вагонного кондиционера, при существующих параметрах рециркуляционного воздушного потока в вагоне позволяет получить, при наихудших условиях эксплуатации вагона, около 3 кВт дополнительного холода по отношению к существующим кондиционерам при тех же затратах электрической энергии на работу компрессора.

Результаты экспериментальных исследований подтверждают адекватность предложенных математических моделей. Расхождение между численными и экспериментальными значениями не превысило 5 %.

Список литературы

1. Матяш, Ю. И. Количественная оценка влияния солнечной радиации на работу вагонного кондиционера [Текст] / Ю. И. Матяш, А. Ю. Громов // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2011. – № 2. – С. 9 – 16.
2. Матяш, Ю. И. Количественная оценка степени влияния скорости подвижного состава на величину перегрева крыши пассажирского вагона под воздействием солнечной радиации [Текст] / Ю. И. Матяш, А. Ю. Громов // Транспорт Урала. – 2010. – № 4. – С. 45 – 47.
3. Матяш, Ю. И. Разработка вагонного кондиционера с пониженным потреблением электрической энергии [Текст] / Ю. И. Матяш, В. П. Клюка, А. Ю. Громов // Технология обеспечения ремонта и повышение динамических качеств железнодорожного подвижного состава: Матер. всерос. науч.-техн. конф. с междунар. участием / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2011. С.
4. Матяш, Ю. И. Снижение энергопотребления пассажирских вагонов за счет совершенствования схемного решения установок кондиционирования воздуха [Текст] / Ю. И. Матяш, В. П. Клюка, А. Ю. Громов // Ресурсосберегающие технологии на Западно-Сибирской железной дороге: Матер. науч.-практ. конф. / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2010. – С. 205.
5. Пат. 110462 (RU), МПК F25B 1/04 Установка кондиционирования воздуха пассажирского вагона / Ю. И. Матяш, А. Ю. Громов. № 2011124814.28; заявл. 17.06.2011, опубл. 20.11.2011. Бюл. №32.
6. Эккерт, Э. Р. Теория тепло- и массообмена [Текст] / Э. Р. Эккерт, Р. М. Дрейк. – М.:

Подвижной состав железных дорог

Госэнергоиздат, 1961. – 681с.

7. Справочник по физико-техническим основам криогеники [Текст] / М. П. Малков, И. Б. Данилов и др. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 392 с.

8. Матяш, Ю. И. Моделирование процессов протекания жидкости в ультрафиолетовом стерилизаторе модернизированной системы водоснабжения пассажирского вагона [Текст] / Ю. И. Матяш, О. С. Томилова, В. В. Томилов // Известия Транссиба. / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2011. – № 2. – С. 16 – 21.

9. Харламов, В. В. Применение теории подобия при моделировании износа коллекторно-щеточного узла тягового электродвигателя [Текст] / В. В. Харламов, П. К. Шкодун, А. В. Долгова // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2011. – № 4. – С. 57 – 63.

10. Матяш, Ю. И. Устройство для обеззараживания воды в пассажирских поездах дальнего следования [Текст] / Ю. И. Матяш, О. С. Томилова // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2010. – № 4. – С. 23 – 27.

11. Ибрагимова, О. А. Направления совершенствования работы существующих источников тепла [Текст] / О. А. Ибрагимова, В. М. Лебедев // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2010. – № 4. – С. 44 – 49.

УДК 656.6.08

Е. Г. Гурова

К ПРИМЕНЕНИЮ СУПЕРМАГНИТОВ В УСТРОЙСТВАХ ВИБРОЗАЩИТЫ ПОДВИЖНОГО СОСТАВА

В статье предложено применение неодимовых супермагнитов в устройствах виброзащиты подвижного состава. Компенсатор жесткости может быть выполнен как два встречно включенных супермагнита. Приведены расчетные характеристики супермагнитов.

В настоящее время необходимость снижения уровней вибрационных колебаний в промышленности, на любом виде транспорта, а также на производстве является одной из самых актуальных задач, на решение которой направлены усилия многих научных коллективов. Вибрация вредно влияет на работоспособность различных устройств и машин, снижая их надежность. Нередко механические колебания становятся причиной аварий подвижного состава, но особенно негативно вибрация влияет на человека.

Сегодня существует достаточно много средств снижения уровня вибрации: пассивные и активные виброзащитные устройства, динамические гасители колебаний и др. Однако наиболее перспективным методом снижения уровня вибрации является применение виброизолирующих устройств с плавающим участком нулевой жесткости. Принцип действия таких устройств заключается в следующем: при ограниченном ходе виброизолирующего хода подвески H и при заданном диапазоне изменения усилий от P_{\min} до P_{\max} , передаваемых от защищаемого вибрирующего объекта, силовые характеристики таких устройств представляют собой бесконечное множество отрезков прямых, равных по длине размаху колебаний, параллельных оси абсцисс, и расположенных своими серединами на отрезке AB , угол наклона которого равен жесткости подвески (рисунок 1) [4].

Получить участок силовой характеристики с нулевой жесткостью можно путем включения параллельно упругому элементу специального устройства, называемого компенсатором или корректором жесткости с падающей силовой характеристикой. Суммарная характеристика виброизолятора с компенсатором жесткости показана на рисунке 2.

В качестве компенсатора жесткости предлагались различные варианты конструкции: ме-

Подвижной состав железных дорог

хнические, гидравлические и др. В работах [1, 2] предлагался электромагнитный компенсатор жесткости, схема которого приведена на рисунке 3.

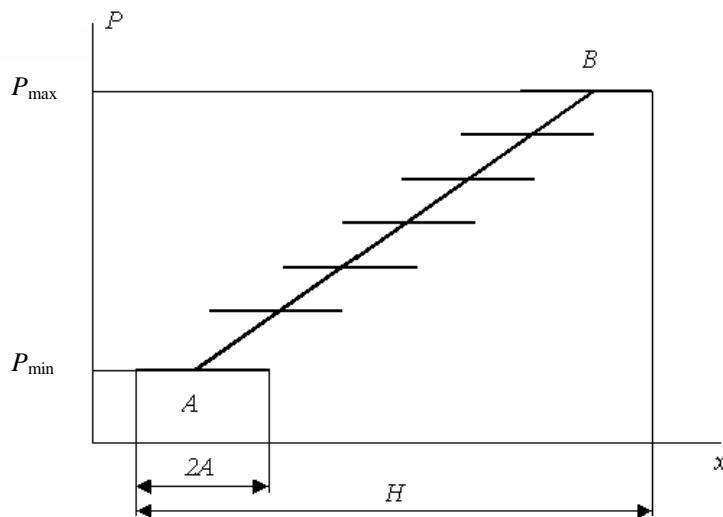


Рисунок 1 – Силовая характеристика перестраивающегося виброподвески

Устройство виброподвески содержит упругий элемент и включенный параллельно ему электромагнитный компенсатор жесткости, выполненный в виде двух встречновключенных электромагнитов постоянного тока 3, 4, жестко закрепленных на вибрирующем объекте 1, общий якорь 5, который жестко связан с защищаемым объектом 2. Отличительной особенностью устройства является то, что электромагнитный компенсатор жесткости снабжен устройством управления 15, которое выполнено в виде датчика относительного положения вибрирующего и защищаемого объектов 16 и включенного последовательно с ним нелинейного регулятора напряжений 17. Нелинейная характеристика устройства управления 15 выполняется так, чтобы, перераспределяя питающее напряжение электромагнитов 3, 4 при изменении относительного положения вибрирующего и защищаемого объектов, обеспечивать постоянный наклон силовой характеристики электромагнитного компенсатора жесткости.

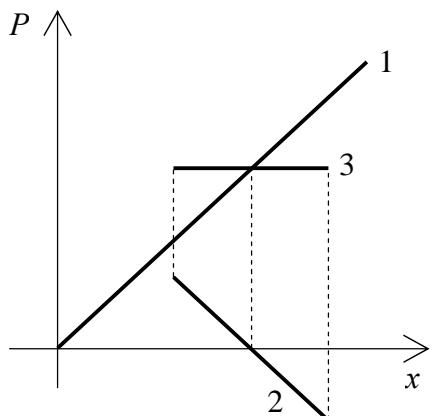


Рисунок 2 – Характеристика виброподвески с компенсатором жесткости:
1 – упругого элемента; 2 – компенсатора жесткости; 3 – виброподвески

15, которое выполнено в виде датчика относительного положения вибрирующего и защищаемого объектов 16 и включенного последовательно с ним нелинейного регулятора напряжений 17. Нелинейная характеристика устройства управления 15 выполняется так, чтобы, перераспределяя питающее напряжение электромагнитов 3, 4 при изменении относительного положения вибрирующего и защищаемого объектов, обеспечивать постоянный наклон силовой характеристики электромагнитного компенсатора жесткости.

Катушки 7, 9 электромагнитов подключены к источнику питания 19 через устройство управления 15. Катушки 6, 8 получают питание последовательно с катушками 7, 9 электромагнитов по связям a , b , c , d [2].

Экспериментальные исследования виброподвески с электромагнитным компенсатором жесткости показали эффективность данного устройства, так как оно снижает уровни вибраций почти до нуля в диапазоне частот от 4 до 32 Гц, но практическое применение этого устройства затруднено достаточно большими его габаритами [1]. Исходя из того, что масса защищаемых объектов достаточно большая (например, дизель-генератор имеет массу 65 – 500 кг), необходимо создавать значительное усилие для компенсации жесткости основного несущего упругого элемента, воспринимающего статическую нагрузку [3]. Рассмотрен пример для определенной массы защищаемого объекта, здесь максимальный зазор составляет 1 см.

Предлагается заменить два электромагнита постоянного тока на неодимовые супермагниты, усилие которых значительно выше при том же расстоянии зазора. На рисунке 4 пред-

Подвижной состав железных дорог

ставлены сравнительные тяговые характеристики электромагнита постоянного тока, постоянного магнита, неодимового супермагнита.

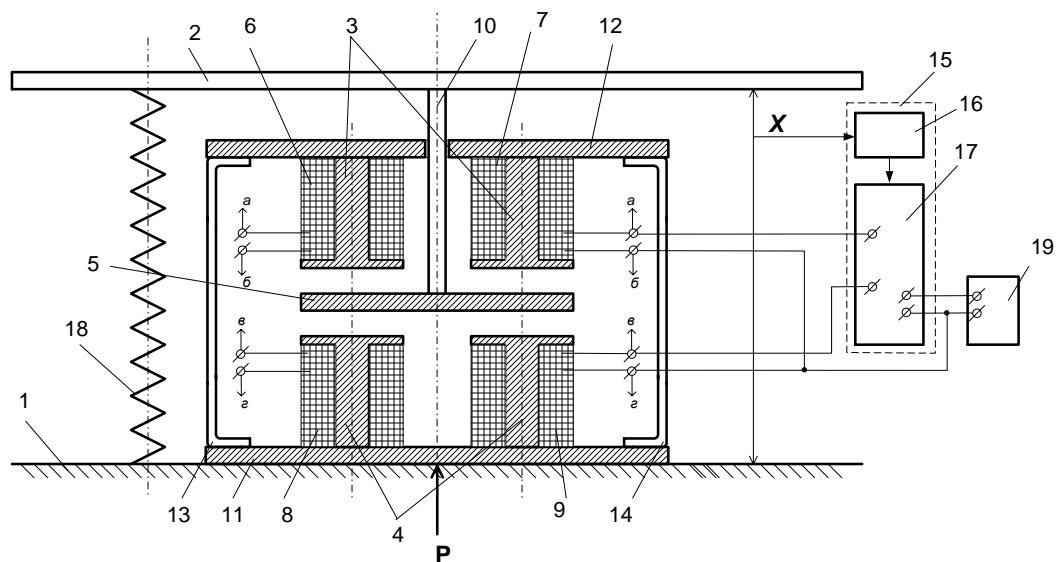


Рисунок 3 – Схема виброизолирующей подвески с электромагнитным компенсатором жесткости

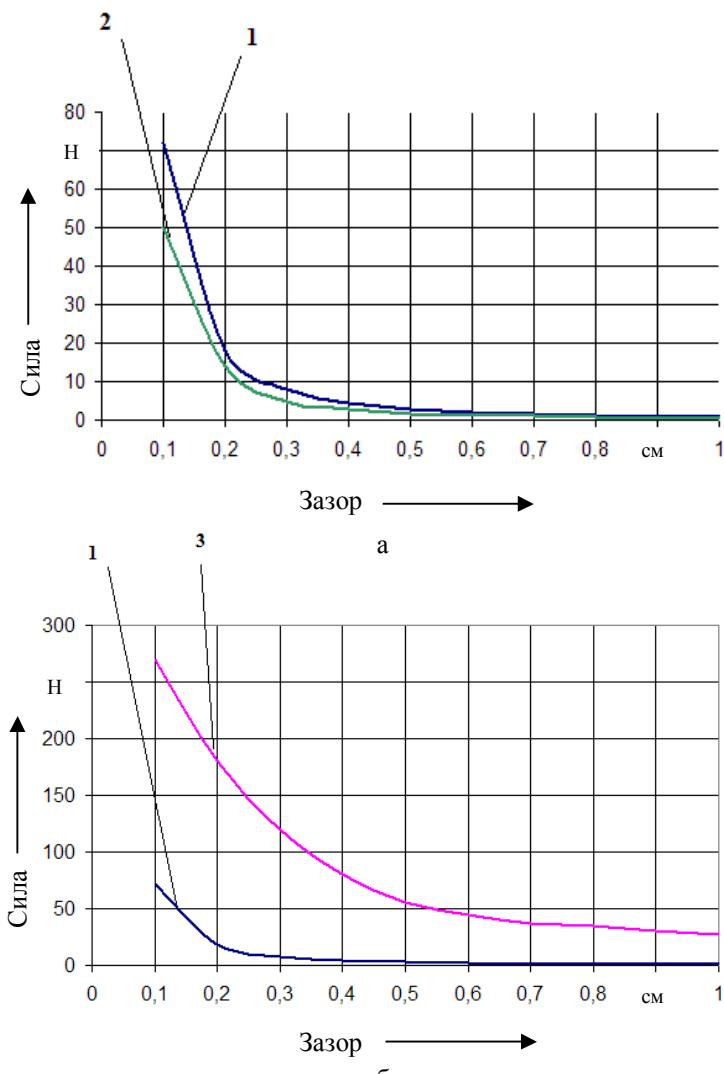


Рисунок 4 – Тяговые характеристики электромагнита постоянного тока (1);
постоянного магнита (2); неодимового супермагнита (3)

Подвижной состав железных дорог

Из рисунка 4 видно, что супермагниты по сравнению с усилиями, создаваемыми ими с электромагнитами постоянного тока и постоянными магнитами, очень эффективны. При этом супермагниты создают достаточное усилие, а габариты их несущественны (рисунок 5). Поэтому для установки в компенсатор жесткости виброизолирующего устройства предлагается применить именно неодимовые супермагниты для исключения вибрации на транспорте, где ограничено габаритное пространство для установки виброизоляторов.

Одним из доминирующих факторов при этом является сила магнита, или сила сцепления магнита – величина, характеризующая силу взаимодействия магнита с другим магнитом или предметом с магнитной восприимчивостью. Сила магнита показывает, какое внешнее усилие нужно приложить, чтобы отсоединить магнит от магнита или магнитовосприимчивого материала, т. е. эта сила магнита равна силе, которая позволит воспринять силу тяжести объекта, которая приближена к цифровому значению силы магнита.



Рисунок 5 – Вид неодимовых супермагнитов

Расчетная сила магнита должна измеряться при сцеплении двух абсолютно одинаковых магнитов при их равномерном действии друг на друга (при одинаковых усилиях), четко определенном расстоянии между магнитами и при оптимальных условиях окружающей среды. Чтобы рассчитать, какое усилие может создать магнит или какова сила сцепления между магнитами или другим материалом, нужно знать магнитные характеристики магнита или материал, с которым взаимодействует магнит, магнитную восприимчивость этого материала, объем и форму «сцепляемого» предмета, чистоту обработки поверхности, угол приложения усилий. Таким образом, сила магнита зависит от многих факторов и определяется она математическим расчетом. При этом, как правило, нужно учитывать максимальную расчетную величину взаимодействия двух магнитов. Основным критерием силы или мощности магнита остается магнитная индукция материала, из которого изготовлен магнит, скоррелированная с объемом магнитного материала (размер магнита).

В результате можно сказать, что применение в виброизолирующих устройствах неодимовых супермагнитов является целесообразным, так как усилие супермагнитов значительно выше применяемых ранее в конструкции компенсатора жесткости электромагнитов постоянного тока, причем габариты супермагнитов значительно меньше. Это позволит уменьшить размеры виброизолирующих устройств и упростит их установку на любом виде транспорта, в промышленности, на производстве. Полная разработка конструкции виброизолирующего устройства с неодимовыми супермагнитами требует дальнейших исследований, которые будут проводиться в рамках государственного заказа («У.М.Н.И.К.»).

Список литературы

1. Гурова, Е. Г. Результаты испытаний виброизолятора с автоматически перестраивающимся электромагнитным компенсатором жесткости [Текст] / Е. Г. Гурова, В. Ю. Гросс // Дизельные энергетические установки речных судов: Сб. науч. тр. / Новосиб. гос. акад. вод. трансп. – Новосибирск, 2009. – С. 67 – 69

2. Гурова, Е. Г. Виброизолирующая подвеска судовой энергетической установки с нелинейным электромагнитным компенсатором жесткости / Дис... канд. техн. наук [Текст] / Е. Г. Гурова / Новосиб. гос. акад. вод. трансп.: – Новосибирск, 2008. – 198 с.

Подвижной состав железных дорог

3. Сливинская, А. Г. Электромагниты и постоянные магниты [Текст]: Учебное пособие / А. Г. Сливинская. – М.: Энергия, 1972. – 248 с.
4. Зуев, А. К. Основные положения теории виброизоляции произвольных пространственных колебаний [Текст] / А. К. Зуев // Снижение вибрации на судах: Сб. науч. тр. / Новосиб. ин-т инж. вод. трансп. – Новосибирск, 1991. – С. 4 – 17.

УДК 621.336

Г. П. Маслов, А. Е. Чепурко

РАЦИОНАЛЬНАЯ АЭРОДИНАМИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ТОКОПРИЕМНИКА ПО УСЛОВИЯМ ТОКОСЪЕМА

В статье рассмотрено влияние аэродинамической составляющей на величину контактного нажатия при различных скоростях движения. Определен допустимый диапазон изменения аэродинамической подъемной силы, выбрана рациональная аэродинамическая характеристика токоприемника при определенной величине его приведенной массы.

В процессе взаимодействия токоприемника и контактной подвески контактное нажатие не остается постоянным вследствие изменения инерционной и аэродинамической составляющих, что приводит к снижению надежности, экономичности и экологичности токосъема.

Статическое нажатие токоприемника P_p нормировано и при отсутствии системы его автоматического регулирования должно оставаться постоянным в процессе токосъема. При наличии же такой системы оно регулируется в строго определенном диапазоне. Контактное нажатие можно поддерживать в заданных пределах также путем регулирования его переменных составляющих. Рассмотрим влияние на контактное нажатие одной из них – аэродинамической.

Согласно утверждению источника [1] аэродинамическая подъемная сила не должна вызывать увеличения контактного нажатия более 80 % по сравнению со статическим:

$$P_{kt\ max} = 1,8 \cdot P_p \quad (1)$$

или уменьшения на 40 %

$$P_{kt\ min} = 0,6 \cdot P_p. \quad (2)$$

В качестве примера рассмотрим взаимодействие токоприемников с различными приведенными массами и контактной подвески КС-200-06К с составом проводов М-120+2МФ-120. Длина пролета – 65 м. Статическое нажатие системы подвижных рам принято 110 Н, скорость – от 120 до 240 км/ч, приведенные массы токоприемников – 30, 35, 40 кг.

Расчет производится методом, приведенным в работе [2]. Для определения контактного нажатия во всех точках пролета при конкретной скорости движения использовалось выражение:

$$P_{kt} = P_p \pm P_{tp} \pm P_a \pm P_{vt} = -m_n \cdot y_n'' - r_k \cdot (y_n' - y_p') - j_k \cdot (y_n - y_p - h_{ko}) - w_t \cdot \text{sign}(y_n - y_p) + P_{vt}, \quad (3)$$

где P_{kt} – контактное нажатие, Н;

P_p – сила статического нажатия системы подвижных рам, приведенная к верхнему шарниру, Н;

P_{tp} – составляющая сил трения, Н;

P_a – инерционная составляющая контактного нажатия, Н;

P_{vt} – аэродинамическая подъемная сила, Н;

m_n – условная приведенная масса верхнего узла токоприемника, кг;

Подвижной состав железных дорог

$y_{\text{п}}^{\cdot}$ – вертикальное ускорение верхнего узла токоприемника, м/с²;

r_k – коэффициент вязкого трения контактной подвески, даН·с/м;

$y_{\text{п}}$ – вертикальная скорость перемещения верхнего узла токоприемника, м/с;

y_p^{\cdot} – вертикальная скорость перемещения рам токоприемника, м/с;

y_p – ордината верхнего узла токоприемника, м;

y_p – ордината рам токоприемника, м;

$h_{\text{ко}}$ – величина свободного хода кареток токоприемника, м;

κ_s – жесткость контактной подвески, даН/м;

w_t – сила сухого трения токоприемника, даН/м.

Рассмотрим изменение контактного нажатия в пролете, когда аэродинамическая подъемная сила полностью скомпенсирована. На рисунке 1 приведены кривые контактного нажатия для скоростей 120, 160, 180 и 200 км/ч, стрелы провеса контактного провода 40 мм и приведенной массы токоприемника 40 кг.

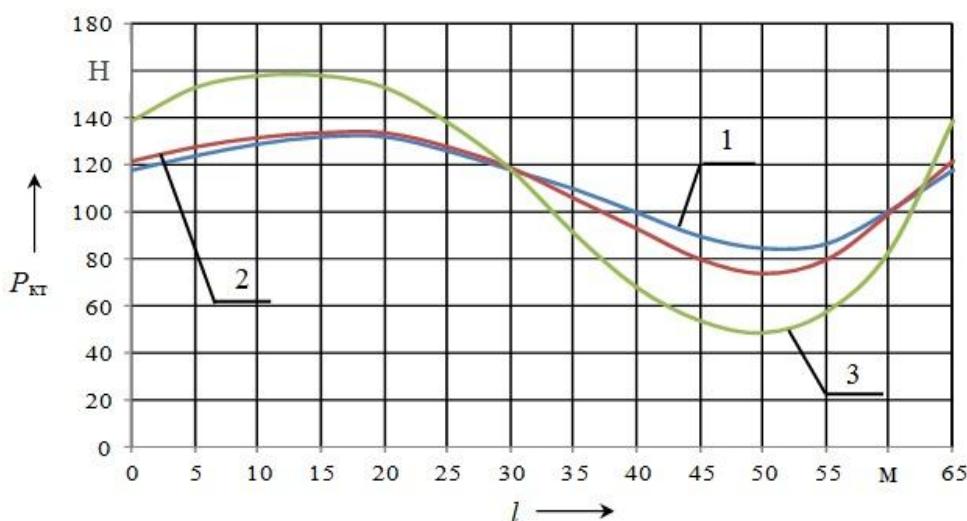


Рисунок 1 – Изменение контактного нажатия в пролете при полной компенсации аэродинамической подъемной силы токоприемника при скоростях движения, км/ч: 1 – 120, 2 – 160, 3 – 200

Из рисунка 1 видно, что с увеличением скорости движения происходит увеличение разброса контактного нажатия. Так, при скорости 120 км/ч максимальная величина разброса контактного нажатия больше статического на 21 % (133,2 Н), а минимальная – меньше на 22 % (85,7 Н). При скорости 200 км/ч эти значения составили 52 (169,8 Н) и 65 % (38,3 Н) соответственно.

Влияние приведенной массы токоприемника на величину контактного нажатия в пролете при скорости 200 км/ч приведено на рисунке 2, из которого следует, что у токоприемника с большей приведенной массой разброс контактного нажатия больше. Для конструкции с приведенной массой 30 кг максимальное нажатие составляет 141,7 Н, минимальное – 66,9 Н, а при 40 кг оно равно 159,1 и 48,0 Н соответственно.

При определении рациональной аэродинамической характеристики токоприемника необходимо исходить из допустимого диапазона изменения контактного нажатия (1), (2). При статическом нажатии в 110 Н переменные составляющие не должны приводить к снижению величины контактного нажатия менее 66 Н и увеличению более 198 Н.

Максимальные и минимальные значения контактного нажатия в пролете при полностью скомпенсированной аэродинамической подъемной силе токоприемника и рациональная величина этой подъемной силы при скоростях от 120 до 240 км/ч приведены в таблице. Стрела провеса контактного провода принята 40 мм.

Подвижной состав железных дорог

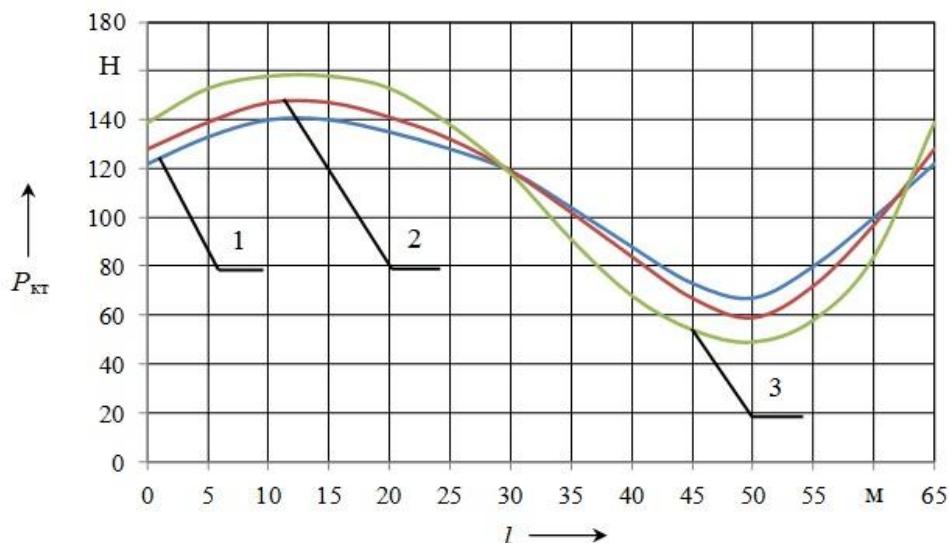


Рисунок 2 – Изменение контактного нажатия при полной компенсации аэродинамической подъемной силы для скорости 200 км/ч, стрелы провеса контактного провода 40 мм и приведенной массы токоприемника, кг: 1 – 30, 2 – 35, 3 – 40

Контактные нажатия при полной компенсации аэродинамической подъемной силы и рациональная величина этой силы при различных скоростях движения и величинах приведенной массы

Скорость движения, км/ч	120	140	160	180	200	210	220	230	240
$m = 30 \text{ кг}$									
$P_{\text{кт max}}, \text{Н}$	130,86	132,87	133,09	134,00	141,68	146,39	151,12	156,35	163,62
$P_{\text{кт min}}, \text{Н}$	87,81	82,89	79,07	76,53	66,94	62,94	57,70	51,49	42,79
$P_{\text{вт раб}}, \text{Н}$	9,00	11,00	14,00	18,00	24,00	26,00	28,00	29,00	30,00
$m = 35 \text{ кг}$									
$P_{\text{кт max}}, \text{Н}$	132,19	132,92	133,59	136,30	148,64	154,77	162,01	173,28	189,08
$P_{\text{кт min}}, \text{Н}$	85,91	80,71	76,73	73,20	59,86	52,74	44,86	32,72	17,12
$P_{\text{вт раб}}, \text{Н}$	9,00	12,00	15,00	19,00	26,00	28,00	30,00	*	*
$m = 40 \text{ кг}$									
$P_{\text{кт max}}, \text{Н}$	133,20	133,70	135,20	140,50	159,10	167,80	184,40	199,40	206,20
$P_{\text{кт min}}, \text{Н}$	85,70	80,30	74,50	67,50	48,00	38,30	22,20	5,60	-1,90
$P_{\text{вт раб}}, \text{Н}$	10,00	13,00	16,00	21,00	28,00	30,00	*	*	*

* – контактное нажатие выходит за границы допустимого диапазона при любом значении аэродинамической подъемной силы.

Данные таблицы показывают, что рост приведенной массы токоприемника увеличивает изменение контактного нажатия вне допустимого диапазона, поэтому при приведенной массе токоприемника 35 кг скорость движения не должна превышать 220 км/ч, при 40 кг – 210. Только до этих скоростей регулирование контактного нажатия целесообразно обеспечивать за счет аэродинамических сил. Отсюда следует, что аэродинамическая подъемная сила не должна превышать 30 Н. Однако для токоприемников с различной приведенной массой эту силу следует принимать исходя из скорости движения.

Рациональная аэродинамическая подъемная сила токоприемника должна определяться согласно следующему алгоритму:

- 1) определение исходных данных, а именно типа токоприемника и контактной подвески, их параметров;
- 2) расчет контактного нажатия, определение его максимальной и минимальной величины в пролете при полностью скомпенсированной аэродинамической подъемной силе;
- 3) установление допустимого диапазона изменения контактного нажатия, сравнение гра-

Подвижной состав железных дорог

ниц данного диапазона с максимальным и минимальным контактным нажатием при полностью скомпенсированной аэродинамической подъемной силе;

4) определение величины рациональной аэродинамической силы, при которой контактное нажатие не будет выходить за границы допустимого диапазона.

Данный алгоритм повторяется для всех заданных скоростей, и строится рациональная аэродинамическая характеристика.

Рассмотрев величины, приведенные в таблице, отметим, что при большей приведенной массе возрастает инерционная сила и соответственно увеличивается разброс контактного нажатия. Это, в свою очередь, ведет к уменьшению максимально допустимой скорости движения, что должно учитываться при определении рациональной аэродинамической характеристики токоприемника.

Аналогичным образом рассчитаны максимальные и минимальные величины контактного нажатия при полной компенсации аэродинамической подъемной силы, когда стрела провеса контактного провода изменялась от 40 до 60 мм. В качестве примера на рисунке 3 приведена зависимость контактного нажатия от стрелы провеса при скорости 180 км/ч и приведенной массе токоприемника 35 кг.

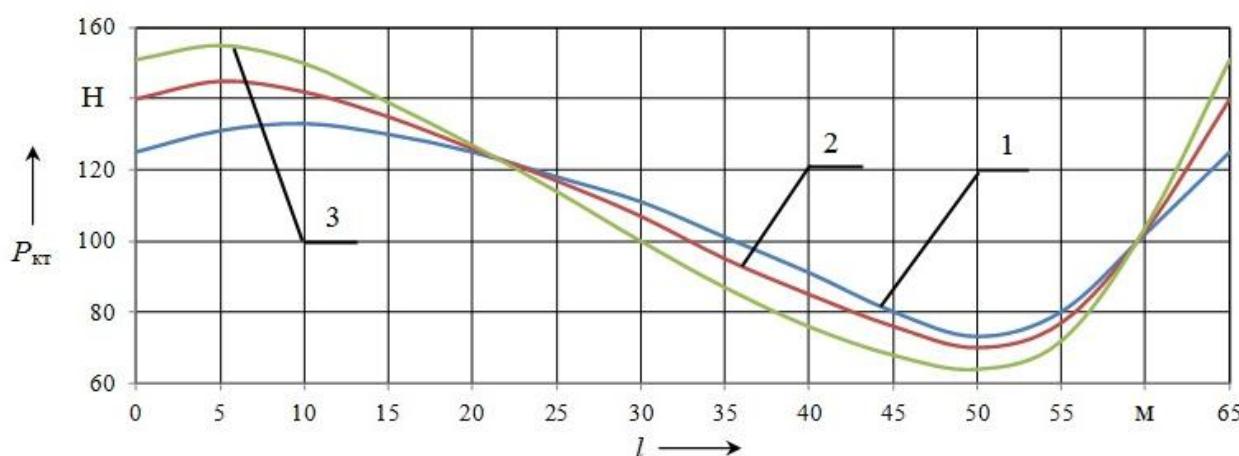


Рисунок 3 – Изменение контактного нажатия при полной компенсации аэродинамической подъемной силы, скорость – 180 км/ч, приведенная масса токоприемника – 35 кг, стрела провеса, мм: 1 – 40, 2 – 50, 3 – 60

Приведенные на рисунке 3 зависимости показывают, что изменение контактного нажатия возрастает при увеличении стрелы провеса. Так, при стреле провеса 40 мм наибольшее контактное нажатие составляет 136,3 Н (на 23,9 % больше статического), наименьшее – 73,2 Н (на 33,4 % меньше статического), а при стреле провеса 60 мм они равны 155,5 (на 41,3 % больше статического) и 64,1 Н (на 41,7 % меньше статического) соответственно. Эти данные свидетельствуют о том, что чем больше стрела провеса, тем сильнее изменяется контактное нажатие в пролете вследствие увеличения инерционных сил. С увеличением этих сил для их компенсации необходимо увеличить аэродинамическую подъемную силу, но при этом нажатие не должно выходить за диапазон, рассчитанный по формулам (1), (2).

Рассмотрим, как изменение величины рациональной аэродинамической подъемной силы зависит от приведенной массы токоприемника (рисунок 4). Стрела провеса контактного провода принята равной 40 мм.

Из рисунка 4 видно, что у токоприемника с большей приведенной массой будет больше и инерционная составляющая контактного нажатия и усилится разброс контактного нажатия в пролете, следовательно, должна быть увеличена и аэродинамическая подъемная сила. Так, при 180 км/ч и массе в 30 кг целесообразно иметь аэродинамическую подъемную силу 17 Н, а при массе 40 кг – не менее 21 Н.

Подвижной состав железных дорог

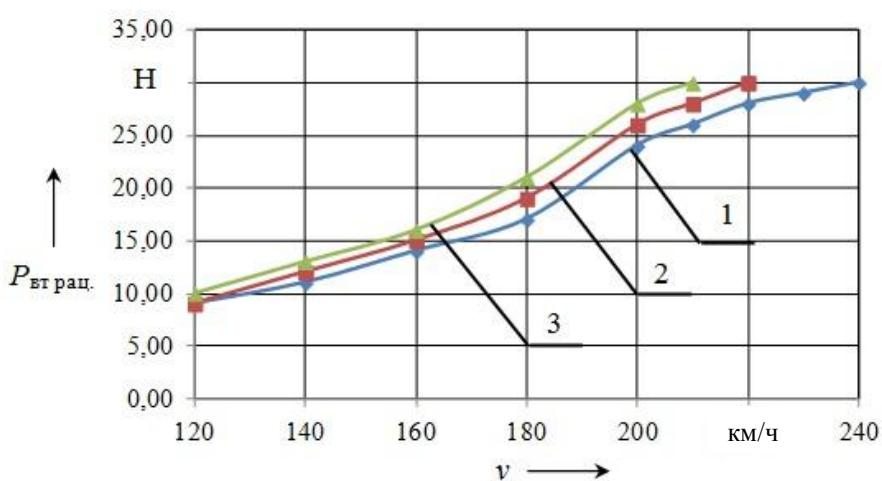


Рисунок 4 – Рациональная аэродинамическая характеристика токоприемника с приведенной массой, кг:
1 – 30, 2 – 35, 3 – 40

Рациональная аэродинамическая подъемная сила зависит также от стрелы провеса контактного провода. На рисунке 5 приведена рациональная аэродинамическая характеристика токоприемника с приведенной массой 35 кг при различных стрелах провеса.

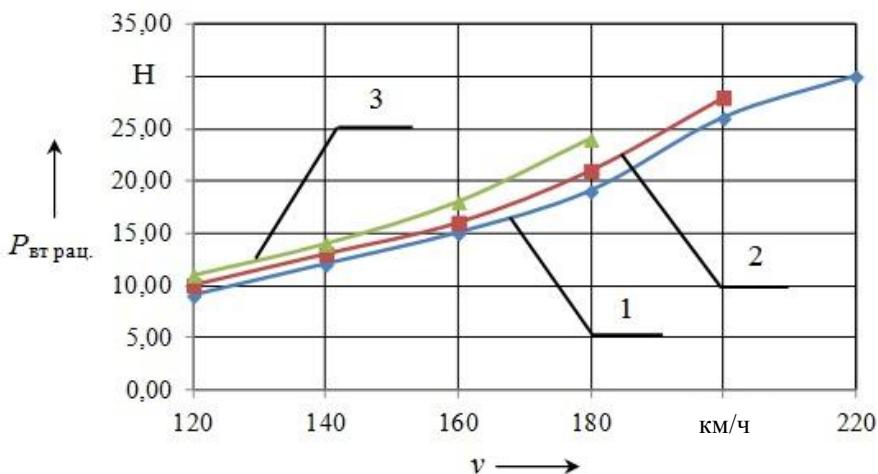


Рисунок 5 – Рациональная аэродинамическая характеристика токоприемника при различных стрелах провеса контактного провода, мм: 1 – 40, 2 – 50, 3 – 60

Из рисунка 5 видно, что при скорости 180 км/ч и стреле провеса 40 мм рациональная аэродинамическая подъемная сила равна 19 Н, а для 60 мм – 24 Н. С учетом всех возможных стрел провеса контактного провода и других влияющих факторов можно осреднить рациональную аэродинамическую характеристику. В этом случае следует для каждой скорости рассчитать среднее значение аэродинамической подъемной силы при всех заданных стрелах провеса. Осредненная аэродинамическая характеристика и будет той рациональной характеристикой, которую необходимо получить для токоприемника с заданной приведенной массой. Эта характеристика для токоприемника с приведенной массой 35 кг приведена на рисунке 6.

Для того чтобы связать аэродинамическую подъемную силу с приведенной массой, введем величину, которую назовем аэродинамическим показателем:

$$k_a = \frac{P_{\text{вт}}}{m}, \quad (3)$$

Подвижной состав железных дорог

где m – приведенная масса токоприемника, кг;
 $P_{\text{вт}}$ – аэродинамическая подъемная сила, Н.

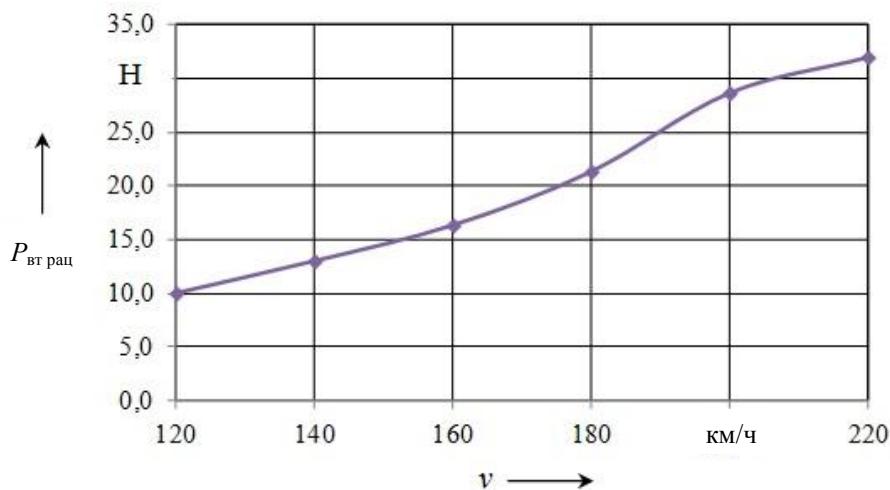


Рисунок 6 – Осредненная аэродинамическая характеристика токоприемника

Из выражения (3) видно, что данный показатель имеет размерность Н/кг и характеризует величину аэродинамической подъемной силы, необходимую для компенсации инерционных сил, вызванных вертикальными перемещениями токоприемника. Аэродинамический показатель зависит от скорости движения электроподвижного состава, стрелы провеса контактного провода и других параметров контактной подвески и токоприемника. При скорости 160 км/ч k_a изменяется в пределах от 0,40 до 0,46 Н/кг, а при 180 км/ч – от 0,53 до 0,60 Н/кг соответственно.

Таким образом, при определении рациональной аэродинамической характеристики токоприемника электроподвижного состава необходимо руководствоваться величиной его приведенной массы с учетом параметров подвески, влияющих на составляющие контактного нажатия. Следует учитывать и тот факт, что в процессе токосъема изменяется рабочая высота, а следовательно, и приведенная масса токоприемника, что требует использования регулируемых аэродинамических устройств, аэродинамическая подъемная сила которых изменяется в зависимости от рабочей высоты, позволяя получить заданную рациональную аэродинамическую характеристику.

Список литературы

1. Михеев, В. П. Контактные сети и линии электропередачи [Текст] / В. П. Михеев. – М.: Маршрут, 2003. – 416 с.
2. Рубан, В. Г. Решение задач динамики железнодорожных экипажей в пакете Mathcad [Текст] / В. Г. Рубан, А. М. Матва / Ростовский гос. ун-т путей сообщения. – Ростов-на-Дону, 2009. – С. 63 – 74.
3. Вологин, В. А. Взаимодействие токоприемника и контактной сети [Текст] / В. А. Вологин. – М.: Интекст, 2006. – 256 с.
4. Pombo, J. Influence of the aerodynamic forces on the pantograph-catenary system for high-speed trains / J. Pombo, J. Ambrosio and other // Vehicle System Dynamics. – Milano. – 2009. – Vol. 47, № 11. – P. 1327 – 1347
5. Маслов, Г. П. Аэродинамические показатели токоприемников скоростного электрического подвижного состава [Текст] / Г. П. Маслов, М. А. Дятлова // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2010. – № 1. – С. 20 – 25.
6. Смердин, А. Н. Совершенствование методики исследования волновых процессов в

Подвижной состав железных дорог

контактной подвеске на основе конечно-элементной модели [Текст] / А. Н. Смердин, А. С. Голубков, В. А. Жданов // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – 2011. – № 1. – С. 30 – 37.

7. Дербилов, Е. М. Особенности имитационного моделирования взаимодействия токоприемников и контактных подвесок на сопряжениях [Текст] / Е. М. Дербилов // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2011. – № 4. – С. 10 – 16.

8. Аркашев, А. Е. Моделирование взаимодействия токоприемника и контактной подвески с учетом отрыва полоза от контактного провода [Текст] / А. Е. Аркашев, И. В. Ларькин // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2011 – № 3. – С. 2 – 8.

УДК 629.4.017:531.43:544.021

Ю. И. Матяш, С. Н. Крохин, Ю. М. Сосновский

ПРИМЕНЕНИЕ СОВРЕМЕННЫХ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ ПОДХОДОВ К ОЦЕНКЕ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ НА ПРИМЕРЕ ТОРМОЗНЫХ КОЛОДОК

В данной статье рассмотрены проблемы эксплуатации тормозных колодок, применяемых на пассажирских вагонах железнодорожного транспорта. Показано, что отвод тепловой энергии при торможении является актуальной задачей. Рассмотрены физические основы теплопроводности твердых тел с учетом амортизационного характера тепловых колебаний атомов. Предложен экспресс-метод оценки теплопроводности чугунных тормозных колодок пассажирских вагонов.

В настоящее время все магистральные железнодорожные линии с интенсивным движением поездов оборудованы автоматической блокировкой. Машинист, руководствуясь показаниями сигналов, ведет поезд и ему остается только внимательно следить за показаниями светофоров. Но если машинист по какой-либо причине не заметил запрещающего сигнала светофора и проехал на него, его «поправит» уже другая система, имеющая название «Автостоп». В этом случае реализуется так называемое экстренное торможение, которое по длительности его осуществления не превышает 45 – 50 секунд. Кинетическая энергия подвижного состава в этом случае преобразуется в тепловую энергию, которая расходуется на нагрев колеса и тормозной колодки.

В литературе имеются сведения о том, что даже при эксплуатации типовых грузовых составов возникают значительные проблемы с обеспечением работоспособности тормозного оборудования. Так, например, по данным отделения автотормозного хозяйства ВНИИЖТа в режиме остановочного торможения пассажирского вагона массой брутто 60 т с начальной скоростью 60 км/ч температура нагрева колес составляет на поверхности катания и на глубине 40 мм от нее 637 и 570 °C соответственно [1].

При таком нагреве изменяются механические свойства материала обода колес. Предел прочности стали с содержанием углерода 0,42 – 0,50 % при нагреве до температуры 550 °C снижается и составляет не более 50 % его значения при температуре 20 °C. Чередование тормозного нажатия на колодку и отпуска тормозов в условиях эксплуатации вызывает циклические тепловые нагрузки, которые создают знакопеременные деформации, в результате чего на поверхности катания возникают термоусталостные разрушения материала в виде трещин с последующим выкрашиванием. Частое торможение при повышенных скоростях движения пассажирских поездов и перегрев фрикционных узлов требуют интенсивного отвода значительного количества тепла [2].

Очевидно, что при увеличении скорости движения поездов, их длины и веса проблемы, связанные с обеспечением безопасности движения грузовых поездов, значительно усложняются. Это связано прежде всего с тем, что количество рассеиваемой энергии при торможении

Подвижной состав железных дорог

возрастает пропорционально квадрату начальной скорости состава при торможении. С целью предотвращения термоусталостных разрушений необходимо снизить уровень нагрева поверхности колеса и тормозной колодки. Для эффективного рассеяния тепловой энергии, возникающей в процессе торможения подвижного состава, необходимо, чтобы материал тормозных колодок колес имел высокую теплопроводность.

Анализ результатов испытаний тормозных колодок различных поставщиков показал, что оценка их теплопроводности вообще не предусмотрена [2].

Рассмотрим физические основы теплопроводности металлов и их сплавов при значениях температуры, соответствующих реальным условиям работы системы «колесо – тормозная колодка» в режиме экстренного торможения грузового подвижного состава.

Подавляющее большинство металлов являются кристаллическими телами, имеющими определенный тип кристаллической решетки, состоящей из малоподвижных положительно заряженных ионов, между которыми движутся свободные электроны (так называемый электронный газ). Такой тип структуры обусловлен металлической связью.

Связь в решетке возникает вследствие взаимодействия положительных ионов с электронным газом. Электроны, находящиеся между ионами, «стягивают» их, стремясь уравновесить силы отталкивания, действующие между одноименно заряженными ионами. С уменьшением расстояния между ионами увеличиваются силы отталкивания, которые определяют твердость кристалла. При достижении такого расстояния между ионами, при котором силы притяжения уравновешиваются силами отталкивания, решетка становится устойчивой. Вместе с тем следует заметить, что в реальных твердых телах, всегда присутствует несколько типов связей, одна из которых, как правило, является превалирующей.

Ионы в решетке совершают тепловые колебания около положения равновесия. Межатомное взаимодействие приводит к тому, что характер результирующих колебаний оказывается весьма сложным. Обычно из-за наличия мощных сил связи между ионами рассматривается их коллективное тепловое движение в кристалле. Критерием вовлеченности ионов в такое коллективное тепловое движение служит характеристическая температура Дебая T_D . Температуру выше дебаевской принято называть высокой, а ниже – низкой.

При температуре $T > T_D$ в твердом теле возбуждается весь спектр нормальных колебаний решетки, поэтому дальнейшее повышение температуры уже не приводит к появлению новых нормальных колебаний, а приводит только к увеличению степени их возбуждения. Следует заметить, что характеристическая температура Дебая, например, для меди составляет 66 °C, для алюминия – 145 °C, для железа – 194 °C и т. д. [4 – 8]. Если рассматривать тепловую энергию решетки $W_{\text{реш}}$ как сумму тепловых энергий ее атомов (ионов), то в области высоких температур $W_{\text{реш}} \sim T$ и теплоемкость при постоянном объеме C_V в этом случае не зависит от температуры:

$$C_V = \frac{dW_{\text{реш}}}{dT} = \text{const.} \quad (1)$$

При температурах $T < T_D$, как хорошо показано в источниках [4 – 8], теплоемкость пропорциональна кубу температуры.

Следует заметить, что теплоемкость электронного газа в области средних и высоких температур не влияет на общую теплоемкость твердого тела, так как тепловому возбуждению подвержены менее 1 % электронов. Теплоемкость электронного газа становится заметной только в области очень низких температур [4, 5].

На рисунке 1 схематично показана зависимость потенциальной энергии связи двух атомов (1 и 2), находящихся в узлах кристаллической решетки. Такой вид зависимости $U(r)$ обусловлен резко отличающейся зависимостью сил притяжения и отталкивания. На рисунке U_0 – глубина минимума или энергия связи, r_0 – среднее межатомное расстояние.

Для малых отклонений от положения равновесия потенциальную энергию взаимодействующих атомов $U(r)$ можно разложить в ряд Тейлора, ограничившись первыми тремя членами:

Подвижной состав железных дорог

ми ряда, вблизи точки $r = r_0$.

$$U(r) = U(r_0) + (r - r_0) \left(\frac{\partial U}{\partial r} \right)_{r=r_0} + \frac{1}{2} (r - r_0)^2 \left(\frac{\partial^2 U}{\partial r^2} \right)_{r=r_0} - \frac{1}{6} (r - r_0)^3 \left(\frac{\partial^3 U}{\partial r^3} \right)_{r=r_0} + \dots \quad (2)$$

Введем обозначения: $U(r_0) = U_0$, $\beta = \left(\frac{\partial^2 U}{\partial r^2} \right)_{r=r_0}$, $2\gamma = \left(\frac{\partial^3 U}{\partial r^3} \right)_{r=r_0}$, $\bar{u} = r - r_0$.

В результате сила, действующая на атом, с учетом того, что первая производная в точке равновесия равна нулю, может быть представлена в виде:

$$F = -\frac{\partial U}{\partial r} = -\bar{u} + \bar{u}^2. \quad (3)$$

Если ограничиться только первым слагаемым, то мы имеем дело с классическим законом Гука и атомы в решетке совершают гармонические колебания. Учет второго слагаемого говорит об ангармоничности колебаний, где γ – коэффициент ангармоничности (ангармонизма).

Ангармонический характер колебаний атомов по сути является «главной причиной» наличия теплового сопротивления или теплопроводности металлов [4, 8]. Теплопроводность – это перенос тепловой энергии структурными частицами вещества (молекулами, атомами, ионами) в процессе их теплового движения. Численной характеристикой теплопроводности любого материала является коэффициент теплопроводности λ , равный количеству теплоты Q , проходящей через материал толщиной $l = 1$ м и площадью $S = 1 \text{ м}^2$ за $t = 1$ с при разности температур ΔT на двух противоположных поверхностях в 1 К. Процесс теплопередачи описывается законом Фурье.

Для стационарного потока тепла закон Фурье имеет вид:

$$Q = -\lambda \frac{S \Delta T}{l} t. \quad (4)$$

Если бы колебания атомов в кристаллической решетке имели гармонический характер, то тепловой фронт волн распространялся бы в металле со скоростью звука. Теплопроводность металла в этом случае была бы бесконечно большой. Наличие ангармоничности приводит к тому, что нормальные колебания решетки утрачивают независимый характер. Происходит обмен энергией, который обычно рассматривается с точки зрения фонон-фононного рассеяния для решеточной теплопроводности и электрон-фононного взаимодействия для электронной.

В общем случае коэффициент теплопроводности λ складывается из теплопроводности решетки $\lambda_{\text{реш}}$ и теплопроводности электронного газа λ_e .

Теплопроводность решетки $\lambda_{\text{реш}}$ в области высоких температур обратно пропорциональна абсолютной температуре T [4] :

$$\lambda_{\text{реш}} \sim \frac{C_V \nu}{T \gamma^2}. \quad (5)$$

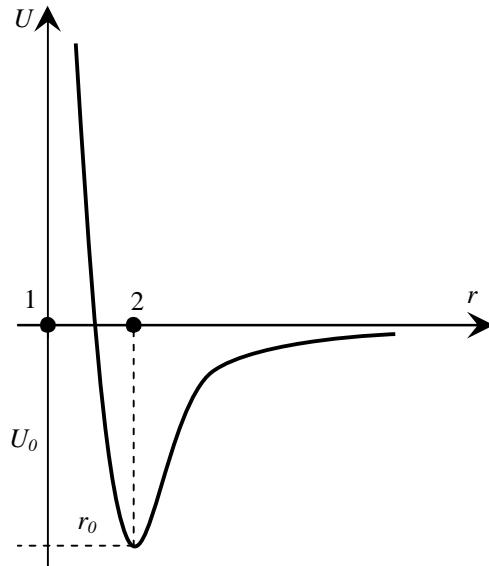


Рисунок 1 – Зависимость потенциальной энергии связи двух атомов (1 и 2), находящихся в узлах кристаллической решетки

Подвижной состав железных дорог

Здесь C_V – теплоемкость решетки при постоянном объеме, не зависящая от температуры (1); v – скорость фононов или скорость звука в твердом теле, связанная с упругими свойствами твердого тела; γ – коэффициент ангармоничности, определяемый по зависимости $U(r)$ (2).

Теплопроводность электронного газа λ_e в области высоких температур от температуры не зависит [4]:

$$\lambda_e = \text{const}. \quad (6)$$

Как показано в работах [4 – 8], в области высоких температур ($T > T_D$) для чистых металлов отношение

$$\frac{\lambda_{\text{реш}}}{\lambda_e} \approx 5 \cdot 10^{-2}. \quad (7)$$

Это говорит о том, что теплопроводность чистых металлов в основном является электронной, причем она обратно пропорциональна концентрации фононов в металле.

Таким образом, теплопроводность идеализированных чистых металлов теоретически можно рассчитать, используя выражения (5) и (7). Следует заметить, что в настоящее время эффективные экспресс-методы, пригодные для быстрой оценки величины теплопроводности, отсутствуют. Существующие методы и средства для измерения теплопроводности чистых металлов и сплавов различного состава и назначения, как правило, представляют собой достаточно сложное и дорогостоящее техническое оборудование [3].

Появление в составе кристаллической решетки других атомов (например, в виде примесей, включений) приводит к тому, что возникают дополнительные центры рассеяния, и длина свободного пробега электрона может стать меньше, что в свою очередь приведет к уменьшению теплопроводности. С другой стороны, различного рода включения могут приводить к ослаблению энергии межатомной связи, к образованию микропор и их развитию.

Влияние включений на структуру твердого тела показано на рисунке 2. Включение примесей в структуру металла приводит к увеличению расстояния между атомами и его рыхлости и, как следствие, к уменьшению теплопроводности и твердости.

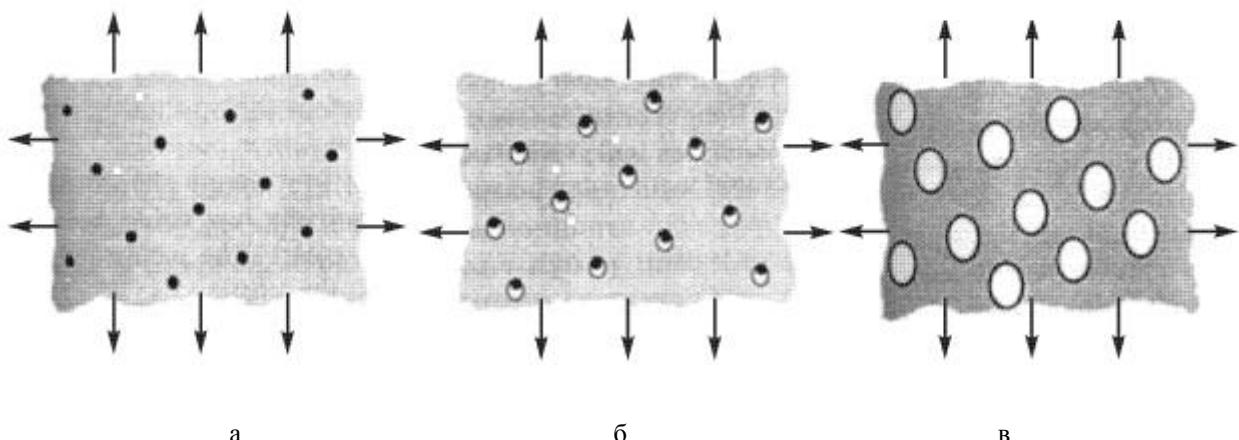


Рисунок 2 – Динамическое влияние включений на рыхлость металла: а – включения на начальной стадии; б – образование микропор у включений; в – увеличение микропор [9]

Таким образом, уменьшение теплопроводности и увеличение рыхлости являются связанными процессами.

Увеличение рыхлости, в свою очередь, приводит к уменьшению твердости. Более того, этот процесс не является стационарным. Как было сказано выше, измерение теплопроводности – достаточно сложная задача. Измерение рыхлости – задача более доступная и простая, поэтому мы предлагаем новый экспресс-метод оценки теплопроводности через твердость исследуемого материала.

Подвижной состав железных дорог

В научной литературе кристаллоэнергетический подход к описанию свойств твердых тел основан на понятии рыхлости w , которая согласно рекомендациям [10] определяется как

$$w = \frac{M}{n\rho}, \quad (8)$$

где M – молекулярная масса, равная сумме атомных весов элементов соединения; n – число структурных узлов (атомов, ионов) в формульной единице соединения; ρ – плотность. Параметр w косвенно характеризует энергию межатомного взаимодействия, уплотнение, контрактацию (сжатие) слагающих это вещество атомов.

Из общих теоретических соображений ясно, что чем прочнее физико-химические межатомные связи и больше их энергия, тем более отчетливо проявляется эффект «стягивания» атомов в компактную кристаллическую решетку (структуре) и тем меньше будет соответствующая величина ее структурной рыхлости. И наоборот, чем слабее химические связи соединения и меньше их энергия, тем больше будет параметр его структурной рыхлости.

Под твердостью обычно понимают способность поверхностного слоя материала сопротивляться упругой и пластической деформации или разрушению при внедрении в него другого, более твердого тела – индентора. Индентор должен быть определенной формы и размеров и не должен иметь остаточной деформации, обусловленной прикладываемыми к нему статическими и динамическими нагрузками. Выбор метода определения твердости зависит от твердости материала, размеров детали, толщины слоя и т. д. Характеристикой твердости материала является число, которое может определяться различными методами: Бринелля, Виккерса, Роквелла и др.

Метод Бринелля заключается во вдавливании стального шарика в образец под действием силы, приложенной перпендикулярно поверхности образца в течение определенного времени, и в измерении диаметра отпечатка после снятия силы. Число твердости по Бринеллю НВ (Hardness Brinell) определяется как отношение силы, приложенной к шарику, к площади поверхности сферического отпечатка, оставленного стальным шариком. Для уменьшения погрешности определения твердости, связанной с деформацией самого индентора, метод Бринелля обычно применяется для измерения твердости, не превышающей 450 НВ (4410 МПа).

Метод измерения твердости, основанный на вдавливании алмазного наконечника в форме правильной четырехгранной пирамиды в образец, называется методом Виккерса. Метод Виккерса является одним из наиболее совершенных и распространенных в лабораторной практике. Высокая твердость алмаза обеспечивает большую точность определения твердости. Твердость по Виккерсу (Hardness Vickers) определяется как отношение силы, приложенной к алмазной пирамиде, к площади поверхности отпечатка.

В работе [10] зависимость теплопроводности λ и твердости НВ от рыхлости w металла представлена так:

$$\lambda = 5449,8 \cdot w^{-3,831}; \quad (9)$$

$$HB = 155644 \cdot w^{-2,7}. \quad (10)$$

Формулы (9) и (10) представляют собой корреляционные зависимости, полученные авторами работы [10] на основе многочисленных экспериментальных данных для различных кристаллических соединений.

Рассмотрим выражения (9) и (10) применительно к чугунным тормозным колодкам.

Согласно ГОСТ 28186-89 твердость чугунных тормозных колодок для мотор-вагонного подвижного состава должна иметь значения в пределах от 187 до 241 НВ для колодок типа Ф и от 197 до 285 НВ для колодок типа Р. Для чугунных тормозных колодок локомотивов согласно ГОСТ 30249-97 значение твердости составляют 229 – 302 НВ для чугуна марки М и 217 – 303 НВ – для чугуна марки Р. Таким образом, твердость чугунных тормозных колодок может принимать значения от 187 до 303 НВ или от 1833 до 2969 МПа соответственно.

Подвижной состав железных дорог

Теплопроводность чугуна разных марок колеблется в пределах от 25,2 до 62,8 Вт/(м·К).

Для установления зависимости $NB = f(\lambda)$ определим значения рыхлости w для трех значений диапазона твердости и теплопроводности по формулам (9) и (10). Полученные результаты представлены в таблице.

Данные для нормировки теплопроводности и твердости чугунных тормозных колодок

Твердость NB, МПа	Рыхлость, w_{NB}	Теплопроводность, λ	Рыхлость, w_λ
1833	5,2	25,2	4,1
2401	4,7	44,0	3,5
2969	4,3	62,8	3,2

Аппроксимируя зависимость $w_{NB} = f(w_\lambda)$ полиномиальной функцией, получим:

$$w_{NB} = -0,5556w_\lambda^2 + 5,0556w_\lambda - 6,1889. \quad (11)$$

Тогда с учетом выражений (9), (10) и (11) окончательно имеем:

$$NB = 1321,2 \cdot \exp(0,0131\lambda), \quad (12)$$

где NB – твердость по Бринеллю (МПа); λ – теплопроводность (Вт/(м·К)).

Полученная зависимость (12) представлена на рисунке 3. Заштрихованная область на рисунке 3 соответствует твердости и теплопроводности чугунных тормозных колодок типа P . Так, например, если твердость тормозной колодки составляет 2400 МПа, то соответствующее значение теплопроводности – 45 Вт/(м·К).

Полученные результаты позволяют сделать следующие выводы.

Установленная корреляционная зависимость между твердостью и теплопроводностью чугуна (12) может стать основой для создания экспресс-методики оценки теплопроводности тормозных колодок (см. рисунок 3).

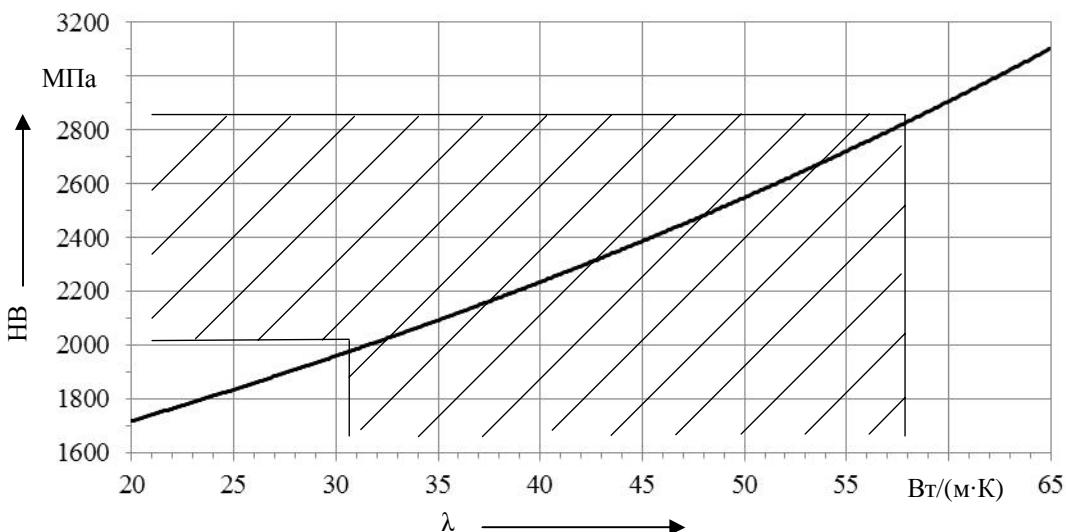


Рисунок 3 – Связь твердости NB с теплопроводностью λ чугунных тормозных колодок

Рассмотренные физико-химические подходы к оценке теплопроводности тормозных колодок могут стать основой метода разработки новых конструкционных материалов соответствующих требованиям безопасности высокоскоростного железнодорожного транспорта.

Рассмотренный подход, основанный на использовании теоретических представлений о физико-химических свойствах твердых тел в сочетании с экспериментальными зависимостями, позволил получить связь между твердостью и теплопроводностью чугунных тормозных колодок. Следует заметить, что это не единственная зависимость, которая может быть получена подобным образом.

В заключение хотелось бы отметить, что авторы с благодарностью воспримут все конструктивные замечания и предложения по рассмотренной теме.

Подвижной состав железных дорог

Список литературы

1. Исследование эксплуатационных дефектов фрикционного сопряжения тормозной колодки с колесом вагона [Текст] / Б. М. Асташкевич, С. Г. Иванов и др. // Вестник ВНИИЖТ, 2004. – № 4. – С. 44 – 48.
2. Вуколов, Л. А Сравнительные характеристики тормозных колодок различных поставщиков [Текст] / Л. А Вуколов, В. А. Жаров // Вестник ВНИИЖТ, 2005. – № 2. – С. 16 – 20.
3. Ковалева, И. В. Метод измерения теплопроводности твердых теплоизоляционных материалов на основе интегральной формы уравнения Фурье [Текст]: Автореф. дис ... канд. техн. наук / И. В. Ковалева. М., 2005. – 16 с.
4. Епифанов, Г. И. Физика твердого тела [Текст] / Г. И. Епифанов. – М.: Высшая школа, 1977. – 288 с.
5. Блейкмор, Дж. Физика твердого тела [Текст] / – М.: Мир, 1988. – 608 с.
6. Киттель, Ч. Квантовая теория твердых тел [Текст] / Ч. Киттель. – М.: Наука, 1967. – 492 с.
7. Павлов, П. В. Физика твердого тела [Текст] / П. В. Павлов, А. Ф. Хохлов. – М.: Высшая школа, 2000. – 494 с.
8. Верещагин, И. К. Физика твердого тела [Текст] / И. К. Верещагин, С. М. Кокин, В. А. Никитенко. – М.: Высшая школа, 2001. – 237 с.
9. Матвиенко, Ю. Г. Модели и критерии механики разрушений [Текст] / Ю. Г. Матвиенко – М.: Физматлит, 2006. – 328 с.
10. Зуев, В. В. Кристаллоэнергетика как основа оценки свойств твердотельных материалов (включая магнезиальные цементы) [Текст] / В. В. Зуев, Л. Н. Поцелуева, Ю. Д. Гончаров – СПб: Альфапол, 2006. – 139 с.
11. Смольянинов, П. В. Обоснование пути повышения надежности тормозной системы грузовых вагонов [Текст] / П. В. Смольянинов, В. С. Смольянинов, В. А. Четвергов // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2012. – №1 (9). – С. 42 – 50.
12. Галиев, И. И. Безопасность движения грузовых поездов и динамические свойства ходовой части вагона [Текст] / И. И. Галиев, В. А. Нехаев, В. А. Николаев // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2012. – №1 (9). – С. 107 – 112.
13. Шантаренко, С. Г. Технологический аудит как инструмент обеспечения эксплуатационной надежности локомотивов [Текст] / С. Г. Шантаренко, М. Ф. Капустян // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2011. – №4 (8). – С. 63 – 68.
14. Молchanov, B. B. Новые технологии и оборудование контроля и диагностирования железнодорожной техники [Текст] / B. B. Molchanov, B. G. Shakhov // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2010. – №4 (4). – С. 116 – 120.

УДК 629.45.048

О. С. Томилова

РАСЧЕТ ЭФФЕКТИВНОСТИ УФ-СТЕРИЛИЗАТОРА МОДЕРНИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ ВОДОСНАБЖЕНИЯ ПАССАЖИРСКОГО ВАГОНА

В статье приведена классификация основных методов обеззараживания воды, возможных к применению на железнодорожном транспорте, рассмотрены недостатки существующей методики определения эффективности УФ-излучения, предложены и определены с помощью приложения Flow Works программы SolidWorks количественные показатели эффективности на основе элементов статистики: среднеквадратическое отклонение и модальная величина дозы облучения для типового и УФ-стерилизатора с концентрично установленными патрубками модернизированной системы водоснабжения пассажирского вагона.

В настоящее время питьевая вода является одним из дефицитных ресурсов планеты. В нашей стране эта проблема не столь актуальна. Тем не менее ученые приводят различные

Подвижной состав железных дорог

аргументы для привлечения общественного внимания и рационального использования пресных водных ресурсов. Ряд экологов требуют вмешательства в решение названной проблемы на мировом уровне.

Качество подготовки питьевой воды на железнодорожном транспорте влияет на состояние пассажиров в пути следования, в том числе на их безопасность. Существующий способ периодической дезинфекции системы водоснабжения с помощью хлорамина, применяемый на железных дорогах Российской Федерации, имеет ряд недостатков [1, 2], в результате которых система может находиться в неудовлетворительном состоянии и может не отвечать санитарным требованиям [3].

Классификация основных способов и методов инактивации (обеззараживания) воды, возможных к применению на железнодорожном транспорте, приведена на рисунке 1.

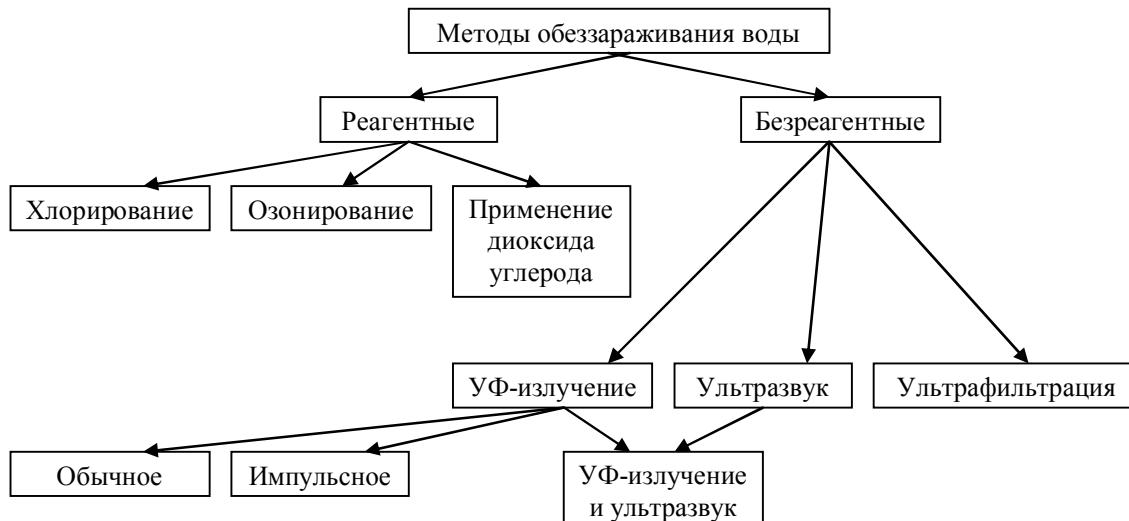


Рисунок 1 – Классификация основных методов обеззараживания воды, возможных к применению на железнодорожном транспорте

Кроме того, система заправки водой пассажирских вагонов и конструкция самотечной системы холодного водоснабжения подвержены воздействию негативных факторов, способствующих вторичному загрязнению воды [1, 4]. Несмотря на различное конструктивное исполнение принципиальное устройство систем водоснабжения пассажирских вагонов практически одинаково, а их водоналивные системы заправляются от типовых колонок.

Перечисленные выше обстоятельства, особенности и недостатки способов дезинфекции определяют выбор автора статьи в пользу обычного ультрафиолетового (УФ) способа очистки воды, который может быть использован на этапах предварительного (как альтернативного хлорированию, так и совместного) и заключительного обеззараживания питьевой воды [5]. Совместное применение УФ-излучения и хлора повышает санитарную надежность обеззараживания в отношении вирусов.

Источниками УФ-излучения конструктивно могут быть лампы с отражателями или с защитными кварцевыми чехлами. УФ-лампы с отражателями используются в установках с непогруженными источниками излучения. Эти лампы располагаются над свободно текущей водой, т. е. в установках отсутствует непосредственный контакт ламп с водой. УФ-лампы с защитными кварцевыми чехлами применяются в установках с погруженными источниками излучения. Лампы с защитными чехлами располагаются в потоке воды, обтекающей их со всех сторон. Защитные чехлы изготавливаются обычно из кварцевого стекла и предназначены для стабилизации температурного режима ламп. Для обеззараживания питьевой воды чаще применяются установки с погруженными источниками вследствие более высокой эффективности использования УФ-излучения ламп. Оба типа источников присутствуют в предлагаемой автором системе водоснабжения пассажирского вагона [1].

Согласно методическим указаниям [5] контроль за дозой облучения производится путем учета интенсивности бактерицидного излучения в камере обеззараживания, времени пребывания воды в ней и рассчитывается по формуле, мДж/см²:

Подвижной состав железных дорог

$$D = I \cdot t, \quad (1)$$

где I – минимальная интенсивность бактерицидного излучения, мВт/см²;

t – среднее время пребывания воды в камере обеззараживания, с:

$$t = S \cdot L / 278Q, \quad (2)$$

где S – поперечное сечение камеры обеззараживания, см;

L – длина камеры обеззараживания, см;

Q – расход воды, м³/ч;

278 – коэффициент пересчета размерности единиц.

В приведенных формулах (1) и (2) используются приближенные величины, такие как среднее время, и неэкономичные, как минимальная интенсивность, аргументом по использованию которой является отсутствие передозировки. Повышение дозы УФ-излучения не приводит к гигиенически значимым неблагоприятным изменениям свойств воды и образованию побочных продуктов. Доза УФ-облучения должна быть увеличена до значений, обеспечивающих эпидемическую безопасность воды как по бактериям, так и по вирусам [5]. Однако питание УФ-лампы будет осуществляться от аккумуляторов вагона, заряд которых ограничен, как и ресурс УФ-лампы. Рациональное использование мощности УФ-установки обеззараживания воды является ключевой и весьма актуальной задачей [6, 7].

Проблема возникает при детальном рассмотрении траекторий движения элементарных струй. Часть струй пройдет дальше от поверхности лампы, часть – ближе. Очевидно, что в этом случае интенсивность облучения элементарных струй разная. Проникновение УФ-лучей в воду сопровождается их поглощением водой и веществами, находящимися в воде в растворенном или взвешенном состоянии. Согласно закону Бугера – Ламберта – Бера, определяющему ослабление параллельного монохроматического пучка света при распространении его в поглощающей среде, интенсивность облучения, мВт/см²:

$$I(l) = I_0 \cdot e^{-k_\lambda l}, \quad (3)$$

где I_0 – интенсивность исходящего пучка, мВт/см²;

l – толщина слоя вещества, через которое проходит свет, мм;

k_λ – коэффициент поглощения, цифровое выражение которого указывает долю бактерицидного излучения, поглощенного слоем воды толщиной 10 мм:

$$k_\lambda = 4\pi\kappa / \lambda, \quad (4)$$

где k – безразмерный показатель поглощения,

λ – длина волны (220 – 280), нм.

Коэффициенты поглощения k природной воды поверхностных источников водоснабжения колеблются в пределах от 0,2 до 0,6; коэффициенты поглощения питьевой воды, полученной из подземных источников водоснабжения, имеют значения 0,05 – 0,2, из поверхностных – 0,15 – 0,3 [5].

Для внутренней полости УФ-лампы интенсивность облучения воды I в зависимости от расстояния l до ее поверхности в пределах 60 мм изображена на рисунке 2 для различных коэффициентов поглощения с начальной степенью $I_0 = 5$ мВт/см².

Вследствие турбулентности струи перемешиваются, следовательно, необходимо отследить весь путь движения элементарной i -й струи, разделив его на элементарные отрезки по времени t_j , с получением элементарных доз $D_i(t)$, определяемых по формуле (1) с учетом (3) и (4). Таким образом, доза облучения элементарной струи воды за период времени T будет определяться формулой, мДж/см²:

$$D_i = \sum_{t_j=0}^T D_j(t_j) = \sum_{t_j=0}^T \left(I_0 \cdot t_j \cdot e^{-\frac{4\pi k \cdot l_j}{\lambda}} \right). \quad (5)$$

Подвижной состав железных дорог

Выбор дозы УФ-облучения определяют характером и качеством воды, поступающей для обеззараживания: не менее $16 \text{ мДж}/\text{см}^2$ для воды из подземных источников I класса и питьевых вод; не менее $25 \text{ мДж}/\text{см}^2$ для воды из подземных источников II, III класса и поверхностных источников; не менее $30 \text{ мДж}/\text{см}^2$ для бытовых и городских сточных вод; не менее $40 \text{ мДж}/\text{см}^2$ для любого типа вод при неблагоприятной эпидемической ситуации [5].

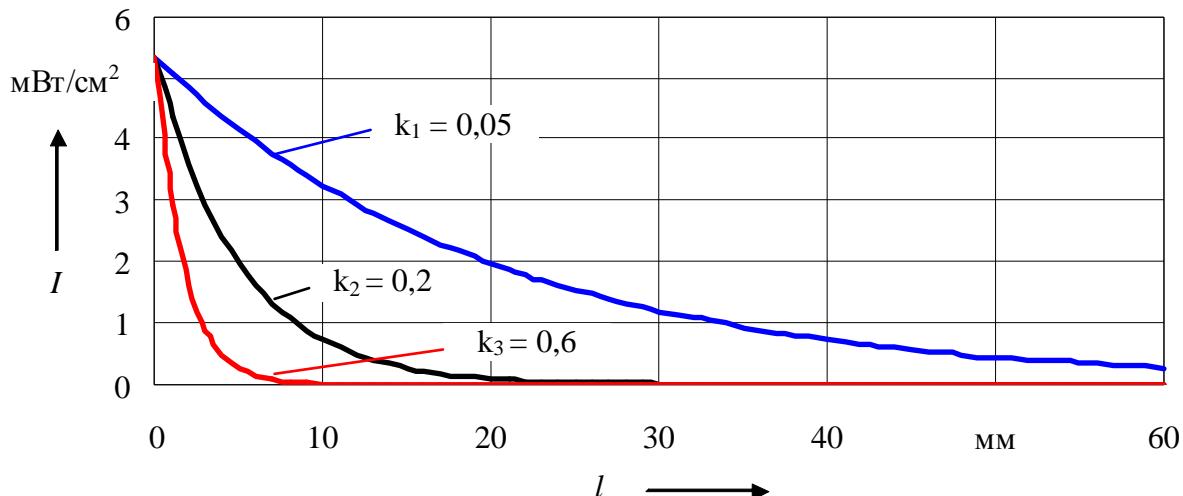


Рисунок 2 – Интенсивность облучения воды в зависимости от расстояния до поверхности УФ-лампы

Эффективность работы УФ-установок подтверждается результатами бактериологического анализа проб воды после облучения, однако необходимо оценивать ее на этапе проектирования и иметь количественные критерии оценки для сравнения различных вариантов.

Предлагаемая методика определения эффективности УФ-стерилизаторов основана на элементах статистики. Доза облучения, как физическая величина, подверженная влиянию значительного числа независимых факторов, на что указывалось выше, способных вносить положительные и отрицательные отклонения, может быть с определенной степенью точности описана в соответствии с одним из статистических законов распределения. В качестве критерия эффективности УФ-стерилизатора можно использовать следующие количественные показатели:

среднеквадратическое отклонение (СКО) дозы облучения элементарных струй $\sigma(D_i)$: чем меньше СКО, тем эффективнее устройство;

моду (модальное значение), как наивероятнейшую величину, облучения $Mo(D_i)$: чем выше модальное значение, тем эффективнее устройство.

Плотность распределения дозы облучения элементарных струй воды $P(D_i)$, составляющих поток и описываемых нормальным (Гауссовым) законом распределения, для двух УФ-стерилизаторов показана на рисунке 3. Величина математического ожидания $M(D_i)$ в данном случае равна модальной. Очевидно, что стерилизатор с дозой облучения D_2 эффективнее.

При определении дозы облучения возникает сложность расчета траекторий движения элементарных струй, выбора и учета их количества, точности расчета, выбора шага итерации и другого классическими способами.

Решение проблемы автору работы видится в применении уже давно распространенного приложения COSMOS FloWorks автоматизированного комплекса SolidWorks [8]. Данная разработка базируется на последних достижениях вычислительной газо- и гидродинамики, которая позволяет рассчитать параметры широкого круга различных течений несжимаемых и сжимаемых сред: двумерные и трехмерные, ламинарные, турбулентные и переходные, стационарные и нестационарные, в том числе двухфазные течения с учетом шероховатости стенок, с теплообменом между текучей средой и твердым телом. В основе математических моделей COSMOS FloWorks лежат уравнения Навье – Стокса, описывающие в нестационарной

Подвижной состав железных дорог

постановке законы сохранения массы, импульса и энергии этой среды. Этими уравнениями моделируются турбулентные, ламинарные и переходные течения.

В статье [9] рассмотрен метод моделирования процессов протекания жидкости в УФ-стерилизаторах для установившегося режима при помощи приложения Flow Works программы SolidWorks, позволяющий рассчитать динамические характеристики потока воды (давление, скорость, температуру и др.) в модернизированной системе водоснабжения пассажирского вагона, оснащенной УФ-стерилизатором.

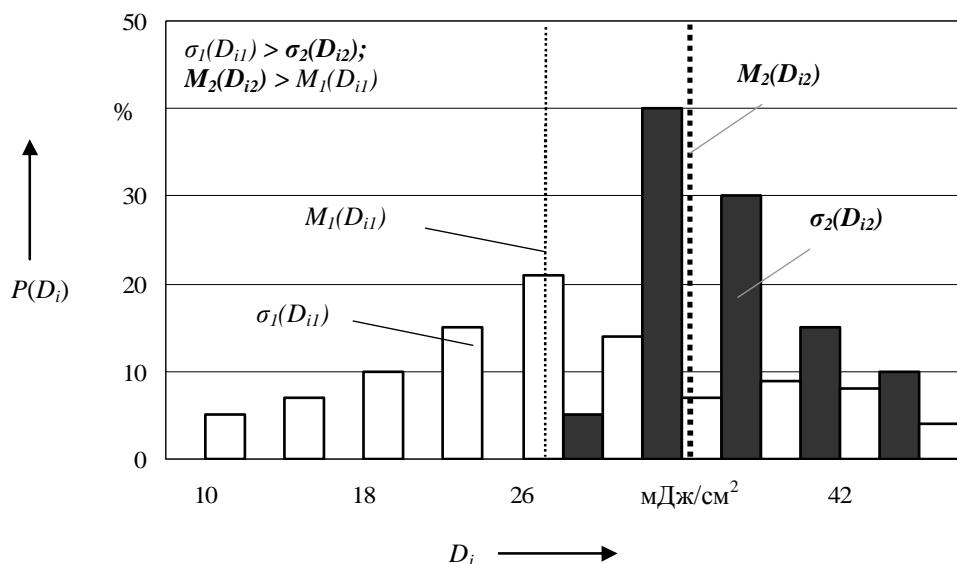


Рисунок 3 – Плотность распределения облучения элементарных потоков воды

На рисунках 4 – 6 приведены результаты расчета траекторий (x-, y-, z-координаты) 100 элементарных потоков в типовом стерилизаторе с центральными патрубками (а) и модернизированном (б) – с концентрическими соответственно. Последний, разработанный в Омском государственном университете путей сообщения, интегрирован в модернизированную систему водоснабжения пассажирского вагона и подробно описан в работе [1], а также защищен патентом на полезную модель [10]. Конструкция модернизированного УФ-стерилизатора устроена таким образом, что каждая проходящая единица объема воды получает одинаковую дозу УФ-облучения, а следовательно, является более энергоемкой и эффективной, что соответствует требованиям указаний [5] по применению в конструкции установок специальных «выравнивающих» устройств.

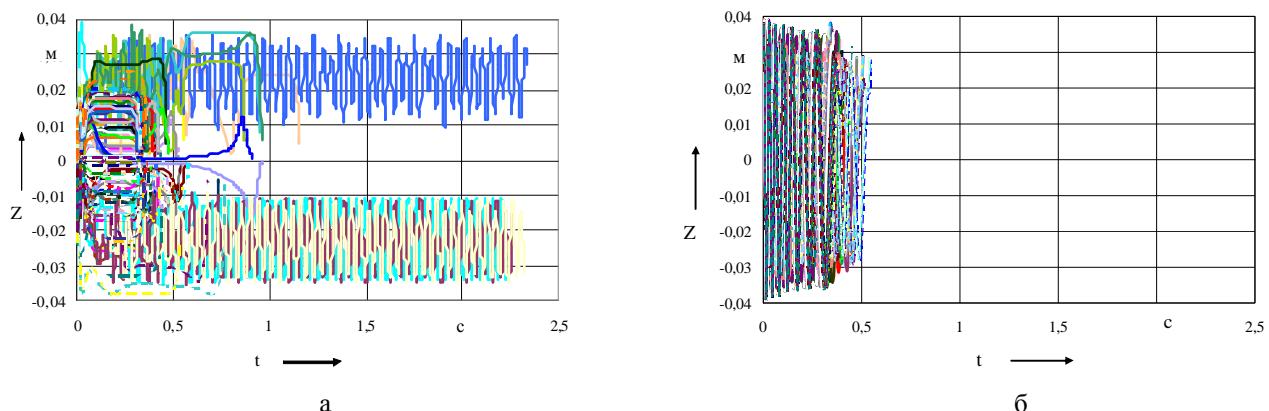


Рисунок 4 – z-координаты продольного перемещения 100 элементарных потоков в типовом и модернизированном стерилизаторах

Подвижной состав железных дорог

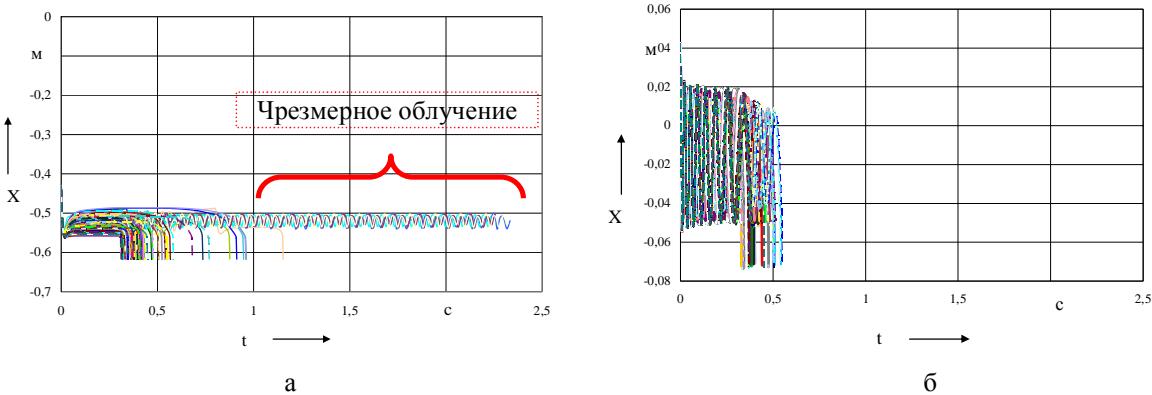


Рисунок 5 – x-координаты поперечного перемещения 100 элементарных потоков в типовом и модернизированном стерилизаторах

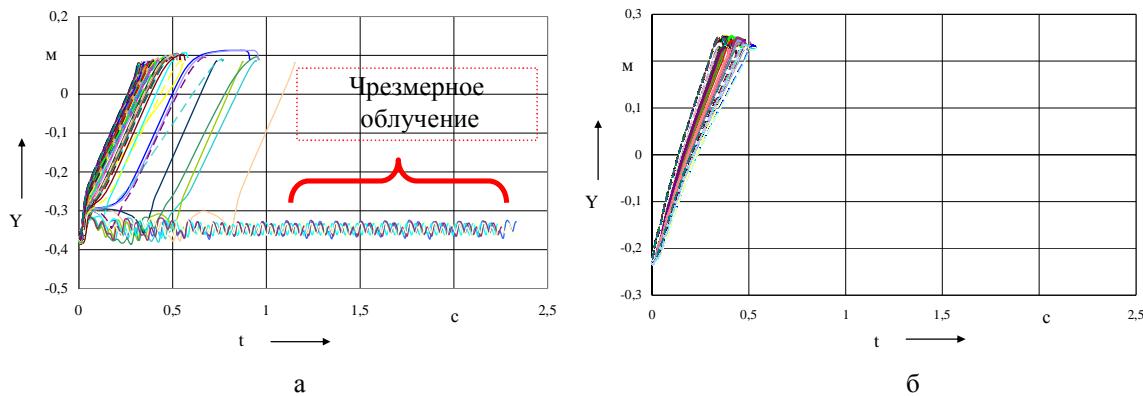


Рисунок 6 – у-координаты поперечного перемещения 100 элементарных потоков в типовом и модернизированном стерилизаторах

Зная координаты точек элементарного i -го потока $(x_j; y_j; z_j)$, где координаты z_j являются продольной составляющей перемещения, x_j и y_j – поперечной, в момент времени t_j , которые сохраняются в файле с расширением «xls» в виде таблицы, можно рассчитать расстояние l_j до поверхности УФ-лампы (рисунок 7) известного диаметра d с геометрическим центром оси $(x_0; y_0)$ при параллельном расположении оси z -координат и оси стерилизатора:

$$l_j = \sqrt{(x_j - x_0)^2 + (y_j - y_0)^2} - d , \quad (6)$$

а затем рассчитать интенсивность и дозу облучения соответственно по формуле:

$$D_i = \sum_{t_j=0}^T \left(I_0 \cdot t_j \cdot e^{-\frac{4\pi\kappa(\sqrt{(x_j-x_0)^2 + (y_j-y_0)^2} - d)}{\lambda}} \right). \quad (7)$$

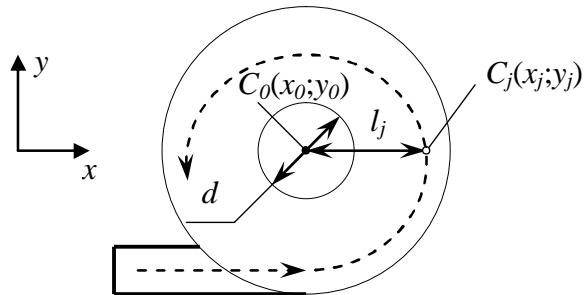


Рисунок 7 – Схема определения расстояния до поверхности УФ-лампы при поперечном сечении

Подвижной состав железных дорог

На рисунках 8 и 9 приведены графики плотности распределения дозы элементарных струй для типового УФ-стерилизатора и предлагаемого с концентрично установленными патрубками.

Сравнительный анализ результатов расчета эффективности УФ-стерилизаторов позволяет сделать следующие выводы:

1) модальная величина облучения струй у стерилизатора с концентрично установленными патрубками на 33,1 % выше величины типового – 29 мДж/см² против 21;

2) среднеквадратичное отклонение (СКО) облучения элементарных струй у типового стерилизатора в 3,7 раза превосходит величину СКО стерилизатора с концентрично установленными патрубками – 56 мДж/см² против 15;

3) нижняя граница зоны А облучения потоков на рисунке 8 у типового стерилизатора значительно ниже – 1,47 мДж/см² против 20 и не обеспечивает требуемой дозы облучения не менее 16 мДж/см²;

4) в типовом стерилизаторе присутствуют «переоблученные» струи (зона В), получившие намного большую дозу, чем остальные, что является неэкономичным фактором;

5) кроме того, в типовом стерилизаторе присутствуют струи с чрезмерным облучением (зона С), физически многократно проходящие вдоль УФ-лампы и снижающие полезный объем внутреннего пространства, выталкивая или сокращая путь остальных.

Последнее замечание требует особого внимания при высоком напоре воды, например, как в вихревых трубах, в модернизированном стерилизаторе с концентрично установленными патрубками наблюдается обратное течение вдоль УФ-лампы за счет значительного уменьшения радиального перепада давления. Это явление также приводит к сокращению полезного объема УФ-стерилизатора и «недооблучению» внешних слоев воды, что визуально наблюдалось автором статьи при расчете траекторий потоков для сравнительно невысоких скоростей и требует выполнения предварительной аналитической проверки при известном диапазоне рабочего напора воды.

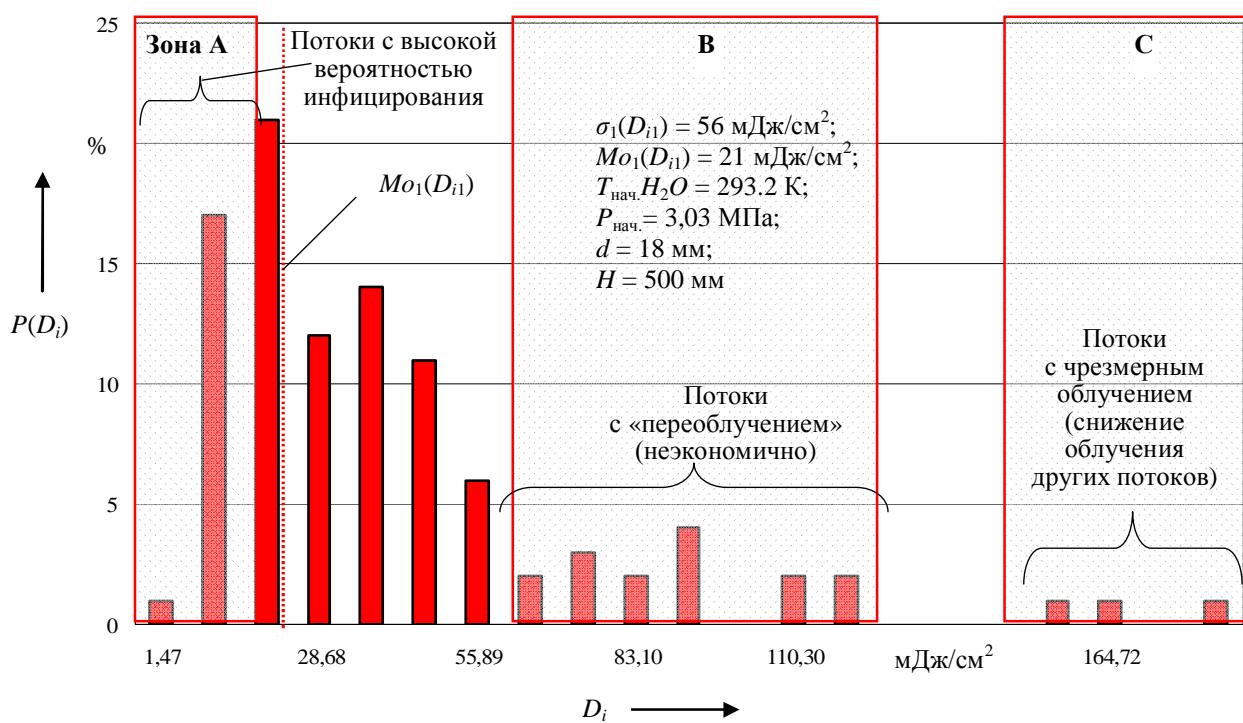


Рисунок 8 – Плотность распределения дозы элементарных потоков в типовом УФ-стерилизаторе

Подвижной состав железных дорог

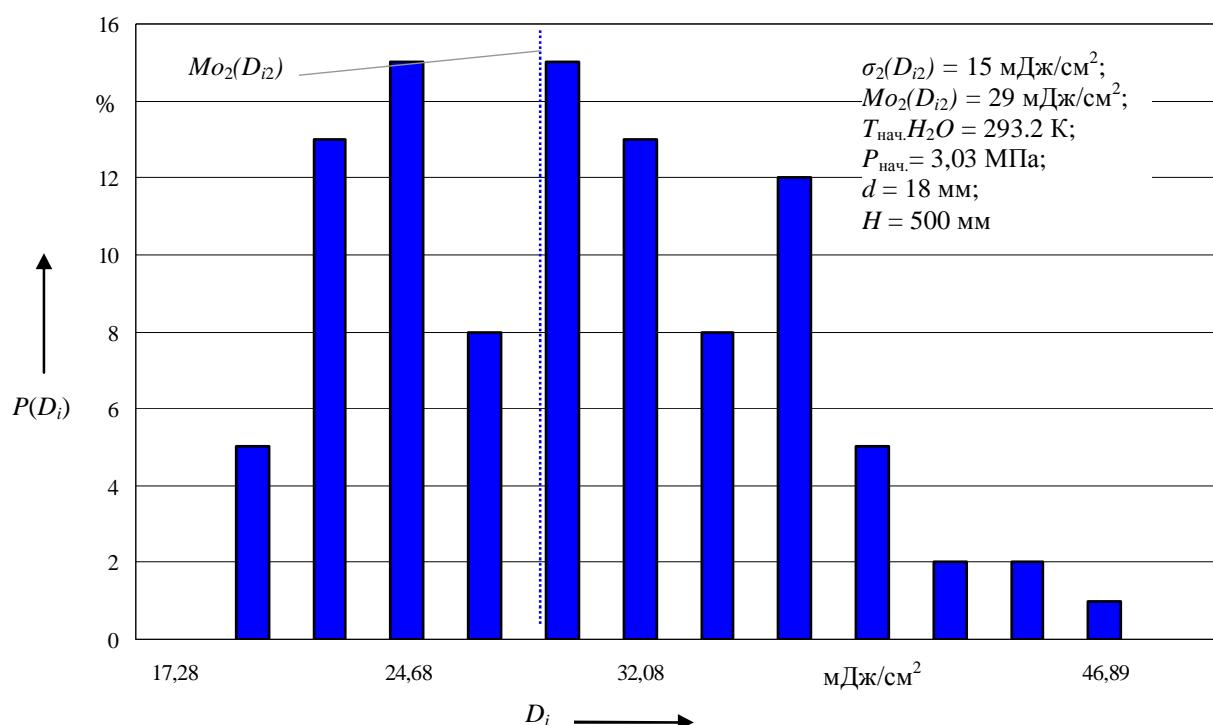


Рисунок 9 – Плотность распределения дозы элементарных потоков в УФ-стерилизаторе с концентрическо установленными патрубками

Предлагаемая методика аналитической оценки эффективности УФ-стерилизаторов пригодна для устройств, используемых не только на железнодорожном транспорте, но и в других отраслях, где применяются проточные стерилизаторы, а также может быть адаптирована для конструкций с непогруженными источниками УФ-излучения. Универсальность методики является ее несомненным преимуществом. При сравнительных расчетах малые значения модального значения укажут на необходимость увеличения мощности УФ-лампы, СКО дозы облучения – совершенствования конструкции стерилизатора.

Список литературы

1. Матяш, Ю. И. Устройство для обеззараживания воды в пассажирских поездах дальнего следования [Текст] / Ю. И. Матяш, О. С. Томилова // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – № 4. – С. 23 – 27.
2. Матяш, Ю. И. Применение ультрафиолетовых стерилизаторов для обеззараживания воды в пассажирских поездах дальнего следования [Текст] / Ю. И. Матяш, О. С. Томилова // Инновации для транспорта / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2010. – Ч. 2. – С. 176 – 180.
3. Санитарно-эпидемиологические правила СП 2.5.1198-03. Санитарные правила по организации пассажирских перевозок на железнодорожном транспорте [Текст]. Федеральный центр Госсанэпиднадзора Минздрава России. – М., – 2003. – С. 63.
- 4 Матяш, Ю. И. Устройства по предотвращению появления вторичного загрязнения питьевой воды в пассажирских вагонах дальнего следования [Текст] / Ю. И. Матяш, О. С. Томилова // Инновационные проекты и новые технологии в образовании, промышленности и на транспорте / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2010. – С. 115 – 122.
5. Методические указания 2.1.4.719-98. Санитарный надзор за применением ультрафиолетового излучения в технологии подготовки питьевой воды [Текст]. Федеральный центр Госсанэпиднадзора Минздрава России. – М., 1998. – С. 7.
6. Никифоров, М. М. Целевые показатели энергосбережения и повышения энергетиче-

ской эффективности системы тягового электроснабжения и электропотребления на нетяговые нужды / М. М. Никифоров // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2010. – № 3. – С. 110 – 116.

7. Черемисин, В. Т. Основные направления реализации федерального закона № 261-ФЗ от 23.11.09 «Об энергосбережении...» в холдинге «Российские железные дороги» [Текст] / В. Т. Черемисин, М. М. Никифоров // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2010. – № 2. – С. 119 – 123.

8. Маслов, Г. П. Аэродинамические показатели токоприемников скоростного электрического подвижного состава [Текст] / Г. П. Маслов, М. А. Дятлова // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2010. – № 1. – С. 20 – 25.

9. Матяш, Ю. И. Моделирование процессов протекания жидкости в ультрафиолетовом стерилизаторе модернизированной системы водоснабжения пассажирского вагона [Текст] / Ю. И. Матяш, О. С. Томилова, В. В. Томилов // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2011. – № 2. – С. 16 – 21.

10. Пат. РФ на полезную модель № 88327, МКИ В 61 D 35/00. Устройство для обработки воды ультрафиолетовым излучением [Текст] / Ю. И. Матяш, О. С. Мотовилова. – № 2009127016/22; Заявлено 14.07.2009; Опубл. 10.11.2009 // Открытия. Изобретения. – 2009. – № 31. – 4 с.

УДК 625.143.3:624.024

В. В. Шилер

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ РЕЛЬСОВ И ГЕОМЕТРИИ ИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ КАТАНИЯ

Представлен анализ состояния геометрических параметров рельсовой колеи и внутренних напряжений металла рельсов. Предложены новые методы их измерения с повышенной точностью. Приведены результаты измерения напряженного состояния рельсов после рельсошлифования. Выявлены серьезные недостатки в технологии шлифовки рельсов и контроля ее результатов.

Как известно, при равномерном износе рельсы эксплуатируются в течение достаточно длительного времени, неравномерный износ приводит к быстрому выходу рельсов из строя. Согласно статистическим данным поездная нагрузка (по пропуску тоннажа), выдерживаемая рельсом в течение срока его службы до снятия с пути, варьируется от 100 млн до 2,5 млрд т брутто. Причинами такого широкого диапазона (25-кратный) ресурса рельсов, как правило, является неудовлетворительная динамика системы «подвижной состав – пути». Анализ показывает, что максимальные величины динамических добавок давления колеса на рельс, возникающие при движении подвижного состава, на 90 – 99 % создаются за счет волнобразного износа рельсов; за счет групповых неровностей на колесе – 1 – 4 %, от изолированных неровностей на колесе – 0,2 ÷ 1,5 % [2]. Волнобразный износ на отдельных участках поражает до 50 % рельсов от общей протяженности рельсовых путей. По своей форме волнобразный износ разделяют на два характерных вида: короткие волны – от 0,03 до 0,08 м, отличающиеся наличием светлых горбов в чередовании с темными впадинами (рифли), и длинные неровности с волнами длиной от 0,2 до 2 м [1].

Целью представленной работы является определение уровня напряженного состояния рельса и поиск путей его снижения.

В ОмГУПСе разработан и изготовлен путеизмерительный комплекс, предназначенный для одновременной и с повышенной точностью регистрации восьми геометрических параметров рельсовой колеи [3]. Результаты измерений, полученные с помощью путеизмерительного комплекса, преобразованы в абсолютные значения координат поверхностей катания

Подвижной состав железных дорог

рельсовых нитей. На рисунке 1 в аксонометрической проекции представлены траектории рельсовых нитей участка железнодорожного пути длиной 24 м со всеми видами геометрических неровностей.

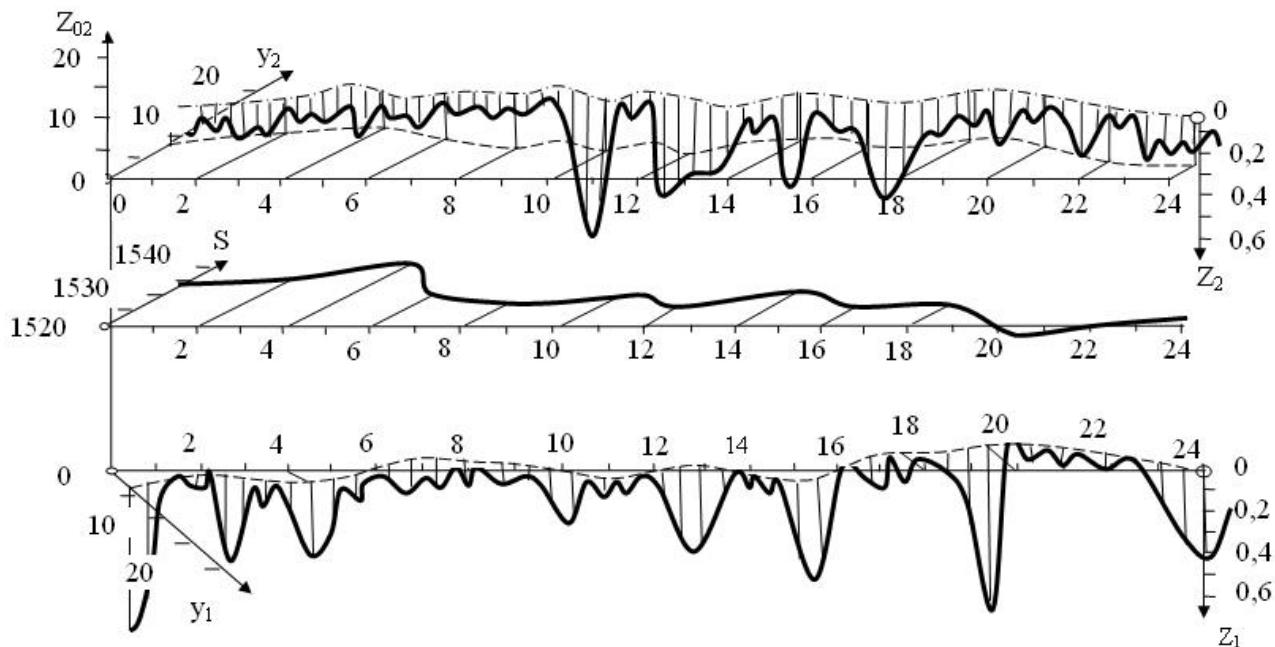


Рисунок 1 – Траектории рельсовых нитей и колеи в трехмерном представлении

По результатам измерений рельсовой колеи выполнен статистический анализ и определены законы распределения амплитуды всех видов геометрических неровностей. За критерий согласия принято условие Пирсона $p(x^2) \geq 0,1 \div 0,05$. Установлено, что амплитуды волнообразного износа имеют логнормальный закон распределения, который формируется при действии большого числа взаимно независимых факторов [1, 4]. Для этого вида распределения случайный прирост амплитуды волны пропорционален уже достигнутому к этому моменту значению (т. е. интенсивность образования неровностей нарастает с увеличением их амплитуд). Все остальные виды неровностей имеют нормальный закон распределения амплитуды.

В частотной области спектры волнообразного износа получены через преобразование Фурье корреляционной функции. По рельсовым нитям спектры волнообразного износа отличаются как по количеству пиков, так и по амплитуде. Например, по результатам измерений конкретного участка спектр волнообразного износа для правой рельсовой нити имеет пять пиков на длине волн 2; 5; 1; 0,3; 0,175; 0,125 м, для левой нити – три пика: 4; 1,25; 0,3 м.

Амплитуды пиков на спектре для правого рельса в два раза превышают уровень амплитуд пиков спектра на левом, кроме того, оба спектра относительно друг друга сдвинуты по частотной оси на 0,5 Гц. Такое распределение износа по рельсовым нитям обусловлено тем, что правая нить находится по уровню ниже левой и поэтому воспринимает более значительные по величине вертикальные и направляющие силы от колесных пар подвижного состава.

Статистический спектральный анализ имеет ряд недостатков. Так, в спектральном методе все формы траекторий усредняются за счет преобразования в гармонический ряд, который в спектральной плотности показывает распределение дисперсии амплитуд по частотам. Поэтому по спектральной плотности невозможно идентифицировать вид и протяженность групповых неровностей с различной длиной волн, установить форму траектории одиночной неровности, выполнить привязку к конкретному отрезку пути. В результате при использовании спектральной плотности теряется большая часть информации о состоянии поверхностей катания головки рельса, что существенно затрудняет установление причин образования любого вида износа поверхностей головки рельса.

Поэтому в дальнейших исследованиях по результатам регистрации неровностей рельсо-

Подвижной состав железных дорог

вой колеи наряду со спектральным анализом применяется анализ параметров и траектории каждой одиночной неровности. Анализ неровностей производился по следующим параметрам: длине волн и амплитуде неровностей, форме их траекторий, сочетанию неровностей с различной длиной волн. Для объективной оценки параметров одиночных или групповых геометрических неровностей предложен показатель, который в числовой форме характеризует неровность как коэффициент динамического фактора в системе «колесо – рельс». В качестве порогового критерия для оценки допустимых значений параметров неровностей волнобразного износа принято равенство $\chi_{в.н} = 1$, а коэффициент пропорциональности (ξ) определен для значений параметров неровности, которые для допустимых скоростей движения подвижного состава считаются предельными ($a = 1,5$ мм при $l = 1,0$ м). Коэффициент динамического фактора ($\chi_{в.н}$) является безразмерной относительной величиной:

$$\chi_{в.н} = 6,66 \frac{a}{l^2}$$

где a – амплитуда неровности волнобразного износа, мм;

l – длина волны неровности волнобразного износа, м.

Приведенное выражение может быть использовано при условии безударного взаимодействия колеса и рельса, а его значения интерпретируются следующим образом: если $\chi_{в.н} > 1$, то силовое динамическое воздействие колеса на рельс, вызванное исследуемой неровностью, превышает допустимую величину. В противном случае ($\chi_{в.н} < 1$) – динамическое воздействие от неровности находится в допустимых пределах.

В процессе эксплуатации существует несколько способов управления износом рельсов: шлифовка рельсов, лубрикация колес подвижного состава и рельсов, выбор скорости движения и настройка рессорного подвешивания подвижного состава [1]. Для поддержания требуемых очертаний поперечного профиля и продольной траектории поверхности катания головки рельсов применяют шлифование.

Цели шлифования следующие:

поддержание баланса между всеми механизмами изнашивания рельсов для предотвращения преждевременной их замены из-за накопления контактной усталости в поверхностном и подповерхностном слоях, улучшение вписывания экипажей и обеспечение их динамической устойчивости;

уменьшение уровня амплитуды неровностей на поверхности катания рельсов с целью недопущения роста динамических нагрузок и вибраций в пути.

Для шлифования рельсов на сети российских железных дорог и за рубежом применяются самоходные поезда с использованием вращающихся шлифовальных кругов, торцевые плоскости которых во время шлифовки прижимают к рельсу. Одновременно торцевые плоскости шлифовальных кругов, которые прижимают к поверхности катания рельса, задают положение щлифовальных кругов относительно рельса во время шлифовки. Диаметр шлифовального круга равен 0,25 м, и неровности с такой длиной волны отшлифовываются полностью при условии выполнения необходимого количества проходов рельсошлифовального поезда. Неровности с большей длиной волны не отшлифовываются, поскольку шлифовальный круг перемещается по их траектории.

Известно, что оставленные после шлифования волнобразные неровности величиной более 0,25 мм довольно быстро вновь начинают увеличиваться. Как показывает практика применения рельсошлифовальных поездов РШП-48 на магистральных участках «РЖД», шлифовка рельсов не дает ожидаемой эффективности в повышении ресурсов рельсов. Так, например, на Западно-Сибирской железной дороге ежегодно для своевременного удаления дефектов производится шлифование более 3200 км рельсов. Несмотря на выполняемые объемы шлифования количество рельсов с дефектами поверхности катания снизилось только на 10 %, а выход остродефектных рельсов по контактно-усталостным дефектам наоборот увеличился на 20 %. Например, опыт применения рельсошлифовальных поездов на зарубежных дорогах, в том числе в США, Германии, Канаде, Австралии, показывает, что периодической профильной шлифовкой рельсов можно повысить срок их службы в 1,5 – 2,0 раза.

Подвижной состав железных дорог

Автор с целью выявления причин неэффективного применения технологии рельсошлифовки в условиях российских железных дорог с использованием путеизмерительного комплекса «Изген-3» выполнил измерения рельсовой колеи перед началом шлифовки и после ее завершения. На графике рисунка 2 показаны траектории продольных профилей поверхности катания головки рельса до шлифовки (кривая 1) и после нее в объеме четырех (кривая 2) и шести (кривая 3) проходов. Разность по высоте между траекториями поверхностей рельса (линии 1, 2 и 3) соответствует величине толщины снятого в процессе шлифовки рельсового металла. Анализ траекторий поверхности катания рельса до шлифовки показывает, что в зоне пути на отрезке пути между второй и третьей метровыми отметками имеется пробуксовина (дефект №14). На отрезке четвертой – шестой отметок присутствует длинная неровность с длиной волны, равной 2 м, и амплитудой 0,4 мм. В зоне стыковой неровности между десятой и одиннадцатой метровыми отметками сформировались короткие групповые неровности с длиной волн в интервале 0,06 – 0,5 м.

При толщине отшлифованного металла толщиной в один миллиметр все параметры длинных неровностей на поверхности рельса остались без изменения. После шлифовки остается незначительная часть коротких неровностей, у которых динамический фактор $\chi_{в.н}$ увеличился по сравнению с исходным значением с 0,66 до 0,73. Эти оставшиеся короткие неровности и являются источником более интенсивного формирования новых коротких групповых неровностей.

Пробуксовина (см. рисунок 2, на отрезке 2 – 3 м дефект №14) до начала шлифовки имела коэффициент динамического фактора, равный 166000, а после шлифовки он уменьшился до 16. Несмотря на значительное снижение показателя динамического фактора его значение остается высоким и является мощным источником возмущения колебаний в системе «колесо – рельс», которые в процессе эксплуатации приведут к интенсивному образованию новых групповых неровностей в ее окрестности.

Анализ уровня концентраций напряжений (ВПТ) в поверхностном слое металла головки рельса был произведен в зоне пробуксовины (дефект № 14) с использованием прибора ИКН-3М-12. Усредненные результаты измерений концентрации напряженности приведены на графике рисунка 3. Так, по результатам измерений, выполненных до шлифовки и после нее, зафиксировано двукратное увеличение амплитуды пиков внутренних напряжений (Нр) как в положительной, так и в отрицательной зонах. Таким образом, шлифование рельсов не устраивает общего уровня концентраторов напряжений в металле рельса, а наоборот приводит к дополнительному его увеличению. Эти результаты подтверждают данные статистики, представленные выше, об изъятии рельсов из эксплуатации по контактно-усталостным дефектам после их шлифовки.

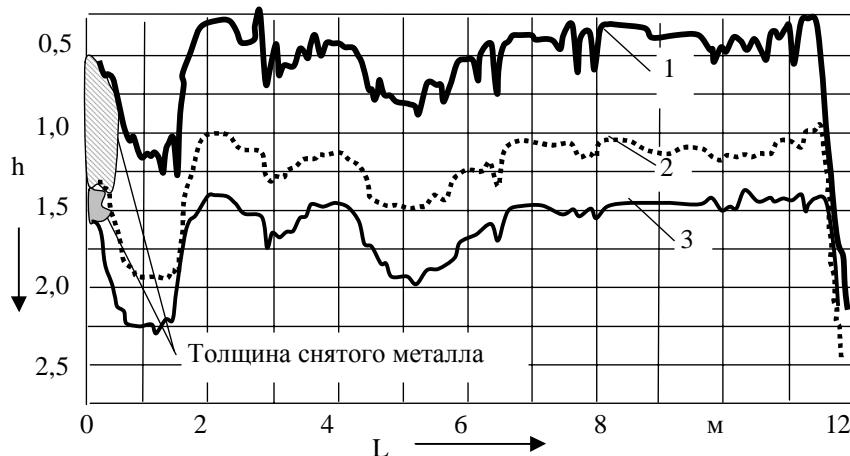


Рисунок 2 – Волнообразный износ участка:
1 – до шлифовки; 2 – после четырех шлифовок, 3 – после шести шлифовок

Подвижной состав железных дорог

Выполнены измерения внутренних напряжений металла рельса с использованием тензометрической аппаратуры. Записи производились при прохождении поезда по контролируемому участку пути со скоростями движения 20, 40, 60, 70 км/ч и опытного поезда со скоростью 2 км/ч (статическое нагружение).

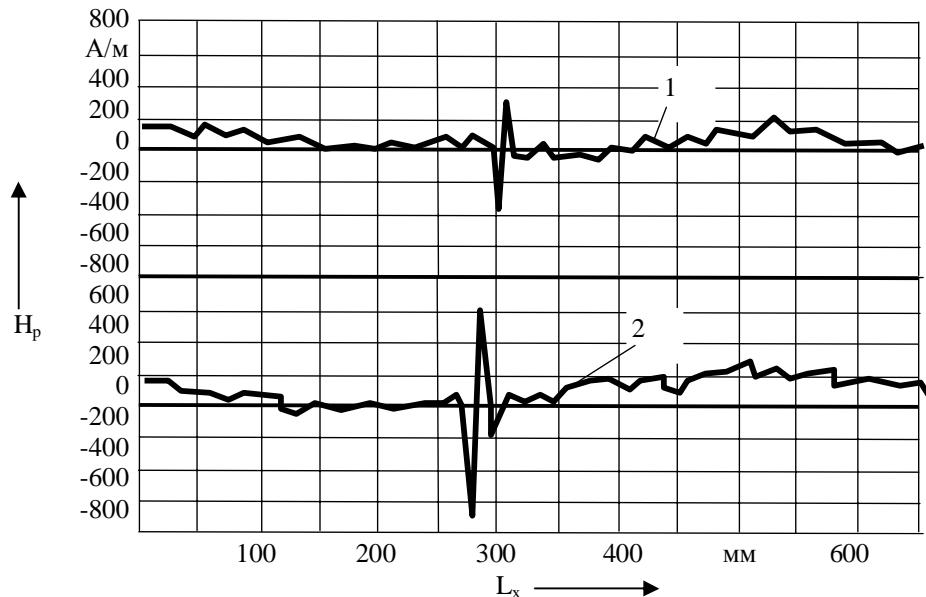


Рисунок 3 – Распределение напряженности магнитного поля концентраторов напряжений в металле рельса по его длине в окрестности пробуксовины до шлифовки рельса (1) и после нее (2)

Результаты измерения напряжения в подошве рельса в виде интервала зарегистрированных значений приведены на рисунке 4. При допускаемом напряжении в металле рельса, равном 350 МПа [1], рельс имеет трехкратный запас по внутренним напряжениям.

На основе изложенного можно сделать следующие выводы.

1. Рельсошлифовальный поезд РШП-48 осуществляет эффективное шлифование волнообразного износа рельсов с длиной волны меньше 0,25 м.

2. Процесс шлифовки можно считать эффективным, если неровности на поверхности катания рельса полностью сошлифованы.

3. Максимумы касательных напряжений в головке рельса τ_{zx} и τ_{zy} находятся на глубине 3 – 5 мм от поверхности выкружки, уменьшаясь наполовину на глубине 8 мм. Поэтому шлифовка поверхности головки рельса металла толщиной 1 мм не полностью устраниет ВПТ.

4. Внутренние напряжения в металле рельсов составляют 30 % от допустимых напряжений, что является существенным резервом в повышении скоростей движения подвижного состава.

Список литературы

1. Обобщение передового опыта тяжеловесного движения: вопросы взаимодействия колеса и рельса: Пер. с англ. [Текст] / У. Дж. Харрис, С. М. Захаров и др. М.: Интекст, 2002. – 408 с.

2. Вериго, М. Ф. Взаимодействие пути и подвижного состава [Текст] / М. Ф. Вериго, А. Я. Коган – М.: Транспорт, 1986. – 559 с.
3. Шилер, В. В. Определение отступлений рельсовых нитей в плане координатным методом [Текст] / В. В. Шилер // Взаимодействие подвижного состава и пути и динамика локомотивов дорог Сибири, Дальнего Востока и Крайнего Севера / Труды / Омский ин-т инж. ж.-д. трансп. – Омск, 1983. – С. 70 – 74.
4. Балух, Х. Диагностика верхнего строения пути. – М.: Транспорт, 1981. – 414 с.

УДК 624.332:621.316.97

В. А. Кандаев, К. В. Авдеева, Н. К. Слептерева

ОЦЕНКА КОРРОЗИОННОЙ ОПАСНОСТИ АЛЮМИНИЕВЫХ КАБЕЛЕЙ В ПОЛИМЕРНОМ ИЗОЛИРУЮЩЕМ ПОКРОВЕ В УСЛОВИЯХ РАБОТЫ ЭЛЕКТРИФИЦИРОВАННОГО ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА

Определено влияние электротяги постоянного и переменного тока на коррозионное состояние алюминиевых кабелей в полимерном изолирующем покрове.

В настоящее время кабели с медными жилами заменяются на волоконно-оптические. На сети железных дорог к 2006 г. была построена волоконно-оптическая магистраль общей длиной более 50 тыс. км, соединяющая 71 регион России. Тем не менее продолжается производство и эксплуатация кабелей связи с металлическими жилами. Поэтому остаются актуальными вопросы защиты от коррозии подземных металлических сооружений связи и исследования коррозионных процессов. Это объясняется постоянно изменяющейся коррозионной ситуацией, вызванной появлением новых источников блуждающих токов и подземных металлических коммуникаций, а также тем, что в эксплуатации находятся кабели, отработавшие свой амортизационный срок, при этом сохранившие в хорошем состоянии параметры передачи [1].

Как известно, особенно высокой коррозионной опасности подвержены протяженные подземные сооружения в зонах блуждающих токов [2, 3]. Все кабели связи в стальных гофрированных и большая часть марок кабелей в алюминиевых оболочках имеют полимерные покровы (полиэтиленовые или поливинилхлоридные), защищающие металлические элементы кабеля от коррозии блуждающими токами, а также от почвенной коррозии благодаря сохранению высокого переходного сопротивления оболочки по отношению к земле. Для кабелей, прокладываемых в грунте, в качестве защитного покрова целесообразнее использовать полиэтилен, учитывая его большую влагостойкость и стойкость к действию кислот и щелочей. Однако при возможных повреждениях изолирующего покрова как в процессах укладки, монтажа, так и во время эксплуатации металлическая оболочка подвергается коррозионной опасности. На скорость процессов коррозии влияет как размер повреждения изолирующего покрова, так и агрессивность грунта, обусловленная его минералогическим составом, а также наличием источников блуждающих токов. Уменьшить коррозионный процесс можно применением электрохимических методов защиты при поддержании потенциала для алюминия от минус 0,85 до минус 1,38 В [4]. Поддерживать заданное значение защитного потенциала, особенно в условиях действия блуждающих токов, практически невозможно. В качестве примера на рисунке 1 приведен график изменения потенциала оболочки кабеля относительно земли.

Информационные технологии, автоматика, связь, телекоммуникации

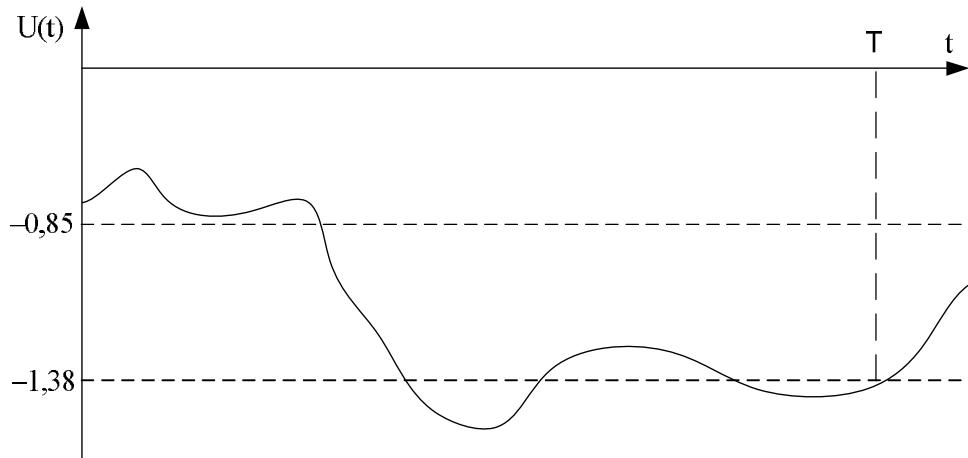


Рисунок 1 – Изменение потенциала оболочки кабеля относительно земли

Характер изменения потенциала оболочки кабеля соответствует непрерывному стационарному случайному процессу $\xi(t)$ при $t \in [0, T]$ с нормальным законом распределения [5]. Для такого процесса количество переходов уровня A ($-0,85$ В) за интервал времени T определяется выражением [6]:

$$N(A, T) = \frac{T}{2\pi} \sqrt{-R_0''} e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{A-m}{\sigma} \right)^2}, \quad (1)$$

где R_0 – функция корреляции, $-R_0'' = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \int_{-\infty}^{\infty} \omega^2 S(\omega) d\omega \geq 0$;

m – математическое ожидание;

σ – среднеквадратическое отклонение.

Анализируя формулу (1), можно отметить следующее. При увеличении значения σ среднее количество выбросов возрастает. Кроме того, количество выбросов зависит от заданного уровня: чем выше уровень, тем меньше среднее количество выбросов. На графике отмечены два допустимых уровня – верхний ($-0,85$) и нижний ($-1,38$), поэтому число переходов потенциалов за пределы диапазона между заданными уровнями зависит и от его ширины.

Изменение потенциала оболочки кабеля относительно земли, как случайный процесс, имеет нормальный закон распределения, поэтому время пребывания функции в защитном потенциальном диапазоне

$$t_3 = t(B) - t(A), \quad (2)$$

где $t(B)$ – время выбросов ниже уровня B , $B = -1,38$ В;

$t(A)$ – время выбросов над уровнем A , $A = -0,85$ В.

Длительности выбросов и нахождения случайного процесса $\xi(t)$ в пределах защитного потенциального диапазона зависят от вероятности пребывания случайной функции в этом диапазоне. Следовательно, длительность выбросов над уровнем A

$$t(A) = \frac{T}{N(A)} \int_A^\infty W(\xi) d\xi, \quad (3)$$

где $W(\xi)$ – плотность вероятности распределения случайной величины.

Применительно к нормальному процессу [4] длительность выбросов над уровнем A

$$t(A) = 1 - \Phi\left(\frac{A-m}{\sigma}\right), \quad (4)$$

где Φ – функция Лапласа с аргументом $\left(\frac{A-m}{\sigma}\right)$.

Аналогично определяется длительность выбросов ниже уровня B . Таким образом, время пребывания функции в защитном диапазоне

$$t_3 = \Phi\left(\frac{B-m}{\sigma}\right) - \Phi\left(\frac{A-m}{\sigma}\right). \quad (5)$$

Графики зависимости времени пребывания потенциала оболочки кабеля в защитном диапазоне относительно земли в зависимости от m и σ приведены на рисунке 2.

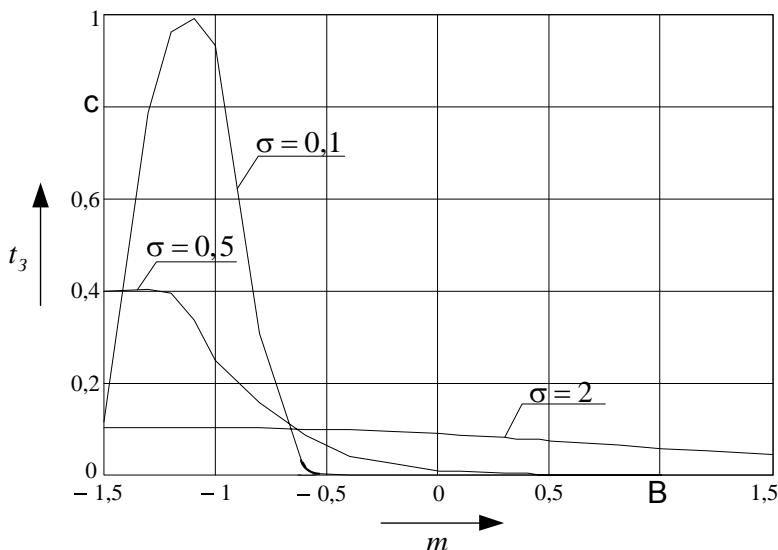


Рисунок 2 – Время нахождения потенциала на оболочке кабеля
в защитном диапазоне в зависимости от m и σ

Время пребывания потенциала «оболочка кабеля – земля» в защитном диапазоне от минус 1,38 до минус 0,85 В близко к полному времени $T=1$ при $\sigma \rightarrow 0$ и при m , находящемся в защитном диапазоне.

Рассмотрим распределение потенциалов оболочки относительно земли по длине кабеля типа МКСАБпШп 7×4×1,2 длиной 9,75 км для вариантов параллельного сближения шириной 25 м с электрифицированной железной дорогами постоянного и переменного тока. В силу разного характера их влияния на подземное сооружение эти варианты рассмотрены отдельно. Поскольку необходимым условием для поддержания защитного потенциала оболочки кабеля от коррозионной опасности является наличие заземления по концам и на протяжении всего участка [7], в расчетных схемах сопротивление заземления у тяговой подстанции принято равным 3 Ом, а промежуточные через 0,75 км друг от друга – по 10 Ом. Расчеты проведены при проводимости земли 0,02 См/м.

Оценим опасность коррозии кабеля при параллельном сближении с электрифицированной железной дорогой постоянного тока. Имеющиеся в составе выпрямленного рабочего напряжения контактной сети гармоники имеют малые значения, поэтому индуктивным влиянием в этом случае можно пренебречь, и опасность коррозии определяют только гальваническим влиянием.

Схема замещения участка кабельной линии, подверженной гальваническому влиянию приведена на рисунке 3, левый конец кабеля находится вблизи тяговой подстанции, а правый – вблизи нагрузки (электровоза).

Информационные технологии, автоматика, связь, телекоммуникации

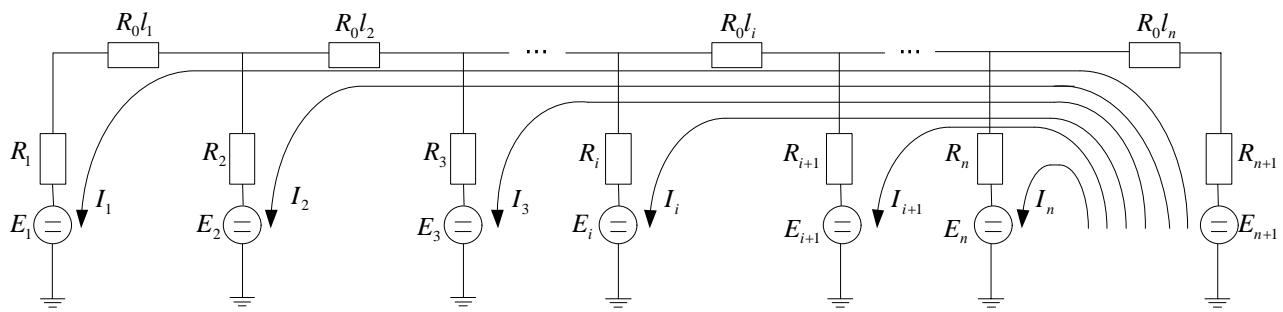


Рисунок 3 – Схема замещения участка кабельной линии, подверженной гальваническому влиянию

На рисунке 3 $R_0 = 0,34 \text{ Ом/км}$ – продольное сопротивление постоянному току оболочки кабеля на 1 км; $E_{n+1}, E_1, E_2, \dots, E_n$ – ЭДС, численно равные потенциалам заземлений, которые определены по методике [8]; $l_1 = l_2 = \dots = l_n = 0,75 \text{ км}$ – длина участков.

Для определения тока, протекающего через заземлители, составлена система уравнений на основании метода контурных токов:

$$\left\{ \begin{array}{l} I_1(R_1 + R_0l_1 + R_0l_2 + \dots + R_0l_i + \dots + R_0l_n + R_{n+1}) = E_1 - E_{n+1}; \\ I_2(R_2 + R_0l_2 + \dots + R_0l_i + \dots + R_0l_n + R_{n+1}) = E_2 - E_{n+1}; \\ \dots; \\ I_i(R_i + R_0l_i + \dots + R_0l_n + R_{n+1}) = E_i - E_{n+1}; \\ \dots; \\ I_n(R_n + R_0l_n + R_{n+1}) = E_n - E_{n+1}. \end{array} \right. \quad (6)$$

Ток, стекающий через заземлитель R_{n+1} ,

$$I_{n+1} = I_1 + I_2 + I_3 + \dots + I_n. \quad (7)$$

Потенциал на оболочке кабеля относительно земли определяется как произведение рассчитанного по системе уравнений тока, протекающего через заземлители, на соответствующее сопротивление заземления.

Результаты расчета токов, протекающих через заземлители, и потенциалов оболочки кабеля при удалении L от тяговой подстанции показаны на рисунке 4.

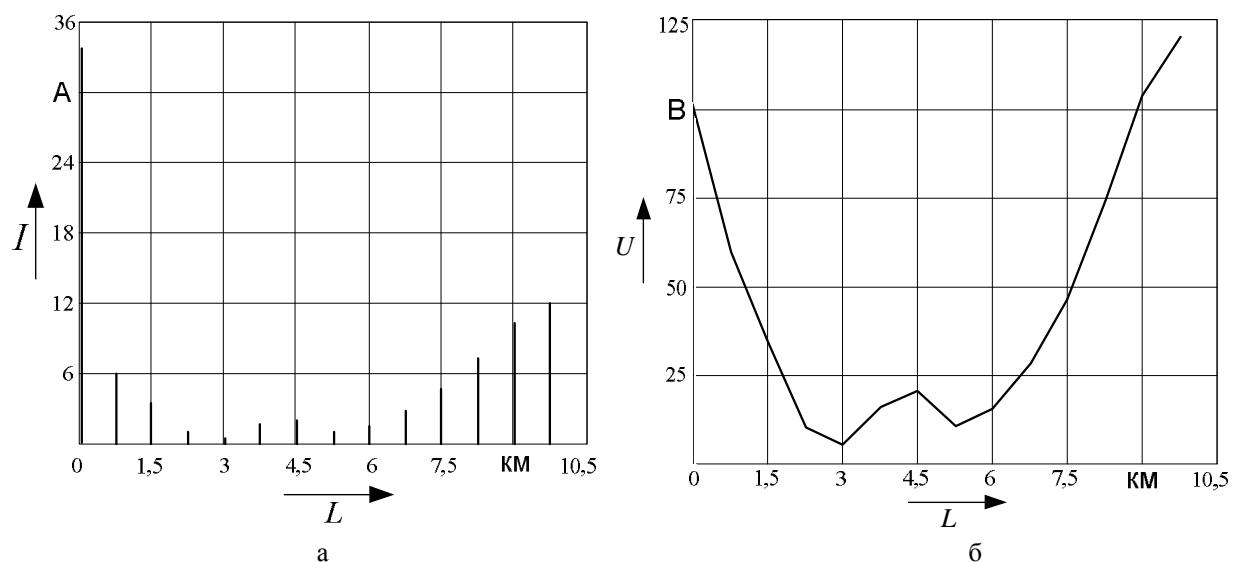


Рисунок 4 – Токи, протекающие через заземлители при гальваническом влиянии электротяги постоянного тока, (а) и распределение потенциалов по оболочке кабеля при электротяге постоянного тока (б)

Информационные технологии, автоматика, связь, телекоммуникации

Полученные расчеты распределения потенциалов по оболочке кабеля при параллельном сближении кабельной линии с электрифицированной железной дорогой постоянного тока показывают, что рассчитанные значения потенциалов значительно превышают защитный потенциальный диапазон.

Рассмотрим коррозионную опасность для кабеля связи при параллельном сближении с электрифицированной железной дорогой переменного тока. При гальваническом влиянии методика расчета аналогична варианту электротяги постоянного тока с заменой на схеме замещения и в системе уравнений сопротивлений R_0 полным продольным сопротивлением металлических покровов кабеля на 1 км Z [9]. Для учета индуктивного влияния, которое в этом случае весьма существенно, схема замещения оболочки кабеля приведена на рисунке 5.

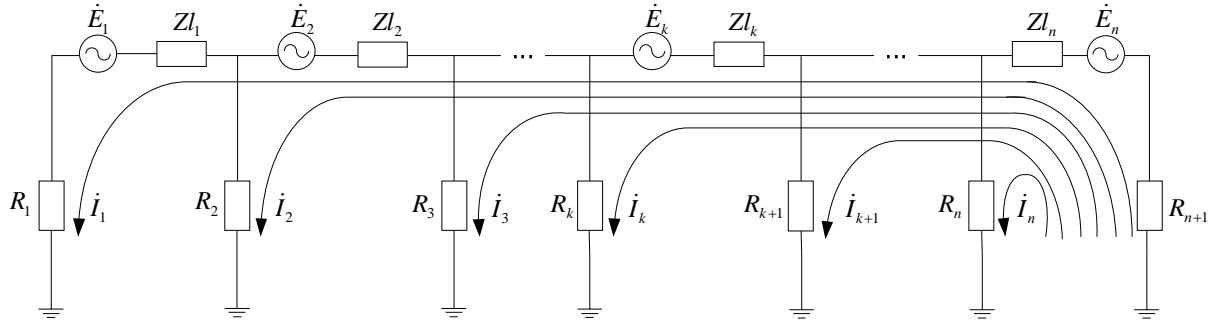


Рисунок 5 – Схема замещения участка кабельной линии, подверженной индуктивному влиянию

На схеме замещения (см. рисунок 5) $Z = 0,39 + i3,83$ Ом/км, $\dot{E}_1 = \dot{E}_2 = \dots = \dot{E}_n = 25$ В – продольная ЭДС, рассчитанная по методике [10], ток нагрузки принят равным 300 А.

Система уравнений для расчета тока, протекающего через заземлители при индуктивном влиянии, имеет вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{I}_1 \left(R_1 + R_{n+1} + Z \sum_{i=1}^n l_i \right) + \dot{I}_2 \left(R_{n+1} + Z \sum_{i=2}^n l_i \right) + \dots + \dot{I}_k \left(R_{n+1} + Z \sum_{i=k}^n l_i \right) + \dots + \dot{I}_n \left(R_{n+1} + Zl_n \right) = \sum_{i=1}^n \dot{E}_i; \\ \dot{I}_1 \left(R_{n+1} + Z \sum_{i=2}^n l_i \right) + \dot{I}_2 \left(R_2 + R_{n+1} + Z \sum_{i=2}^n l_i \right) + \dots + \dot{I}_k \left(R_{n+1} + Z \sum_{i=k}^n l_i \right) + \dots + \dot{I}_n \left(R_{n+1} + Zl_n \right) = \sum_{i=2}^n \dot{E}_i; \\ \dots; \\ \dot{I}_1 \left(R_{n+1} + Z \sum_{i=k}^n l_i \right) + \dot{I}_2 \left(R_{n+1} + Z \sum_{i=k}^n l_i \right) + \dots + \dot{I}_k \left(R_k + R_{n+1} + Z \sum_{i=k}^n l_i \right) + \dots + \dot{I}_n \left(R_{n+1} + Zl_n \right) = \sum_{i=k}^n \dot{E}_i; \\ \dots; \\ \dot{I}_1 \left(R_{n+1} + Zl_n \right) + \dot{I}_2 \left(R_{n+1} + Zl_n \right) + \dots + \dot{I}_k \left(R_{n+1} + Zl_n \right) + \dots + \dot{I}_n \left(R_n + R_{n+1} + Zl_n \right) = \dot{E}_n \end{array} \right. \quad (8)$$

Ток, стекающий через заземлитель R_{n+1} ,

$$\dot{I}_{n+1} = \dot{I}_1 + \dot{I}_2 + \dot{I}_3 + \dots + \dot{I}_n. \quad (9)$$

Полученные значения токов \dot{I}_Γ и \dot{I}_M , протекающих через заземлители, представлены на рисунке 6.

Потенциал оболочки кабеля относительно удаленной земли вследствие неопределенности и случайного характера фазовых соотношений гальванической и индуктивной составляющих определяется по квадратичному закону:

$$U_{MG} = \sqrt{U_M^2 + U_\Gamma^2}. \quad (10)$$

Распределение потенциалов по оболочке кабеля при гальваническом и индуктивном

Информационные технологии, автоматика, связь, телекоммуникации

влиянии U_G и U_M и значения результирующих потенциалов U_{MG} в зависимости от удаленности тяговой подстанции L приведены на рисунке 7.

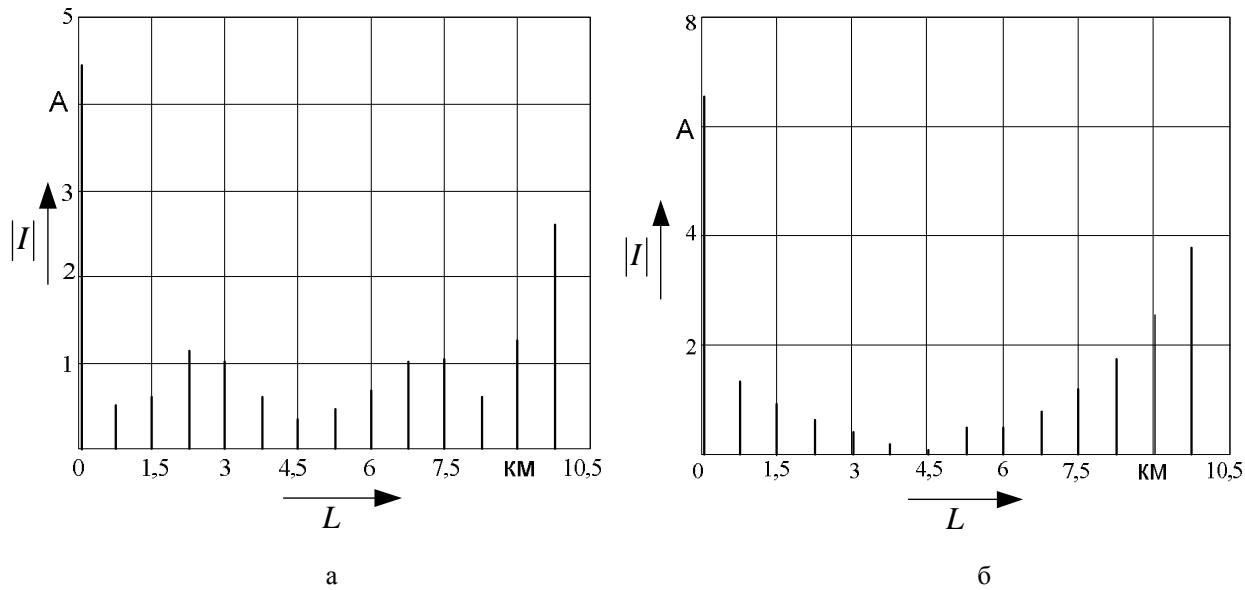


Рисунок 6 – Токи, протекающие через заземлители при гальваническом (а) и индуктивном (б) влиянии электротяги переменного тока

Таким образом, при электротяге переменного и постоянного тока на оболочке кабеля создаются потенциалы, значения которых намного превышают границы защитного диапазона ($-1,38 \div -0,85$ В), безопасного в отношении коррозии, что вызывает коррозионную опасность оболочки кабеля. Из полученных результатов следует, что с помощью заземляющих устройств, установленных по длине кабельной линии, рекомендованных [7], защитить кабель от коррозии невозможно. Поэтому в условиях работы электрифицированного железнодорожного транспорта как постоянного, так и переменного тока существует необходимость в разработке дополнительных мер по защите алюминиевой оболочки кабеля от коррозии. Одним из способов исключения коррозионного разрушения алюминиевой оболочки кабеля является необходимость поддержания переходного сопротивления оболочки в соответствии с требуемыми нормами.

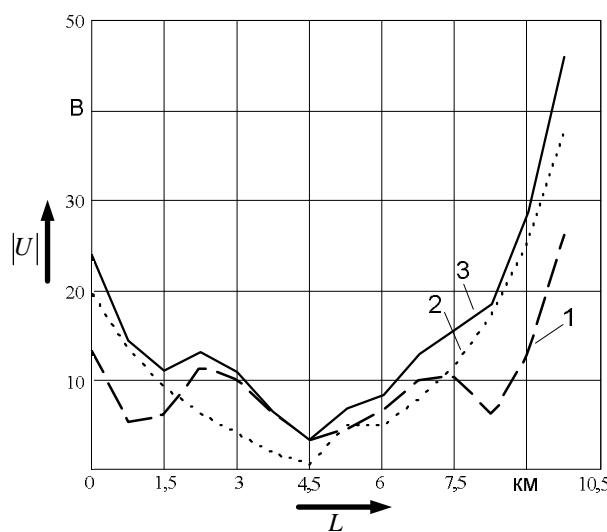


Рисунок 7 – Распределение потенциалов по оболочке кабеля при электротяге переменного тока при гальваническом (1) и при индуктированном (2) влиянии;
результатирующая кривая распределения потенциалов (3)

Информационные технологии, автоматика, связь, телекоммуникации

Список литературы

1. Поздеев, В. В. Повышение степени защиты крупных железнодорожных узлов [Текст] / В. В. Поздеев // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2010. – № 2 (2). – С. 92 – 97.
2. Манусов, В. З. Исследование методов снижения несимметрии загрузки трехфазной сети на тяговых подстанциях скоростных железных дорог переменного тока [Текст] / В. З. Манусов, П. В. Морозов // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2012. – № 2 (10). – С. 87 – 94.
3. Карабанов, М. А. Снижение влияния системы тягового электроснабжения на электропитание нетяговых потребителей в моменты подключения преобразовательных агрегатов [Текст] / М. А. Карабанов // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2011. – № 2 (7). – С. 58 – 67.
4. ГОСТ 9.602-2005. Единая система защиты от коррозии и старения. Сооружения подземные. Общие требования к защите от коррозии. - М.: Стандартинформ, 2006. – 59 с.
5. Волотковский, С. А. Защита подземных сооружений от электрокоррозии [Текст] / С. А. Волотковский, Е. В. Васильевский, Э. М. Гутман. – Киев: Наукова думка, 1964. – 132 с.
6. Тихонов, В. И. Выбросы случайных процессов [Текст] / В. И. Тихонов – М.: Наука, 1970. – 392 с.
7. Руководство по проектированию и защите от коррозии подземных металлических сооружений связи [Текст]. – М.: Связь, 1978. – 216 с.
8. Правила защиты устройств проводной связи от влияния тяговой сети электрических железных дорог постоянного тока. МПС СССР [Текст]. – М.: Транспорт, 1969. – Ч. 1. – 44 с.
9. Ерита, А. М. Параметры изолированного цилиндрического проводника в однородной среде [Текст] / А. М. Ерита, В. А. Кандаев, К. В. Авдеева // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2010. – № 3 (3). – С. 50 – 59.
10. Правила защиты устройств проводной связи и проводного вещания от влияния тяговой сети электрифицированных железных дорог переменного тока [Текст] – М.: Транспорт, 1989. – 134 с.

УДК 621.316.97

В. А. Кандаев, В. А. Мухин, А. О. Сырецкая

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОЛЯРИЗАЦИОННЫХ ПАРАМЕТРОВ ЗАЗЕМЛЯЮЩИХ УСТРОЙСТВ

Приведены аналитические зависимости для определения перенапряжения на границе раздела «металл – электролит», экспериментальная проверка выполненного расчета поляризации реального заземляющего устройства.

При расчете распределения электрических величин на подземном сооружении необходимо учитывать поляризацию металлических элементов сооружения под действием ближдающих токов [1]. Поляризация, или отклонение потенциала сооружения от стационарного значения, вызвана изменением структуры границы раздела «металл – грунт» и протеканием на границе раздела электрохимических и химических реакций. Поляризация может быть описана поляризационной характеристикой, которая представляет собой зависимость смещения потенциала металлического сооружения от плотности стекающего тока. В данной работе рассмотрен способ расчета поляризационной характеристики подземного металлического неизолированного сооружения.

Информационные технологии, автоматика, связь, телекоммуникации

Как известно [2], под действием внешнего потенциала происходит перемещение электронов через границу раздела «металл – электролит». Поскольку электролит не обладает электронной проводимостью, на границе раздела должно присутствовать вещество – деполяризатор (окислитель), которое будет ассимилировать электроны. Поэтому прохождение тока через границу раздела «металл – электролит» происходит в несколько стадий: подвод деполяризатора к границе раздела, процесс восстановления и освобождение поверхности металла от восстановленного вещества. Наиболее медленный из этих процессов определяет общую скорость перехода электронов между фазами и называется лимитирующей стадией реакции. В грунтовой воде присутствуют различные окислители, и возможность протекания реакции восстановления каждого из них связана с величиной потенциала подземного сооружения.

Исследования катодной поляризации металлов в электролитах приведены в фундаментальных работах по электрохимии и коррозии металлов [2 – 4]. В работах [3] и [4] рассмотрена кинетика восстановления водорода и кислорода на границе раздела «металл – электролит», приведены аналитические зависимости поляризации металлических электродов от плотности тока. Кроме того, работа [4] содержит экспериментальные данные, хорошо согласующиеся с теоретическим описанием катодного восстановления окислителей. Стоит отметить также, что экспериментальные данные для свежезачищенных и уже подвергшихся коррозии электродов не имеют принципиальных расхождений в «спокойном» электролите, что дает возможность при расчете поляризации электрода не учитывать степень его коррозионного разрушения [4].

Из литературных источников [2 – 4] известно, что при катодной поляризации металла в качестве основного деполяризатора на границе раздела для нейтральных и слабощелочных сред выступают ионы водорода и молекулярный кислород, растворенный в воде, поэтому в дальнейшем примем, что основную часть электронов на границе раздела ассимилируют кислород и вода.

Под воздействием блюжающих токов через границу раздела начинает протекать ток за счет восстановления кислорода в поровом растворе, прилегающем к сооружению. Одновременно на границе раздела происходит образование двойного слоя, поэтому токовая зависимость перенапряжения разряда кислорода $\eta(i_k)$ имеет сложный вид, но может быть упрощена для двух частных случаев [2]:

$$\eta_{O_2} = \frac{R \cdot T}{n \cdot F} \frac{i_k}{i_0} \text{ для } \eta_{O_2} < \frac{R \cdot T}{F}; \quad (1)$$

$$\eta_{O_2} = \frac{2R \cdot T}{n \cdot F} \ln\left(\frac{i_k}{i_0}\right) \text{ для } \eta_{O_2} > \frac{R \cdot T}{F}, \quad (2)$$

где R – универсальная газовая постоянная, Дж/моль·К;

T – абсолютная температура, К;

n – количество электронов, участвующих в реакции;

F – постоянная Фарадея, Кл/моль;

i_k – плотность катодного тока, А/м²;

i_0 – плотность тока обмена кислорода на железном электроде, А/м², $i_0 \approx F \cdot k_{O_2} \cdot C_{O_2}^\alpha$;

k_{O_2} – константа скорости катодной реакции восстановления кислорода на железном электроде, м/с;

C_{O_2} – концентрация кислорода в среде, моль/м³;

α – коэффициент переноса, $\alpha = 0,5$.

Восстановление кислорода на границе раздела можно описать известным уравнением:



Информационные технологии, автоматика, связь, телекоммуникации

Реакция (3) протекает в несколько стадий [5], и скорость реакции равна скорости наименее медленной из них. Так как на каждой из стадий происходит присоединение не более одного электрона, $n = 1$. В соответствии с формулой (2) зависимость $\eta_{O_2}(i_k)$ примет вид кривой 1 на рисунке 1.

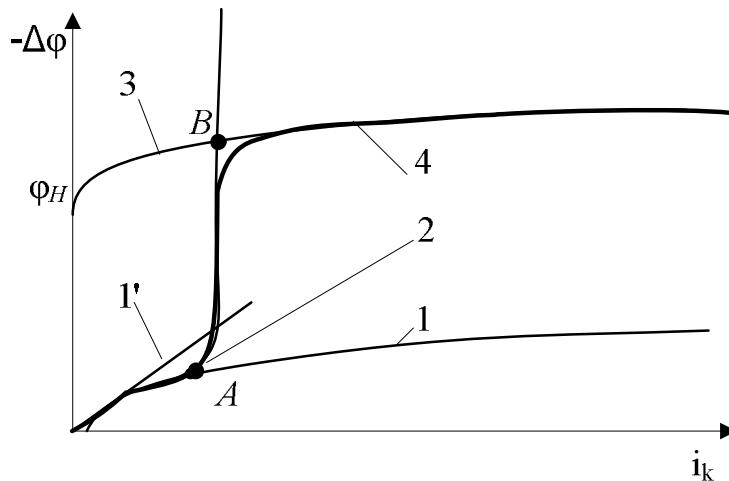


Рисунок 1 – Зависимость перенапряжения на границе раздела от плотности катодного тока

При протекании реакции (3) уменьшается концентрация кислорода на границе раздела, что приводит к возникновению диффузионных процессов. В случае если градиент концентрации кислорода изменяется медленно, диффузия может считаться квазистационарной и будет описываться первым законом Фика [3].

С возрастанием ближдающихся токов количество электронов, которые необходимо ассимилировать, увеличивается и ток через границу раздела будет определяться стадией диффузии кислорода из глубины грунта к поверхности электрода, или стадией массопереноса. Токовая зависимость перенапряжения стадии массопереноса $\Delta\Phi_{O_2}(i_k)$ имеет вид кривой 2 на рисунке 1 и описывается уравнением Нернста:

$$\Delta\Phi_{O_2} = \frac{R \cdot T}{n' \cdot F} \ln \left(1 - \frac{i_k}{I_k} \right), \quad (4)$$

где n' – количество электронов, ассимилирующихся одной молекулой кислорода в реакции (3), $n' = 4$;

I_k – плотность предельного катодного тока, A/m^2 , $I_k = \frac{D \cdot n' \cdot F \cdot C_o}{\delta}$ [4];

D – коэффициент диффузии кислорода, m^2/c ;

δ – толщина диффузного слоя границы раздела, м;

Помимо диффузионного тока в электролите под действием электрического поля может возникнуть миграционный ток, однако в реакции восстановления на границе раздела (I) окислителем выступает молекулярный кислород, который не является ионом, и поэтому не подвержен силовому влиянию электрического поля.

Поляризационная характеристика подземного сооружения будет описываться уравнением (4) до достижения потенциала ϕ_n , при котором на границе раздела становится возможен процесс восстановления водорода. Данный процесс в нейтральной и слабощелочной среде может быть описан уравнением:



Скорость восстановления водорода выше скорости диффузии кислорода, поэтому в

Информационные технологии, автоматика, связь, телекоммуникации

далее поляризационная кривая будет определяться процессом (5) и без учета падения напряжения в диффузной части двойного слоя может быть описана уравнением Фольмера [2]:

$$\eta_{H^+} = \frac{2R \cdot T}{n'' \cdot F} \ln \left(\frac{i_k}{i_0'} \right), \quad (6)$$

где n'' – количество электронов, присоединяемых ионом водорода;

i_0' – плотность тока обмена водорода на железном электроде, A/m^2 , $i_0' \approx F \cdot k_{H^+} \cdot C_{H^+}^\alpha$;

C_{H^+} – концентрация ионов H^+ в среде, моль/ m^3 ;

k_{H^+} – константа скорости восстановления водорода на железном электроде, m/c ;

α – коэффициент переноса, $\alpha = 0,5$.

Процесс восстановления водорода также протекает в несколько стадий [3], количество электронов, присоединяемых на каждой стадии, не более одного, поэтому $n'' = 1$.

Соотношения (1), (2), (4) и (6) могут быть использованы для нахождения поляризационной характеристики подземного металлического сооружения, однако при этом необходимо определить значения входящих в них параметров.

Температура грунта зависит от температуры воздуха, типа грунта и расстояния от поверхности земли. Например, в мае естественная средняя месячная температура почвы на юге Омской области на глубине 0,4 м от поверхности земли составляет $8,7^\circ C$, на глубине 0,8 м – $5,1^\circ C$, а на глубине 1,6 м – всего $0,9^\circ C$. Поэтому для инженерных расчетов температуру можно принять равной средней температуре почвы в летний период на глубине 0,5 – 0,7 м, что составляет $5 - 15^\circ C$. Константы скорости восстановления кислорода k_O и водорода k_H также могут быть заданы постоянными значениями, соответствующими средней температуре в летний период [6]. Для определения C_{H^+} в полевых условиях может быть применен любой из кислотно-основных индикаторов или универсальный индикатор. Концентрация кислорода в грунте C_{O_2} на глубине 0,5 – 0,7 м слабо зависит от погодных условий и меняется в диапазоне значений $10^{-4} - 10^{-5}$ моль/л, для расчетов C_{O_2} может быть определена в соответствии с типом грунта по методике, учитывающей пористость, влажность грунта и растворимость кислорода в поровом растворе [7].

Толщина диффузного слоя на границе раздела δ , коэффициент диффузии кислорода D зависят от типа грунта и его влажности ω , и поскольку для расчета предельного катодного тока необходимо отношение D/δ , можно воспользоваться экспериментальными данными по определению $D/\delta(\omega)$ [7].

Общая поляризационная характеристика подземного сооружения $-\Delta\varphi_{pez}(i_k)$ представляет собой результирующую кривую 4 на рисунке 1. До значения $-\Delta\varphi_{pez} = 0,025$ В график $-\varphi_{pez}(i_k)$ совпадает с прямой 1' на рисунке 1, в интервале $0,025 V < -\Delta\varphi_{pez} < -\Delta\varphi_{pez}(A)$ примет вид кривой 1 согласно соотношениям (1), (2). В точке A происходит смена замедленной стадии катодного процесса, и в интервале $-\Delta\varphi(A) < -\Delta\varphi_{pez} < -\Delta\varphi(B)$ поляризация будет определяться соотношением [4]:

$$-\Delta\varphi_{pez}(i_k) = \eta(i_k) + (-8\Delta\varphi(i_k)). \quad (7)$$

При достижении потенциалом сооружения значения φ_H на границе раздела начинается процесс восстановления водорода, и в точке B скорость восстановления водорода становится равной скорости диффузии кислорода, поэтому для значений $-\Delta\varphi_{pez} > -\Delta\varphi_{pez}(B)$ поляризационная характеристика сооружения будет приближаться к кривой 3. Такой вид поляризационной характеристики сохранит для всех значений плотности тока, при которых не происходит

Информационные технологии, автоматика, связь, телекоммуникации

изменения физических свойств границы раздела, таких как иссушение грунта на границе раздела из-за сильного нагревания подземного сооружения или появление нелинейности вольт-амперной характеристики (ВАХ) грунта при критических значениях напряженности электрического поля [8].

Построенная по формулам (1), (2), (4), (6) и (7) теоретическая поляризационная кривая в точках A и B будет иметь перегибы, однако у реальной кривой поляризации подземного сооружения такие перегибы сглажены, поскольку смена замедленной стадии катодного процесса происходит постепенно. В окрестности точки A скорости диффузии и восстановления кислорода близки, а полный ток через границу раздела будет определяться наиболее медленным из процессов, поэтому в реальной поляризационной характеристике $\Delta\phi(A)_{\text{расчет}} < \Delta\phi(A)_{\text{реал}}$. В окрестности точки B становятся близкими скорости диффузии кислорода и восстановления водорода, и поскольку они протекают независимо друг от друга, полный ток через границу раздела будет являться суммарным для этих процессов, $\Delta\phi(B)_{\text{расчет}} > \Delta\phi(B)_{\text{реал}}$.

По приведенным соотношениям был выполнен расчет поляризационной характеристики одиночного горизонтального электрода, заданной кусочно-непрерывной функцией. В качестве констант скоростей реакций восстановления кислорода и водорода использованы значения, приведенные в работе [6], коэффициенты уравнений (1), (2), (4) и (6) приведены в таблице. Параметры среды, заданные в расчете, соответствуют суглинку средней влажности и пористости для средней температуры в летний период на территории Омской области.

Параметры среды для расчета поляризации горизонтального электрода

Параметры среды	Значение параметра среды	Единица измерения параметра
Температура грунта	288	К
Концентрация кислорода в грунте	1,1	моль/м ³
pH грунта на границе раздела	8	
Отношение коэффициента диффузии кислорода к толщине диффузного слоя	$5,28 \cdot 10^{-9}$	м ² /с

На рисунке 2 представлена поляризационная кривая стального электрода, рассчитанная по формулам (1), (2), (4) и (6) со значениями, приведенными в таблице.

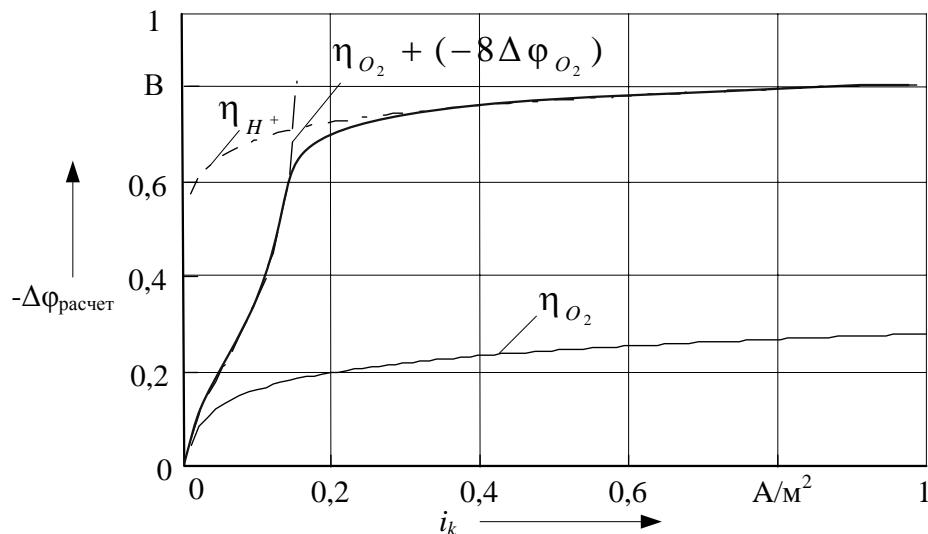


Рисунок 2 – Расчетная поляризационная характеристика стального электрода

Для экспериментального подтверждения результатов расчета поляризации электрода в грунте был изготовлен одиночный горизонтальный заземлитель с размерами 50×4×5000 мм, помещенный на глубине 0,7 м от поверхности земли. Схема определения токовой зависимости исследуемого заземлителя приведена на рисунке 3.

Информационные технологии, автоматика, связь, телекоммуникации

Измерения производились для катодной поляризации заземлителя. Экспериментальная поляризационная характеристика заземлителя, представленная на рисунке 4, была получена по результатам измерения падения напряжения на заземлитеle U_{3y} и плотности тока через заземлитель i_k :

$$-\Delta\phi_{\text{эксп}}(i_k) = U_{3y}(i_k) - R_{\text{раст}} \cdot i_k, \quad (8)$$

где $R_{\text{раст}}$ – сопротивление растеканию ЗУ, определенное по методике [9].

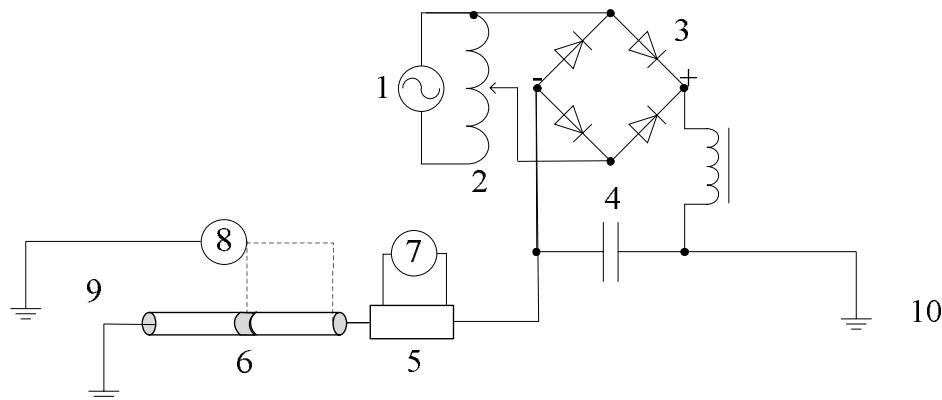


Рисунок 3 – Схема определения токовой зависимости сопротивления заземлителя: 1 – источник питания, 2 – лабораторный автотрансформатор (ЛАТР), 3 – диодный мост, 4 – выпрямительная емкость, 5 – шунт, 6 – заземлитель, 7, 8 – вольтметры постоянного напряжения, 9 – потенциальный электрод, 10 – токовый электрод

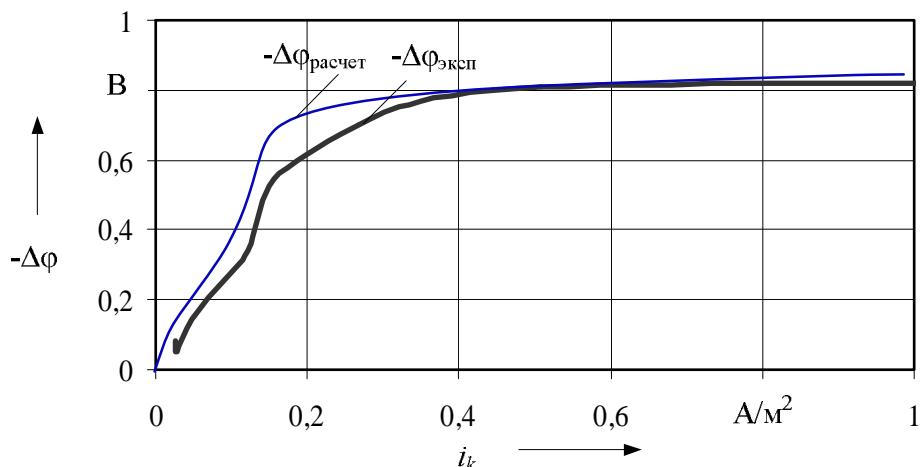


Рисунок 4 – Поляризационная характеристика стальной полосы в грунте

Как видно из рисунков 2 и 4, расхождения экспериментальных и расчетных поляризационных характеристик не превышает 10 %, что позволяет применять предложенный метод для определения сопротивления реальных подземных сооружений с учетом границы раздела параметров «металл – грунт» [10].

Список литературы

- Ерита, А. М. Параметры изолированного цилиндрического проводника в однородной среде [Текст] / А. М. Ерита, В. А. Кандаев, К. В. Авдеева // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2010. – № 3. – С. 50 – 58.
- Дамаскин, Б. Б. Электрохимия: учебное пособие [Текст] / Б. Б. Дамаскин, О. А. Петрий. – М.: Высшая школа, 1987. – 295 с.

Информационные технологии, автоматика, связь, телекоммуникации

3. Фрумкин, А. Н. Избранные труды: электродные процессы [Текст] / А. Н. Фрумкин. – М.: Наука, 1987. – 336 с.
4. Томашов, Н. Д. Коррозия металлов с кислородной деполяризацией [Текст] / Н. Д. Томашов / АН СССР. М.-Л., 1947. – 259 с.
5. Протченко, А. В. Схема замещения коррозионной ячейки железобетонной опоры контактной сети [Текст] / А. В. Протченко, В. А. Мухин // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2011. – № 3. – С. 67 – 73.
6. Антропов, Л. И. Теоретическая электрохимия: Учебник [Текст] / Л. И. Антропов. – М.: Высшая школа, 1984. – 519 с.
7. Хижняков, В. И. К оценке содержания кислорода в грунте по значению предельного катодного тока на платиновом электроде [Текст] / В. И. Хижняков, Н. П. Глазов, О. И. Налесник // Коррозия и защита в нефтегазовой промышленности. – 1980. – № 12. – С. 2 – 4.
8. Рябкова, Е. Я. Расчет заземляющих устройств (заземления в установках высокого напряжения) [Текст] / Е. Я. Рябков / МЭИ. – М., 1973. – 128 с.
9. Кандаев, В. А. Поле точечного источника вблизи системы проводников, расположенных на поверхности земли [Текст] / В. А. Кандаев, Л. А. Карпова, К. В. Авдеева // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2010. – № 1. – С. 50 – 59.
10. Кандаев, В. А. Методика расчета заземляющего устройства с учетом сопротивления границы раздела «металл – грунт» [Текст] / В. А. Кандаев, К. В. Авдеева, А. О. Сырецкая // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2012. – № 2. – С. 69 – 73.

УДК 621.331:621.311.4:621.314.5

О. О. Комякова, А. А. Комяков, А. С. Вильгельм

АНАЛИЗ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ, ВОЗВРАЩАЕМОЙ ИНВЕРТОРАМИ ТЯГОВЫХ ПОДСТАНЦИЙ ПОСТОЯННОГО ТОКА В СЕТЬ ЭНЕРГОСИСТЕМ

В статье выполнен анализ качества электрической энергии, возвращаемой двенадцатипульсовым выпрямительно-инверторным преобразователем с последовательным соединением шестипульсовых мостовых секций, работающим в инверторном режиме, при несимметричных и несинусоидальных режимах работы питающей энергосистемы.

В соответствии с «Энергетической стратегией ОАО «РЖД» на период до 2010 года и на перспективу до 2030 года» задача снижения затрат на потребляемые энергоресурсы является одной из наиболее актуальных. Существенной их составляющей являются затраты на оплату электроэнергии, расходуемой на тягу поездов. Одним из направлений повышения эффективности использования этого вида энергии является применение рекуперативного торможения электроподвижного состава [1, 2].

Возврат энергии рекуперации и, следовательно, процесс электрического торможения возможны только при одновременном потреблении энергии. Таким образом, величина рекуперируемой энергии зависит главным образом от наличия приемников энергии, их характеристик и характеристик электроподвижного состава [3].

На однопутных и многопутных участках энергия рекуперации в некоторых случаях может превышать величину, которую можно реализовать на электроподвижном составе, находящемся в режиме тяги. В этих случаях появляется избыточная энергия рекуперации.

Тип, мощность и размещение приемников избыточной энергии рекуперации рациональным образом выбираются на основании величин абсолютной и избыточной энергии рекуперации. Исходными положениями при этом принимаются следующие:

– мощность и расположение приемников избыточной энергии необходимо выбирать так,

Информационные технологии, автоматика, связь, телекоммуникации

чтобы поездам, следующим по спускам, были созданы условия для применения рекуперативного торможения при любых, даже наиболее тяжелых, поездных ситуациях на участке;

– тип и количество выбираемых установок должны быть оправданы экономическими соображениями, т. е. они должны обеспечить наибольший экономический эффект от применения рекуперативного торможения.

Для обеспечения возврата избыточной энергии рекуперации в сети питающих энергосистем на тяговых подстанциях постоянного тока необходима установка инверторов. Экономическая эффективность применения инверторов определяется стоимостью возвращенной электроэнергии, уменьшением износа тормозных колодок, увеличением скорости движения поездов на спусках.

В соответствии с техническими указаниями № П-04/07 Департамента электрификации и электроснабжения ОАО «РЖД» применение выпрямительно-инверторных преобразователей (ВИПов) при проектировании и реконструкции тяговых подстанций постоянного тока допускается только в тех случаях, когда имеется надлежащим образом оформленное согласие энергоснабжающей организации на учет электрической энергии, возвращаемой из тяговой сети, в общих расчетах за электроэнергию, потребляемую ОАО «РЖД». Поэтому для учета энергии рекуперации, возвращаемой инвертором в сети энергосистем, при взаиморасчетах с энергоснабжающей организацией необходим анализ качества электрической энергии.

В настоящее время наиболее распространенным методом исследования качества электроэнергии являются экспериментальные измерения. Однако при сооружении новых и реконструкции существующих тяговых подстанций использование такого подхода для определения гармонического состава напряжения, возвращаемого инверторами в сети энергосистем, не представляется возможным. Поэтому наиболее эффективными способами являются математические методы моделирования с высокой степенью детализации и достоверности получаемых результатов с возможностью исследования динамики развития процессов.

В большинстве случаев напряжение энергосистемы, питающей тяговые подстанции постоянного тока электрифицированных железных дорог с выпрямительно-инверторными преобразователями, является несимметричным и несинусоидальным, что неблагоприятно оказывается на работе силового электрооборудования, систем автоматики, телемеханики и связи.

Несимметричные несинусоидальные напряжения питающей сети переменного тока можно представить суммой отдельных гармоник напряжения. Уравнения кривых фазных напряжений питающей системы представлены в виде:

$$\begin{cases} u_{1A} = \sum_{v=1}^{\infty} \sqrt{2}U_{1A(v)} \cos(v\tau - \psi_{A(v)}); \\ u_{1B} = \sum_{v=1}^{\infty} \sqrt{2}U_{1B(v)} \cos(v\tau + \psi_{B(v)}); \\ u_{1C} = \sum_{v=1}^{\infty} \sqrt{2}U_{1C(v)} \cos(v\tau + \psi_{C(v)}), \end{cases} \quad (1)$$

где $U_{1A(v)}$, $U_{1B(v)}$, $U_{1C(v)}$ – значение v -й гармоники напряжения фаз A , B , C в питающей системе; $\psi_{A(v)}$, $\psi_{B(v)}$, $\psi_{C(v)}$ – углы сдвига фазных ЭДС v -й гармоники по отношению к первой для фазы A , вычисляемые $\psi_{B(v)} = \pi \mp C_{(v)} - \psi_{A(v)}$; $\psi_{C(v)} = \pi \pm B_{(v)} - \psi_{A(v)}$, где $C_{(v)}$, $B_{(v)}$ – углы треугольника несимметричных питающих ЭДС, вычисляются отдельно для каждой гармоники [4].

Выпрямительно-инверторные преобразователи тяговых подстанций электрифицированных железных дорог в результате процесса коммутации вентильных токов преобразователя дополнитель ноискажают кривую питающего напряжения при возврате электроэнергии инверторами в сеть энергосистем.

Информационные технологии, автоматика, связь, телекоммуникации

Схема замещения питающей системы и ВИПа приведена на рисунке 1. Так как на интервале коммутации существует междуфазное короткое замыкание, то напряжение на шинах преобразователя u_1 определяется отношением индуктивностей питающей системы L_c и трансформатора L_t (см. рисунок 1). При этом при снижении индуктивного сопротивления питающей системы уменьшается искажение кривой напряжения [5].

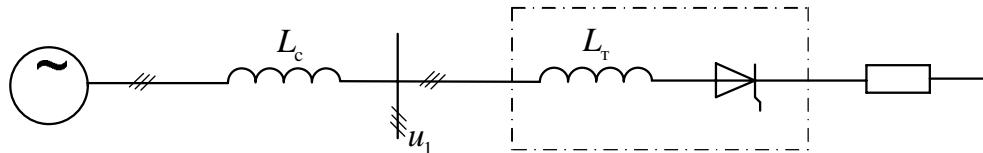


Рисунок 1 – Схема замещения питающей системы и ВИПа

При рассмотрении электромагнитных процессов двенадцатипульсового выпрямительно-инверторного преобразователя с последовательным соединением шестипульсовых мостовых секций необходимо учитывать, что при конструировании преобразовательных трансформаторов с расщепленными вентильными обмотками, соединенными по схемам звезды и треугольника, всегда будет наблюдаться несимметрия системы линейных напряжений вентильных обмоток, которую называют конструктивной несимметрией и оценивают коэффициентом α_k .

Кривые противоЭДС в вентильных обмотках, собранных по схеме звезды и треугольника, кривые напряжения u_{1A} и сетевого тока i'_{1A} для фазы A на шинах двенадцатипульсового ВИПа при несимметричном несинусоидальном питающем напряжении энергосистемы в режиме нагрузки приведены на рисунках 2 – 4.

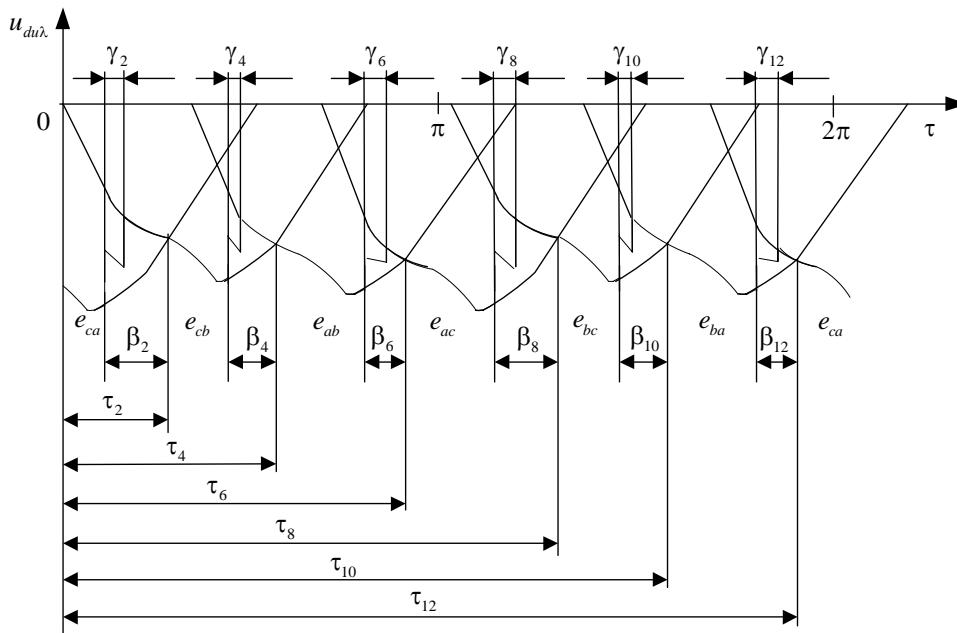
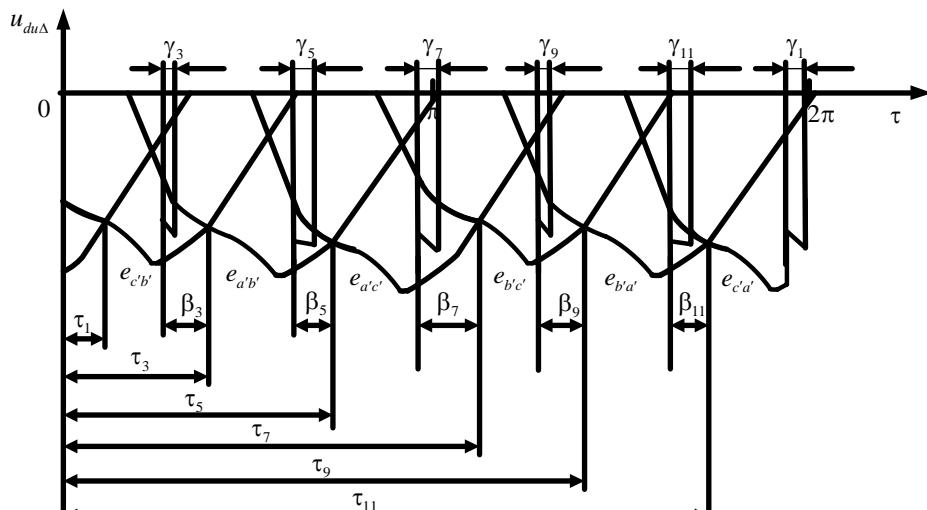


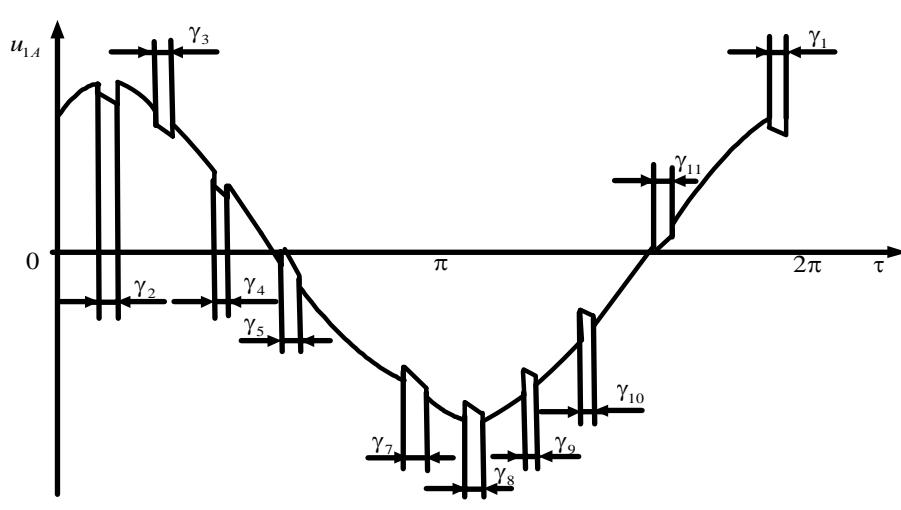
Рисунок 2 – Кривые противоЭДС в вентильных обмотках, собранных по схеме звезды на шинах двенадцатипульсового инвертора при несимметричном несинусоидальном питающем напряжении энергосистемы в режиме нагрузки

Спектр высших гармонических составляющих напряжения u_{1A} аналогичен спектру сетевого тока i'_{1A} на шинах двенадцатипульсового ВИПа. Способ расчета гармонического состава сетевого тока двенадцатипульсового инвертора приведен в работе [6].

Для определения действующих значений гармоник напряжения u_{1A} инвертора использовано разложение функции напряжения в комплексный ряд Фурье.



а



б

Рисунок 3 – Кривые противоЭДС в вентильных обмотках, собранных по схеме треугольника (а), и кривая напряжения (б) на шинах двенадцатипульсового инвертора при несимметричном несинусоидальном питающем напряжении энергосистемы в режиме нагрузки

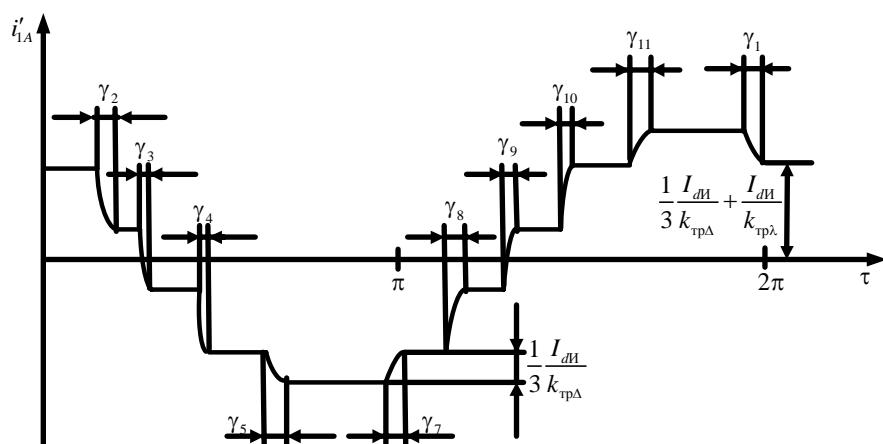


Рисунок 4 – Кривая сетевого тока на шинах двенадцатипульсового инвертора при несимметричном несинусоидальном питающем напряжении энергосистемы в режиме нагрузки

Информационные технологии, автоматика, связь, телекоммуникации

Напряжение гармоник v -го порядка фазы A на шинах двенадцатипульсового инвертора определяется следующим образом:

$$\dot{U}_{1A(v)} = \frac{1}{\pi} \left[\int_0^{\tau_2 - \beta_2} u_{1A} e^{-jv\tau} d\tau + \int_{\tau_2 - \beta_2}^{\tau_2 - \beta_2 + \gamma_2} (u_{1A} - vX_c I_{1A(v)}) e^{-jv\tau} d\tau + \int_{\tau_2 - \beta_2 + \gamma_2}^{\tau_3 - \beta_3} u_{1A} e^{-jv\tau} d\tau + \right. \\ + \int_{\tau_3 - \beta_3}^{\tau_3 - \beta_3 + \gamma_3} (u_{1A} - vX_c I_{1A(v)}) e^{-jv\tau} d\tau + \int_{\tau_3 - \beta_3 + \gamma_3}^{\tau_4 - \beta_4} u_{1A} e^{-jv\tau} d\tau + \int_{\tau_4 - \beta_4}^{\tau_4 - \beta_4 + \gamma_4} (u_{1A} - vX_c I_{1A(v)}) e^{-jv\tau} d\tau + \\ + \int_{\tau_4 - \beta_4 + \gamma_4}^{\tau_5 - \beta_5} u_{1A} e^{-jv\tau} d\tau + \int_{\tau_5 - \beta_5}^{\tau_5 - \beta_5 + \gamma_5} (u_{1A} + vX_c I_{1A(v)}) e^{-jv\tau} d\tau + \int_{\tau_5 - \beta_5 + \gamma_5}^{\tau_7 - \beta_7} u_{1A} e^{-jv\tau} d\tau + \\ + \int_{\tau_7 - \beta_7}^{\tau_7 - \beta_7 + \gamma_7} (u_{1A} + vX_c I_{1A(v)}) e^{-jv\tau} d\tau + \int_{\tau_7 - \beta_7 + \gamma_7}^{\tau_8 - \beta_8} u_{1A} e^{-jv\tau} d\tau + \int_{\tau_8 - \beta_8}^{\tau_8 - \beta_8 + \gamma_8} (u_{1A} + vX_c I_{1A(v)}) e^{-jv\tau} d\tau + \quad (2) \\ + \int_{\tau_8 - \beta_8 + \gamma_8}^{\tau_9 - \beta_9} u_{1A} e^{-jv\tau} d\tau + \int_{\tau_9 - \beta_9}^{\tau_9 - \beta_9 + \gamma_9} (u_{1A} + vX_c I_{1A(v)}) e^{-jv\tau} d\tau + \int_{\tau_9 - \beta_9 + \gamma_9}^{\tau_{10} - \beta_{10}} u_{1A} e^{-jv\tau} d\tau + \\ + \int_{\tau_{10} - \beta_{10}}^{\tau_{10} - \beta_{10} + \gamma_{10}} (u_{1A} + vX_c I_{1A(v)}) e^{-jv\tau} d\tau + \int_{\tau_{10} - \beta_{10} + \gamma_{10}}^{\tau_{11} - \beta_{11}} u_{1A} e^{-jv\tau} d\tau + \int_{\tau_{11} - \beta_{11}}^{\tau_{11} - \beta_{11} + \gamma_{11}} (u_{1A} - vX_c I_{1A(v)}) e^{-jv\tau} d\tau + \\ \left. + \int_{\tau_{11} - \beta_{11} + \gamma_{11}}^{\tau_1 - \beta_1 + 2\pi} u_{1A} e^{-jv\tau} d\tau + \int_{\tau_1 - \beta_1 + 2\pi}^{\tau_1 - \beta_1 + 2\pi + \gamma_1} (u_{1A} - vX_c I_{1A(v)}) e^{-jv\tau} d\tau + \int_{\tau_1 - \beta_1 + 2\pi + \gamma_1}^{2\pi} u_{1A} e^{-jv\tau} d\tau \right],$$

где $\beta_1 - \beta_{11}$ и $\tau_1 - \tau_{11}$ – соответственно углы опережения открытия и моменты открытия тиристоров инвертора; $\gamma_1 - \gamma_{11}$ – углы коммутации вентильных токов; X_c – индуктивные сопротивления питающей системы и понижающего трансформатора, приведенные к напряжению вентильных обмоток преобразовательного трансформатора; $I_{1A(v)}$ – сетевой ток фазы A v -й гармоники.

Способ определения углов опережения открытия и моментов открытия тиристоров двенадцатипульсового ВИПа, углов коммутации вентильных токов приведен в работе [4].

Кривую питающего напряжения характеризуют коэффициентом искажения синусоидальности K_U и коэффициентом v -й гармонической составляющей $K_{U(v)}$. Коэффициент искажения синусоидальности в соответствии с ГОСТ 13109-97 рассчитывается по выражению:

$$K_U = \frac{\sqrt{\sum_{v=2}^{\infty} U_{(v)}^2}}{U_{(1)}} \cdot 100 \% , \quad (3)$$

где $U_{(v)}$ – действующее значение напряжения v -й гармоники; $U_{(1)}$ – действующее значение напряжения первой гармоники.

Коэффициент v -й гармонической составляющей $K_{U(v)}$ равен отношению действующего значения гармоники v -го порядка к первой гармонике питающего напряжения.

Изложенный метод использован для оценки возможного искажения синусоидальности напряжения на шинах двенадцатипульсового инвертора типа И-ПТП-1,6к-3,8к-50-УХЛ4 при внедрении его на тяговой подстанции Южно-Уральской железной дороги. Для расчета были приняты следующие исходные данные: номинальный ток инвертора $I_{динв} = 1600$ А, сопротивление питающей системы $X_c = 12$ Ом, напряжение питающей системы $U_c = 115$ кВ, напря-

Информационные технологии, автоматика, связь, телекоммуникации

жение короткого замыкания понизительного трансформатора $u_{\text{к.п.}}=17\%$, преобразовательно-го – $u_{\text{кт}} = 7,24$, номинальная мощность понизительного трансформатора $S_{\text{кп}} = 16 \text{ МВ}\cdot\text{А}$, пре-образовательного – $S_{\text{кт}} = 11,4$; номинальное напряжение на шинах преобразователя $U_{\text{ном}} = 10$ кВ, коэффициент конструктивной несимметрии вентильных обмоток трансформатора $\alpha_k = 2\%$.

Численные значения коэффициента v -й гармонической составляющей напряжения $K_{U(v)}$ на шинах двенадцатипульсового инвертора в режиме номинальной нагрузки при различных коэффициентах несимметрии питающего напряжения по обратной последовательности K_{2U} и различной несинусоидальности приведены в таблице.

Несинусоидальный режим обусловлен наличием в питающем напряжении энергосистемы 1, 5, 7, 11 ... гармоник. В расчетах значения гармоник заданы в соответствии с допустимыми значениями, указанными в ГОСТ 13109-97. При таких гармониках исходный коэффициент искажения синусоидальности питающего напряжения энергосистемы составляет 6 %.

При симметричном режиме питающей системы в кривой напряжения двенадцатипульсово-го выпрямительно-инверторного преобразователя присутствуют только канонические гармоники, характерные для сетевого тока преобразователя. С появлением несимметрии изменяется спектральный состав гармоник питающего напряжения преобразователя, т. е. появляются неканонические гармоники, кратные трем, значения которых с ростом несимметрии увеличиваются.

При несимметричном режиме несинусоидальность приводит к увеличению численных значений неканонических гармоник (3, 5, 7, 9...) и незначительно влияет на характер изменения канонических (11, 13, 23...).

Коэффициент v -й гармонической составляющей напряжения на шинах двенадцатипульсового инвертора $K_{U(v)}$ на шинах двенадцатипульсового инвертора при несимметричном несинусоидальном питающем напряжении энергосистемы в режиме номинальной нагрузки

Порядок гармоники v	Значения $K_{U(v)}$ при коэффициенте несимметрии питающего напряжения по обратной последовательности K_{2U} , %					
	$K_{2U} = 0\%$		$K_{2U} = 2\%$		$K_{2U} = 5\%$	
	синусоидальный режим	несинусоидальный режим	синусоидальный режим	несинусоидальный режим	синусоидальный режим	несинусоидальный режим
1	100	100	100	100	100	100
3	0	0	0,023	0,026	0,059	0,073
5	0,012	4,08	0,011	4,07	0,013	4,059
7	0,009	2,953	0,011	2,947	0,023	2,939
9	0	0	0,034	0,028	0,044	0,04
11	1,588	1,684	1,511	1,601	1,283	1,509
13	1,315	2,926	1,296	2,929	1,189	2,894
15	0	0	0,071	0,105	0,205	0,289
17	0,007	1,646	0,013	1,607	0,062	1,551
19	0,011	1,025	0,006	0,923	0,017	0,844
21	0	0	0,019	0,021	0,092	0,121
23	0,764	1,636	0,632	1,419	0,318	1,074

Изменение коэффициента искажения синусоидальности кривой питающего напряжения двенадцатипульсового выпрямительно-инверторного преобразователя, работающего в инверторном режиме, в зависимости от коэффициента нагрузки K_H и несимметрии питающего напряжения K_{2U} приведено на рисунке 5.

Из рисунка 5,а следует, что двенадцатипульсовый инвертор тяговых подстанций в ре-

Информационные технологии, автоматика, связь, телекоммуникации

зультате особенностей своей работы при возврате электроэнергии в сеть энергосистема иска-
жает кривую питающего напряжения не более чем на 2,5 %. При наличии в питающем на-
пряженении энергосистемы высших гармоник коэффициент искажения синусоидальности K_U
при инвертировании электроэнергии искается в пределах, допустимых ГОСТ 13109-97. С
ростом нагрузки увеличивается искажение синусоидальности кривой напряжения на шинах
ВИПа.

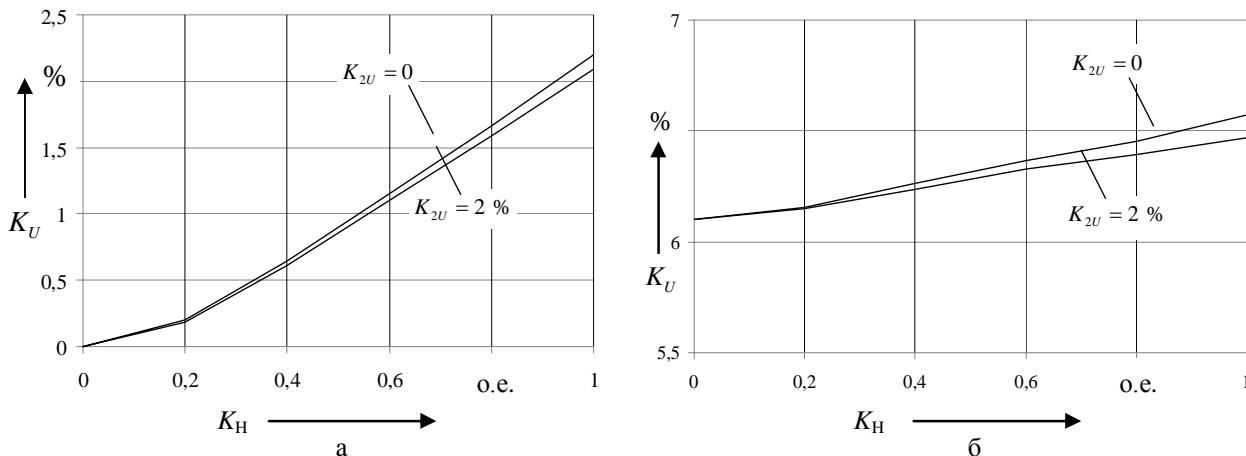


Рисунок 5 – Коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения на шинах двенадцатипульсового инвертора при синусоидальном (а) и несинусоидальном (б) питающем напряжении энергосистемы различной несимметрии в зависимости от коэффициента нагрузки

Таким образом, установка двенадцатипульсового инвертора на рассматриваемой тяговой подстанции не приведет к существенному искажению кривой питающего напряжения, что позволяет организовать принятие к расчету электрической энергии, возвращаемой из тяговой сети, в общих расчетах за электроэнергию, потребляемую ОАО «РЖД».

В целом использование двенадцатипульсового ВИПа способствует снижению влияния высших гармонических составляющих на качество электрической энергии в питающей системе в сравнении с шестипульсовым ВИПом.

Список литературы

1. Черемисин, В. Т. Основные направления реализации федерального закона № 261-ФЗ от 23.11.09 «Об энергосбережении...» в холдинге «Российские железные дороги» [Текст] / В. Т. Черемисин, М. М. Никифоров // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2010. – С. 119 – 124.
2. Никифоров, М. М. Целевые показатели энергосбережения и повышения энергетической эффективности системы тягового электроснабжения и электропотребления на нетяговые нужды [Текст] / М. М. Никифоров // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2010. – С. 110 – 117.
3. Никифоров, М. М. Методика оценки потенциала энергоэффективности применения рекуперативного торможения [Текст] / М. М. Никифоров, А. Л. Каштанов, В. А. Кандаев // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2012. – С. 72 – 78.
4. Комякова, О. О. Метод определения несимметричных питающих напряжений при работе выпрямительно-инверторных преобразователей тяговых подстанций / О. О. Комякова // Межвуз. сб. трудов молодых ученых, аспирантов и студентов / Сибирская гос. автомобильно-дорожная академия. – Омск, 2008. – Вып. 5. – Ч. 1. – С. 153 – 159.
5. Бурков, А. Т. Электронная техника и преобразователи / А. Т. Бурков. – М.: Транспорт, 1999. – 464 с.
6. Комякова, О. О. Гармонический анализ сетевого тока преобразователя, работающего в инверторном режиме, при несимметричном несинусоидальном напряжении питающей сети [Текст] / О. О. Комякова, Т. В. Комякова // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2010. – С. 55 – 63.

ПРИМЕНЕНИЕ ИДЕИ «ПЕРЕДАЧИ НЕЧАЕВА» ПРИ РАЗРАБОТКЕ КОМПОНОВОЧНОЙ СХЕМЫ ТЯГОВОГО ПРИВОДА ЛОКОМОТИВА С ПАРАЛЛЕЛЬНЫМИ ПОТОКАМИ МОЩНОСТИ

Предложена конструкторская разработка зубчатой передачи с высокими показателями технологичности при изготовлении и эксплуатации. Обоснована возможность реализации на базе этой зубчатой передачи компоновочной схемы тягового привода с параллельными потоками мощности.

В статье представлена разработка, которая относится к области исследований возможности реализации новых технических решений на железнодорожном транспорте, в частности, к разработкам перспективных схем тягового электропривода.

Из теории электропривода [1] известен ряд прогрессивности реализуемых схем взаимодействия электрических двигателей с потребителями энергии - исполнительными механизмами: от группового электропривода к индивидуальному однодвигательному; от индивидуального однодвигательного к индивидуальному многодвигательному.

В практике отечественного производства железнодорожных подвижных транспортных средств реализована схема индивидуального однодвигательного электропривода: один двигатель обслуживает одну колесную пару.

Значительные мощности (800 – 900 кВт), реализуемые при обеспечении движения, диктуют необходимость применения дополнительных технических средств для создания условий нормальной работы тяговых двигателей, прежде всего средств охлаждения (для сравнения: двигатели электропоездов вдвое меньшей мощности в этих средствах не нуждаются).

Существенным конструктивным недостатком известных схем являются стесненные габариты [2] тягового привода, обусловленные, в том числе, конструкцией механической передачи вращательного движения от вала двигателя к оси колесной пары в виде ступени зубчатых колес с внешним зацеплением. При этом ремонтопригодность передачи соответствует самому низкому технологическому уровню: при достижении определенной степени износа зуба шестерни она подлежит замене на шестерню первой категории. Повышение требований к увеличению веса состава вызывает рост нагрузки на зуб, приводит к интенсификации отказов передачи.

Первым шагом при решении задачи повышения эксплуатационных качеств тягового привода железнодорожного подвижного транспортного средства стала разработка торцевой зубчатой передачи с внутренним зацеплением [3].

Исходной информацией при разработке этой передачи стали сведения о техническом решении «передача Нечаева» [4], согласно которому зубчатая передача с внутренним зацеплением торцевых зубьев позволяет значительно увеличить передаточное отношение ступени зацепления (при уменьшении ее габаритов и металлоемкости) по сравнению с зубчатой передачей, использующей эвольвентный профиль рабочей поверхности зуба. Этот результат обеспечен тем, что выпуклый рабочий профиль зубьев шестерни, выполненных в виде выступов на торцевой поверхности венца малого (ведущего) колеса зацепления, ограничен параметрами «улитки Паскаля», а зубья ответного (ведомого) колеса, выполненные в виде выступов на торцевой поверхности его венца, имеют плоские рабочие поверхности. Линия зацепления передачи Нечаева имеет форму участка внешней петли «улитки Паскаля», что дает возможность при относительно высоких значениях передаточного отношения ступени зацепления обеспечить высокое значение коэффициента перекрытия.

Например, при числе зубьев шестерни $Z_{\text{ш}} = 4$, числе зубьев колеса $Z_{\text{k}} = 12$, передаточном числе $i = 3$ коэффициент перекрытия e имеет значение 1,5.

Изготовление плоского профиля зубьев ведомого колеса передачи Нечаева не связано с

Информационные технологии, автоматика, связь, телекоммуникации

какими-либо технологическими трудностями в силу простой геометрической формы, а значит, несложной технологии механической обработки их поверхностей. В то же время изготовление малых колес передачи при масштабных переходах, обусловленных изменением величины передаваемой нагрузки, в каждом новом случае представляет собой самостоятельную инженерную задачу. Это вызвано отсутствием в перечне механической оснастки, пред назначенной для изготовления зубчатых колес различных размеров, унифицированных средств, пригодных для выполнения рабочей поверхности зуба, ограниченной параметрами «улитки Паскаля».

Кроме того, передача Нечаева не обеспечивает в полной мере выполнение требований к ее ремонтопригодности. Восстановительный ремонт изношенных рабочих поверхностей торцевых зубьев большого (ведомого) колеса передачи не вызывает значительных трудностей (основная операция в этом случае – шлифовка), в то время как восстановление с помощью той же операции (другие практически невозможны) изношенной рабочей поверхности (профилированной по параметрам «улитки Паскаля») зубьев малого колеса затруднено, как и при изготовлении, отсутствием унифицированных средств, способных обеспечить соблюдение рабочего профиля при шлифовке.

Предложенная конструкция торцевой зубчатой передачи с внутренним зацеплением решает задачу упрощения и унификации технологического процесса изготовления рабочих звеньев передачи в широком диапазоне их типоразмеров и передаточных отношений, реализуемых передачей. При этом обеспечивается повышение надежности, ремонтопригодности, долговечности передачи.

В предлагаемой передаче эта задача решается тем, что рабочая поверхность зубьев шестерни (малого колеса), выполненных в виде выступов на торцевой поверхности ее венца, представляет собой боковую поверхность тела вращения, например, усеченного конуса (цилиндра, бочкообразного тела): в сечениях зуба, перпендикулярных оси вращения шестерни, эта рабочая поверхность ограничена окружностью. Сопрягающаяся с зубом шестерни рабочая поверхность зуба ведомого колеса, выполненного в виде выступа на торцевой поверхности венца колеса, имеет плоский профиль. При этом соблюдение необходимого требования к зацеплению, заключающегося в том, что общая нормаль к сопряженным поверхностям должна проходить через полюс зацепления, обеспечивается тем, что линия зацепления имеет форму участка внутренней петли «улитки Паскаля».

На рисунке 1 представлена кинематическая схема предлагаемой передачи, где 1 и 2 – зубья шестерни и колеса. Рекомендуемое минимальное число зубьев шестерни – 6 (при передаточном отношении передачи, равном 3, коэффициент перекрытия принимает значение 1,3).

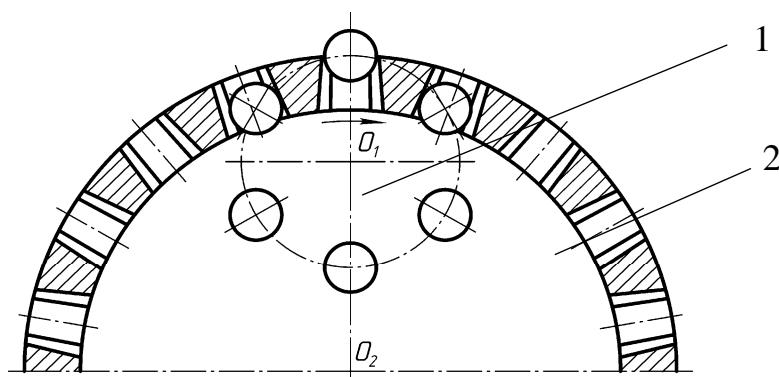


Рисунок 1 – Кинематическая схема торцевой зубчатой передачи

Если зуб шестерни имеет форму усеченного конуса или цилиндра, взаимодействие с зубом колеса осуществляется в линейном контакте. При бочкообразном зубе шестерни контакт с зубом колеса точечный.

Результаты геометрических построений и модельных исследований свидетельствуют о

Информационные технологии, автоматика, связь, телекоммуникации

том, что в торцевой зубчатой передаче с внутренним зацеплением [3] при постоянном передаточном отношении для зубьев шестерни, имеющих форму тел вращения (усеченного конуса, цилиндра, бочкообразного тела), сопряженным профилем зуба колеса предлагаемой передачи служит плоскость.

Техническим результатом предложенного решения является существенное упрощение технологии и снижение стоимости производства высоконадежной и ремонтопригодной механической передачи, применение которой возможно в широком диапазоне нагрузок и передаточных отношений. Перечень технологических операций при изготовлении и восстановительном ремонте ограничен наиболее обеспеченными оснасткой и станочным оборудованием: сверление, токарная обработка, плоское фрезерование, шлифовка.

Простота конструктивной схемы порождает многовариантность ее практической реализации, дает конструктору возможность поиска наивыгоднейшего решения, обеспечивающего создание условий для равномерного износа рабочих поверхностей элементов зацепления. Для зубьев шестерни это может быть достигнуто, например, следующим простым приемом: способ монтажа зуба шестерни на ее венце может быть выбран таким, чтобы обеспечивалась возможность менять его положение поворотом относительно собственной оси симметрии при регламентном обслуживании, согласованном с интенсивностью износа рабочей поверхности.

В развитие идеи обеспечения возможности равномерного распределения износа рабочих поверхностей в непрерывном процессе работы передачи (без остановок на регламентное обслуживание) предложено техническое решение, согласно которому зуб шестерни фактически становится «третьим телом» – промежуточным звеном между венцом шестерни и колесом [5].

Это достигается тем, что конструкционная посадка для размещения ножки зуба шестерни в гнезде ее венца назначается такая, что момент трения скольжения в кинематической паре «зуб шестерни – зуб колеса» незначительно (до 5 %) превосходит противоположный ему момент трения покоя в кинематической паре «ножка зуба шестерни – гнездо в ее венце». В этом случае при работе передачи обеспечено качение без скольжения в относительном движении зуба шестерни и зуба колеса, при котором выполняется условие равномерного распределения интенсивности износа их рабочих поверхностей.

Как вариант, для снижения коэффициента трения в кинематической паре «ножка зуба шестерни – гнездо в ее венце» между боковой (рабочей) поверхностью ножки зуба и поверхностью гнезда может размещаться промежуточный слой металла (например, меди или свинца), собственная пластичность которого превосходит пластичность материала зуба шестерни и ее венца. Создание этого слоя, выполняющего роль твердой «смазки», на боковой поверхности ножки зуба выполняется, например, путем плазменного напыления или гальванпокрытием. Твердая «смазка» может быть нанесена путем внедрения в рабочую поверхность ножки зуба шестерни материала (например, графита), повышающего антифрикционные свойства в зоне контакта.

При реализации технического решения [5] обеспечивается возможность использования в процессе работы полного кругового профиля зуба шестерни в качестве рабочей поверхности, что повышает работоспособность передачи. Кроме того, повышением роли трения сцепления в паре «зуб шестерни – зуб колеса» снимается необходимость надежного обеспечения зоны их взаимодействия смазкой. Нет сомнений, что практическая реализация этих технических решений относится к области нанотехнологий.

Технические решения [3, 5], предлагающие альтернативную схему механической передачи, привлекаются для решения задачи повышения эксплуатационных качеств тягового привода железнодорожного подвижного транспортного средства.

В поиске эффективных мер по повышению этих качеств родилось техническое решение «Компоновочная схема тягового привода железнодорожного подвижного транспортного средства с параллельными потоками мощности» [5], согласно которому эта задача решается

тем, что механическая передача вращательного движения от вала двигателя к оси колесной пары выполнена в виде параллельных ступеней торцевой зубчатой передачи с внутренним зацеплением при общем ведомом зубчатом колесе, содержащей количество шестерней, равное числу ступеней передачи, с возможностью создания параллельных потоков мощности тяговых двигателей, оси роторов которых расположены на дуге окружности, концентричной оси колесной пары; при этом количество тяговых двигателей равно числу ступеней передачи, а их суммарная мощность соответствует мощности, потребной для осуществления движения транспортного средства с заданными параметрами.

Предлагаемая компоновочная схема может быть выполнена в двух вариантах: с опорно-осевым (рисунок 2) и опорно-рамным (рисунок 3) подвешиванием пакета тяговых двигателей. Выбор схемы для практической реализации определяется требованиями, предъявляемыми к назначению транспортного средства. При этом в случае применения схемы с опорно-осевым подвешиванием опасность разрушения двигателя и оси колесной пары значительно уменьшена по сравнению с известными промышленными аналогами [2] за счет уравновешивания в передаточных ступенях, и без того малых (обусловленных особенностями конструкции передачи), радиальных составляющих усилий давления в паре «зуб шестерни – зуб колеса». В случае применения схемы с опорно-рамным подвешиванием используется способность конструкции передачи допускать радиальные перемещения шестерни относительно колеса в процессе работы. Для пакета тяговых двигателей в этом случае применяются известные [7] приемы синхронизации в механических колебательных системах путем включения в конструкцию пакета тяговых двигателей механизма синхронизации перемещений двигателей в радиальном направлении относительно оси колесной пары. Значения кинематических характеристик перемещений определяются жесткостью системы подвешивания.

В качестве иллюстрации на рисунке 2, представлена компоновочная схема тягового привода с опорно-осевым, на рисунке 3 – с опорно-рамным подвешиванием пакета тяговых двигателей. Обозначения на схемах: 1 – ось колесной пары; 2 – ступица пакета тяговых двигателей; 3 – тяговый двигатель; 4 – шестерня зубчатого зацепления; 5 – зубчатое колесо; 6 – подшипники скольжения; 7 – опорная рама тележки; 8 – букса; 9 – механизм синхронизации перемещений тяговых двигателей в радиальном направлении относительно оси колесной пары.

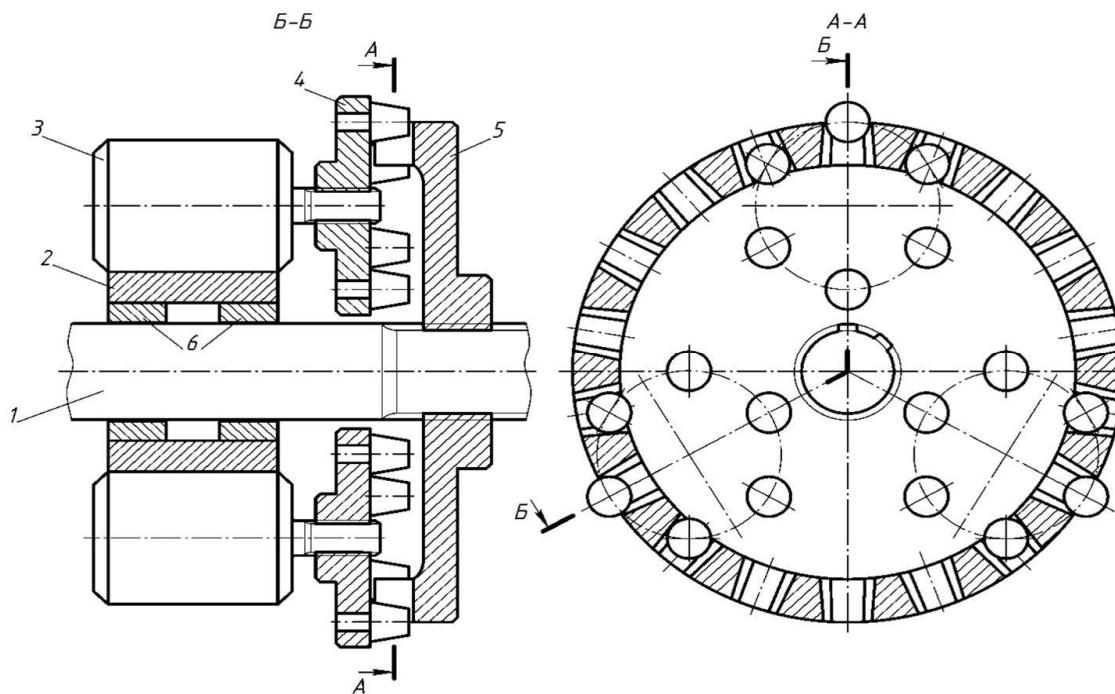


Рисунок 2 – Компоновочная схема тягового привода с опорно-осевым подвешиванием пакета тяговых двигателей

Информационные технологии, автоматика, связь, телекоммуникации

Ожидаемый технический результат реализации предлагаемой компоновочной схемы заключается в: решении проблемы стесненных габаритов электропривода; повышении уровня технологичности при изготовлении и обслуживании элементов механизма тягового привода; повышении надежности работы системы тяги при параллельной работе электродвигателей; расширении возможностей использования асинхронных электродвигателей.

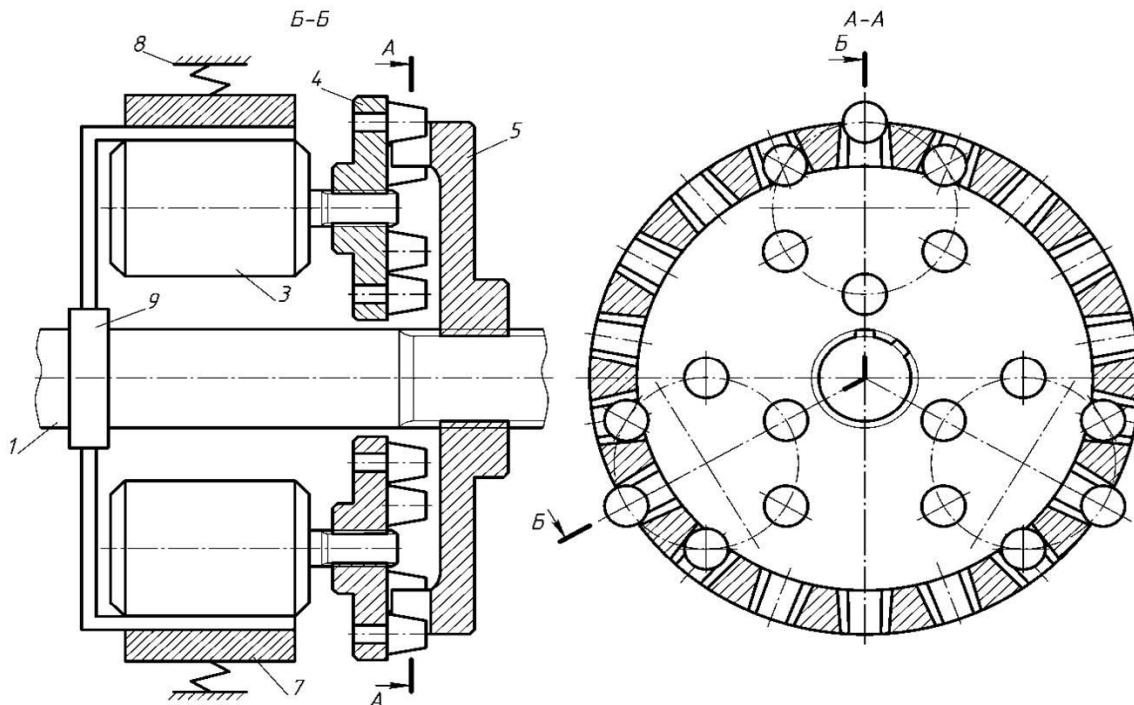


Рисунок 3 – Компоновочная схема тягового привода с опорно-рамным подвешиванием пакета тяговых двигателей

Список литературы

1. Ключев, В. И. Теория электропривода [Текст] / В. И. Ключев. – М.: Энергоиздат, 1985. – 560 с.
2. Механическая часть тягового подвижного состава [Текст] / И. В. Бирюков, А. Н. Савосыкин и др. – М.: Транспорт, 1992. – С. 282 – 296.
3. Пат. 2354870 Российская Федерация, МПК⁷ F16H 1/10. Торцевая зубчатая передача с внутренним зацеплением [Текст] / Тупицын А. А., Каргапольцев С. К., Милованов А. И., Тупицын А. А., Ревенский А. А; заявитель и патентообладатель Иркутский гос. ун-т путей сообщения – № 2007144586/11; заявл.04.12.2007; опубл.10.05.2009, Бюл. № 13. – 7 с.: ил.
4. Торцовые зубчатые передачи и механизмы, построенные на их базе [Текст] / А. И. Нечаев, Е. Г. Синенко, П. Н. Сильченко // Наука – производству. – 2000. – № 3 (28). – С. 47 – 50.
5. Пат. 77374 Российской Федерации, МПК F16H 1/00. Шестерня для торцевой зубчатой передачи с внутренним зацеплением [Текст] / Тупицын А. А., Милованов А. И., Ревенский А. А; заявитель и патентообладатель Иркутский гос. ун-т путей сообщения – № 2008115572/22; заявл.21.04.2008; опубл.20.10.2008, Бюл. № 29. – 1 с.: ил.
6. Пат. 2412072 Российской Федерации, МПК B61 C 9/00. Компоновочная схема тягового привода железнодорожного подвижного транспортного средства с параллельными потоками мощности [Текст] / Милованова Е. А., Милованов А. А., Милованов А. И., Тупицын А. А., Тупицын А.А; заявитель и патентообладатель Иркутский гос. ун-т путей сообщения – № 2009124142; заявл.24.06.2009; опубл.20.02.2011, Бюл. № 5. – 4 с.: ил.
7. Левитский, Н. И. Колебания в механизмах [Текст] / Н. И. Левитский. – М.: Наука, 1988. – 336 с.

Информационные технологии, автоматика, связь, телекоммуникации

УДК 62-83 (075.8): 621.313.333: 629.423.32

М. Ю. Пустоветов

О ПРЯМОМ ПУСКЕ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С ДВУХСТУПЕНЧАТОЙ КОМПЕНСАЦИЕЙ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ В СОСТАВЕ ВСПОМОГАТЕЛЬНОГО ПРИВОДА ЭЛЕКТРОВОЗА

Вспомогательный электропривод электровозов часто строится на базе трехфазных асинхронных двигателей. В ряде схем асинхронного вспомогательного привода практикуется прямой пуск двигателей, чему сопутствуют значительные пусковые токи. Это предъявляет повышенные требования к установленной мощности питающего преобразователя. Рассмотрен способ снижения пусковых и рабочих токов за счет использования трехфазных конденсаторных батарей. Приведены результаты компьютерного моделирования.

Схема питания трехфазных асинхронных двигателей (АД) вспомогательных нужд электровоза от электромеханических фазорасщепителей предусматривает прямой пуск как мотор-вентиляторов, так и мотор-компрессоров (МК) [1].

Современная идеология построения статических преобразователей собственных нужд (СПСН) электровозов предусматривает наличие нескольких параллельно работающих каналов СПСН [2]. Основой СПСН является преобразователь частоты на базе автономного инвертора напряжения (АИН). Одной из причин многоканальности СПСН является наличие различных по характеру нагрузок на борту электровоза. Например, частотное регулирование частоты вращения АД вентиляторов в зависимости от перегрева или тока тяговых электродвигателей дает значительную экономию электроэнергии [3]. МК работает с постоянной частотой вращения, имеет значительный пусковой момент (особенно если компрессор поршневой [1]). Для упрощения системы управления СПСН и сокращения числа каналов силовой части (всего два канала: регулируемый и нерегулируемый) допустимо подключение МК к нерегулируемому каналу с фиксированной выходной частотой и величиной напряжения, т. е. прямой пуск МК.

Прямой пуск АД сопряжен со значительными пусковыми токами, кратно превышающими номинальное значение. Пусковые токи потребляются от фазорасщепителя или от СПСН. Установленная мощность этих устройств должна позволять выдерживать пуски АД, в том числе затяжные (при пониженном напряжении в контактной сети, при низкой температуре окружающей среды). Ток АД, особенно при пуске, содержит значительную реактивную (индуктивную) составляющую, компенсация которой позволила бы облегчить условия работы питающего преобразователя, уменьшить его установленную мощность.

Одним из относительно простых способов компенсации реактивной составляющей тока АД является установка в схеме питания трехфазных конденсаторных батарей. Величина реактивной мощности, подлежащая компенсации, различна в пусковом и номинальном режимах, поэтому следует применять либо компенсацию только в режиме пуска, либо двухступенчатую компенсацию, меняя величину подключенной емкости в зависимости от режима работы.

Пусть АД, приводящий во вращение МК, получает питание от нерегулируемого канала СПСН, принципиальная схема силовой части которого изображена на рисунке 1.

В состав СПСН входят двухуровневый АИН с жесткой коммутацией, синус-фильтр, трехфазный трансформатор. К вторичной обмотке трансформатора подключен АД и параллельно последнему – две трехфазные батареи конденсаторов, которые обеспечивают процесс прямого пуска АД с двумя ступенями компенсации реактивной мощности. В нашем случае конденсаторы синус-фильтра емкостью 450 мкФ на фазу соединены по схеме «звезда», индуктивности синус-фильтра составляют 2 мГн на фазу, обмотки трансформатора имеют схему соединения Δ/Y (для возможности подключения однофазных потребителей на вторичной обмотке выведена нейтраль), конденсаторы в каждой трехфазной батарее соединены по схеме «звезда». В дальнейшем расчете и при компьютерном моделировании использованы па-

Информационные технологии, автоматика, связь, телекоммуникации

раметры АД типа НВА-55, характеристики которого для номинального режима представлены в таблице.

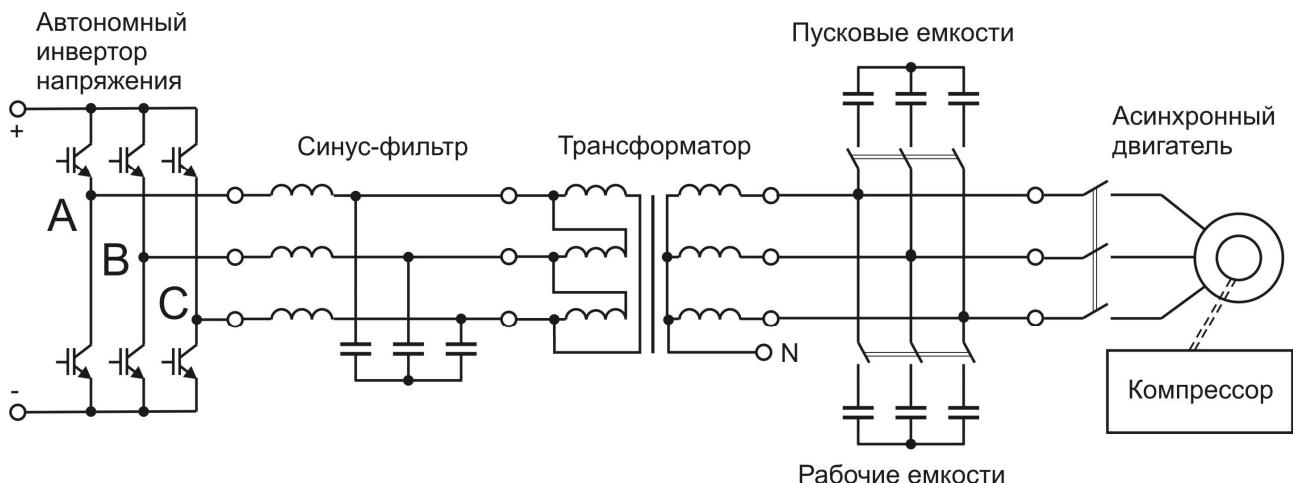


Рисунок 1 – Принципиальная схема силовой части нерегулируемого канала СПСН

Емкость фазы конденсаторной батареи рабочей ступени рассчитывается по формуле [4]:

$$C_{\phi \text{ раб}} = \frac{P_{\phi \text{ ном}}}{2 f U_{\phi \text{ ном}}^2} (\operatorname{tg} \varphi_{\text{исх}} - \operatorname{tg} \varphi_{\text{жел}}), \quad (1)$$

где $\operatorname{tg} \varphi_{\text{исх}} = 0,75$ – исходное значение коэффициента реактивной мощности (соответствует значению коэффициента мощности $\cos \varphi = 0,8$);

$\operatorname{tg} \varphi_{\text{жел}} = 0$ – желаемое значение коэффициента реактивной мощности (соответствует значению коэффициента мощности $\cos \varphi = 1,0$);

$P_{\phi \text{ ном}} = 21000 \text{ Вт}$ – принятое значение номинальной активной мощности, потребляемой одной фазой АД НВА-55 в номинальном режиме;

$U_{\phi \text{ ном}} = 220 \text{ В}$ – действующее значение номинального фазного напряжения;

$f = 50 \text{ Гц}$ – частота первой гармоники питающего напряжения.

$$C_{\phi \text{ раб}} = \frac{21000}{2 \cdot 50 \cdot 220^2} (0,75 - 0) = 0,001 \Phi = 1000 \text{ мкФ}.$$

Сравнение расчетных и опытных характеристик номинального режима работы АД НВА-55

$U_{\phi}, \text{ В}$	$I_{\phi}, \text{ А}$	$P_1, \text{ кВт}$	$P_2, \text{ кВт}$	$p_{M1}, \text{ Вт}$	$p_{M2}, \text{ Вт}$	$P_{cr}, \text{ Вт}$	КПД, %	$\cos \varphi, \text{ о.е.}$	$n_2, \text{ об/мин}$	$M, \text{ Нм}$
Линейное напряжение	Ток фазы статора	Активная потребляемая мощность	Мощность на валу	Потери в меди статора	Потери в меди ротора	Потери в стали	Коэффициент полезного действия	Коэффициент мощности	Частота вращения ротора	Момент на валу
Согласно протоколу испытаний ОАО «ВЭлНИИ», г. Новочеркасск										
379	116	62,2	55,8	1930	2310	1600	89,7	0,817	1441,5	369,8
Согласно расчету (моделированию) в САПР OrCAD 9.2										
380	113	58,9	55,0	1635	2229	1531	93,4	0,792	1442,4	364,4

Выражение (1) может быть записано иначе:

$$C_{\phi \text{ раб}} = \frac{1}{2 f U_{\phi \text{ ном}}^2} (Q_{\phi \text{ ном исх}} - Q_{\phi \text{ ном жел}}), \quad (2)$$

Информационные технологии, автоматика, связь, телекоммуникации

где $Q_{\phi \text{ ном исх}}$ и $Q_{\phi \text{ ном жел}}$ – исходное и желаемое значения реактивной мощности.

При соединении компенсирующих конденсаторов по схеме «треугольник» формула (1) записывается так:

$$C_{\phi \text{ раб}} = \frac{P_{\phi \text{ ном}}}{2 f U_{\text{л ном}}^2} (\operatorname{tg} \varphi_{\text{исх}} - \operatorname{tg} \varphi_{\text{жел}}), \quad (3)$$

где $U_{\text{л ном}}$ – действующее значение номинального линейного напряжения.

Значение фазных емкостей пусковой ступени выбирается по критерию минимизации тока фазы вторичной обмотки трансформатора в процессе пуска АД и составило в нашем случае 7000 мкФ на фазу. Обратным счетом по формуле (2) можно подсчитать, что при включении обеих ступеней емкостного компенсатора (по 8000 мкФ на фазу) компенсируемая реактивная мощность фазы составляет около 122 кВАр. Момент времени отключения пусковой батареи конденсаторов выбирается так, чтобы ток в фазе вторичной обмотки трансформатора был меньше тока фазы АД в течение всего времени пуска.

В САПР *OrCAD 9.2* [5] была составлена компьютерная модель, имитирующая работу схемы, представленной на рисунке 1. Вопросы синтеза компонентов модели подробно освещены в работах [6 – 8]. Математические модели трехфазных АД и трансформатора выведены на основе математической модели обобщенной электрической машины в трехфазных заторможенных координатах [9]. Результаты моделирования прямого пуска АД НВА-55, приводящего во вращение поршневой компрессор двойного сжатия, с двухступенчатой компенсацией реактивной мощности показаны на рисунках 2 – 5. На рисунке 2 показан процесс разгона АД.

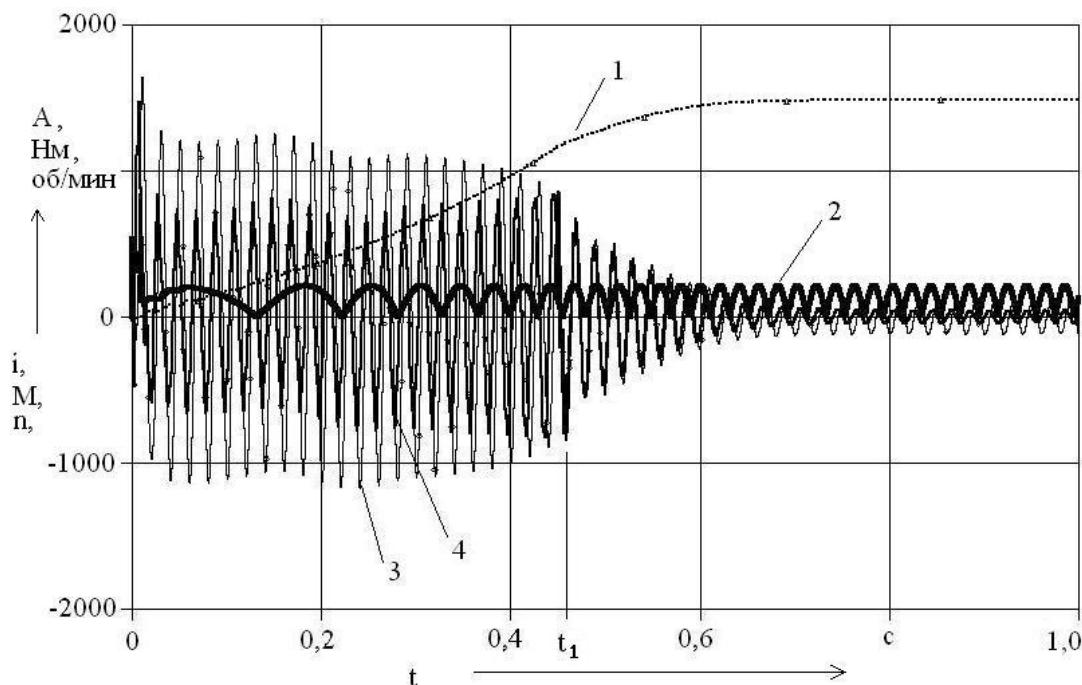


Рисунок 2 – Процесс разгона АД: t_1 – момент времени отключения пусковой ступени емкости

Начало процесса разгона представлено на рисунке 3.

На рисунках 2, 3 графики имеют следующую нумерацию: 1 – частота вращения ротора АД; 2 – момент нагрузки на валу АД; 3 – ток фазы статора АД; 4 – ток фазы вторичной обмотки трансформатора; 5 – напряжение фазы АД.

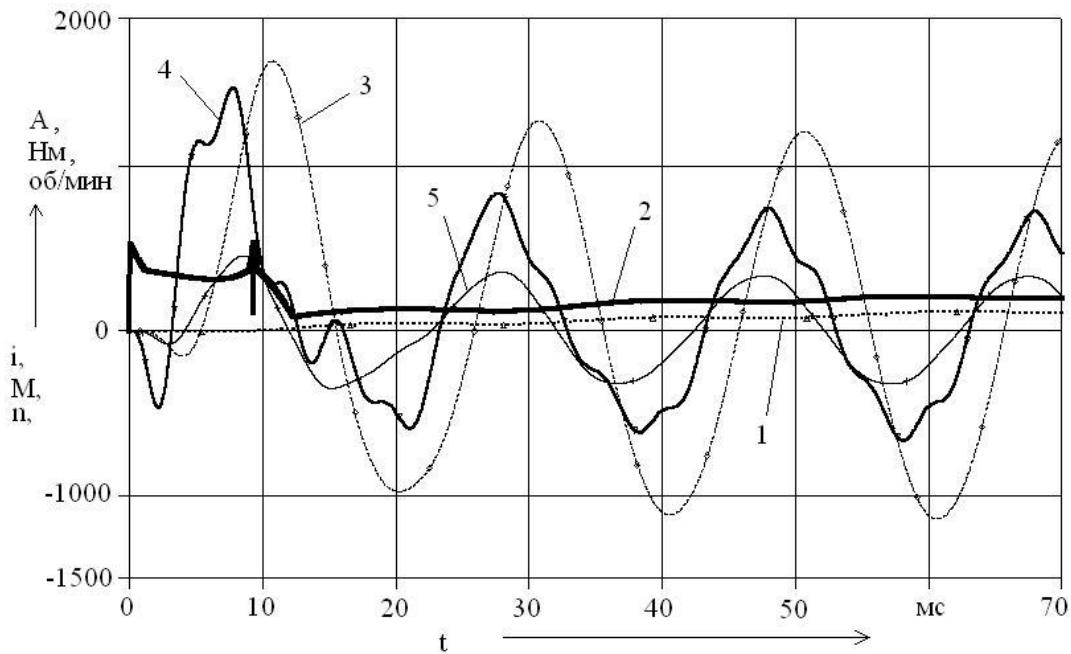


Рисунок 3 – Начальный участок процесса разгона АД

Установившийся режим по окончании процесса пуска показан на рисунке 4, сопутствующие графики линейных напряжений на синус-фильтре приведены на рисунке 5.

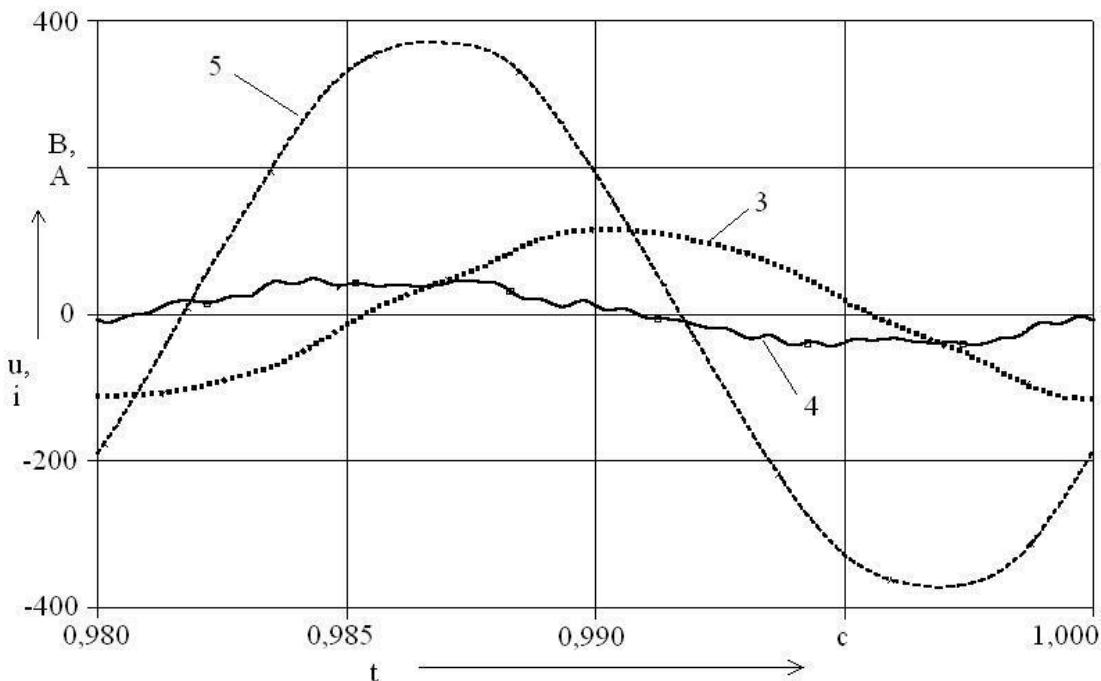


Рисунок 4 – Установившийся режим АД по окончании процесса пуска

Результаты компьютерного моделирования свидетельствуют об эффективности использования емкостной компенсации реактивной мощности при прямом пуске и в установившемся режиме работы асинхронного двигателя, в том числе если он питается напряжением от СПСН электровоза. В установившемся режиме первая гармоника тока вторичной обмотки трансформатора составляет около 38 % от первой гармоники тока АД, в ходе разгона АД эта доля составляет примерно 65 – 70 %.

Отметим, что в нашем вычислительном эксперименте в установившемся режиме АД наиболее выраженная 5-я временная гармоника тока вторичной обмотки трансформатора составляет 10 % от первой, в спектре тока фазы АД 5-я гармоника равна 4 % от первой. В этой

Информационные технологии, автоматика, связь, телекоммуникации

связи нужно иметь в виду, что на гармонический состав токов и напряжений рассматриваемого вспомогательного электропривода значительное влияние оказывают параметры синус-фильтра.

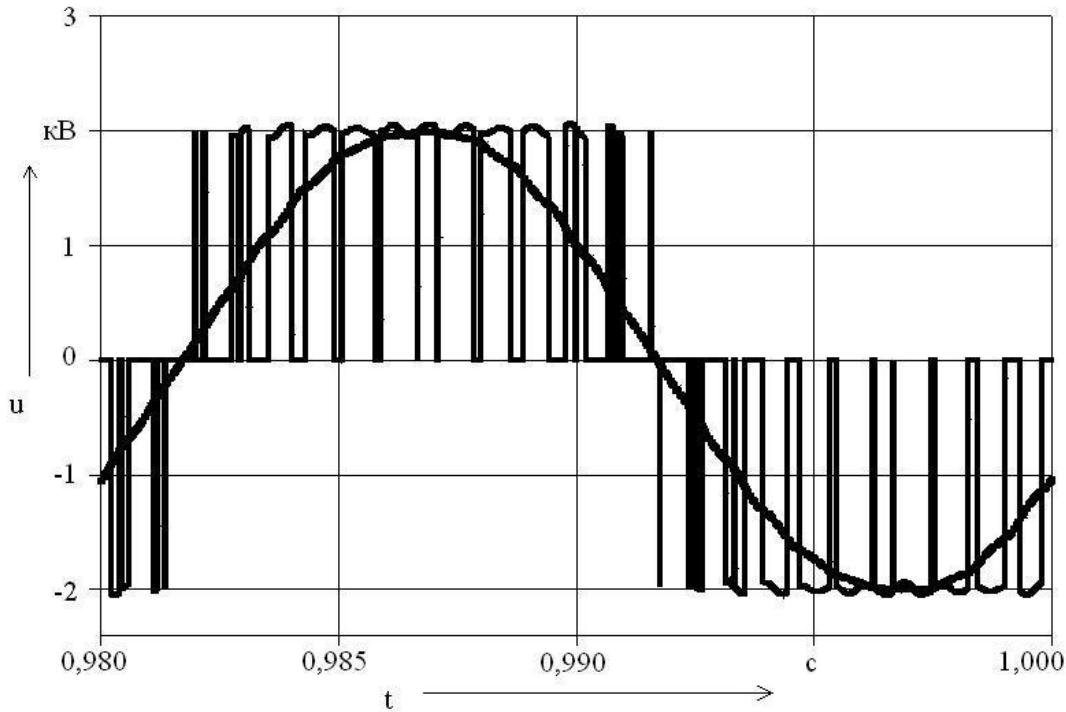


Рисунок 5 – Линейное напряжение на входе (импульсы) и на выходе (синусоида) синус-фильтра

Например, уменьшение индуктивности синус-фильтра до 0,85 мГн на фазу было вполне допустимо при отсутствии в схеме конденсаторных батарей компенсации реактивной мощности, но при их наличии возникают значительные искажения формы кривых токов и напряжений. Так, в установившемся режиме АД 5-я гармоника тока вторичной обмотки трансформатора составит уже 147 % от первой, для тока фазы АД аналогичное соотношение составит 60 %.

Из рисунка 5 видно, что ток вторичной обмотки трансформатора имеет несколько опережающий по отношению к напряжению фазы АД фазовый сдвиг. Имеет место перекомпенсация реактивной мощности АД, емкость рабочей ступени конденсаторов несколько завышена. Это произошло потому, что мощность МК ниже номинальной мощности НВА-55, в то время как расчет емкости рабочей ступени конденсаторов произведен для номинального режима.

Список литературы

1. Захарченко, Д. Д. Тяговые электрические машины и трансформаторы: Учебник [Текст] / Д. Д. Захарченко, Н. А. Ротанов, Е. В. Горчаков. – М.: Транспорт, 1979. – 303 с.
2. Хоменко, Б. И. Вспомогательные транзисторные преобразователи для перспективного ЭПС [Текст] / Б. И. Хоменко, Г. И. Колпахчян, И. В. Пехотский // Электровозостроение: Сб. науч. тр. / Всеросс. науч.-исследовательский и проектно-конструкторский инс-т электровозостроения, Новочеркасск. – 2003. – Т. 45. – С. 184 – 191.
3. Рутштейн, А. М. Регулируемый вспомогательный электропривод электровоза ЭП1 [Текст] / А.М. Рутштейн // Электровозостроение: Сб. науч. тр. / Всеросс. науч.-исследовательский и проектно-конструкторский инс-т электровозостроения, Новочеркасск. – 1998. – Т.40. – С. 213 – 221.
4. Сибикин, Ю. Д. Электроснабжение промышленных предприятий и установок: Учебник [Текст] / Ю. Д. Сибикин, М. Ю. Сибикин, В. А. Яшков. – М.: Высшая школа, 2001. – 336 с.
5. Болотовский, Ю. И. OrCAD. Моделирование. «Поваренная» книга [Текст] / Ю. И. Болотовский, Г. И. Таназлы. – М.: Солон-Пресс, 2005. – 200 с.

6. Пехотский, И. В. Моделирование электромагнитных процессов в трансформаторах [Текст] / И. В. Пехотский, М. Ю. Пустоветов, С. Ю. Пустоветова // Вестник ВЭлНИИ / ВЭлНИИ. – Новочеркасск, 2004. – № 2. – С. 78 – 85.
7. Пустоветов, М. Ю. Расчет параметров синус-фильтра при несущих частотах ШИМ 900-1000 Гц [Текст] / М. Ю. Пустоветов, И. В. Синявский // Новые технологии, конструкции и процессы производства: Сб. науч. тр. / Ростовская гос. акад. с.-х. машиностроения. – Ростов-на-Дону, 2009. – С. 134.
8. Модель асинхронного электропривода, выполненная в системе *OrCAD 9.2* [Текст] / М. Ю. Пустоветов, И. В. Пехотский и др.// Оптимизация режимов работы систем электроприводов: Межвуз. сб. науч. тр. / Красноярский гос. техн. ун-т. – Красноярск, 2002. – С. 42 – 51.
9. Копылов, И. П. Математическое моделирование электрических машин: Учебник [Текст] / И. П. Копылов. – М.: Высшая школа, 1994. – 318 с.

УДК 621.331:621.311

М. М. Соколов

КОНТРОЛЬ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ЛИНИИ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ УСТРОЙСТВ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЙ АВТОМАТИКИ

В статье рассматриваются вопросы контроля состояния проводов линии электроснабжения устройств железнодорожной автоматики. Предложена методика определения поврежденного провода и места обрыва с использованием математического аппарата алгебры логики.

Для безопасного и бесперебойного движения поездов необходимо качественное и непрерывное электроснабжение всех систем железнодорожного транспорта, в том числе и объектов железнодорожной автоматики (ЖА) [1, 2].

Требования к качеству электроснабжения регламентируются отраслевыми стандартами ОАО «РЖД» [2 – 4]. Устройства ЖА, расположенные на перегоне, как потребители электрической энергии имеют свои специфические особенности [4, 5].

электроприемники являются потребителями первой категории;

электрическая энергия к потребителям поступает от воздушной трехфазной линии – ВЛ СЦБ или линии продольного электроснабжения, которые подвержены влиянию различных климатических факторов (перепады температур, ветер, гололедные образования, атмосферные перенапряжения), а также механическому воздействию, что приводит к возникновению различных повреждений;

электроприемники являются однофазной нагрузкой и распределены по всей длине линии.

Важным мероприятием, обеспечивающим надежную и бесперебойную работу устройств ЖА, является быстрое восстановление элементов электроснабжения при повреждении.

Время восстановления работы системы электроснабжения определяется временем поиска места отказа и временем его непосредственного устранения. В случае с ВЛ СЦБ время поиска повреждения может оказаться значительным вследствие большой ее протяженности. Согласно статистическим данным ОАО «РЖД» 18,5% отказов в электроснабжении устройств СЦБ приходится на повреждения проводов.

Современные системы защиты и диагностики ВЛ СЦБ могут определять следующие типы отказов: однофазное заземление на землю (ОЗЗ), двухфазные короткие замыкания, в том числе двойные замыкания на землю, и трехфазные короткие замыкания, в то время как средств диагностирования однофазного обрыва (ОО) не существует. К случаю ОО следует

Информационные технологии, автоматика, связь, телекоммуникации

относить и случаи ОЗЗ с большим переходным сопротивлением «провод – земля», которое может достигать 5 кОм [6].

С целью оценки изменения параметров питающих напряжений (действующего значения напряжения и сдвига фаз) в системе электроснабжения устройств ЖА при повреждении ВЛ СЦБ составлена имитационная модель. Моделирование проведено в среде MATLAB. Упрощенная структурная схема модели ВЛ СЦБ приведена на рисунке 1.

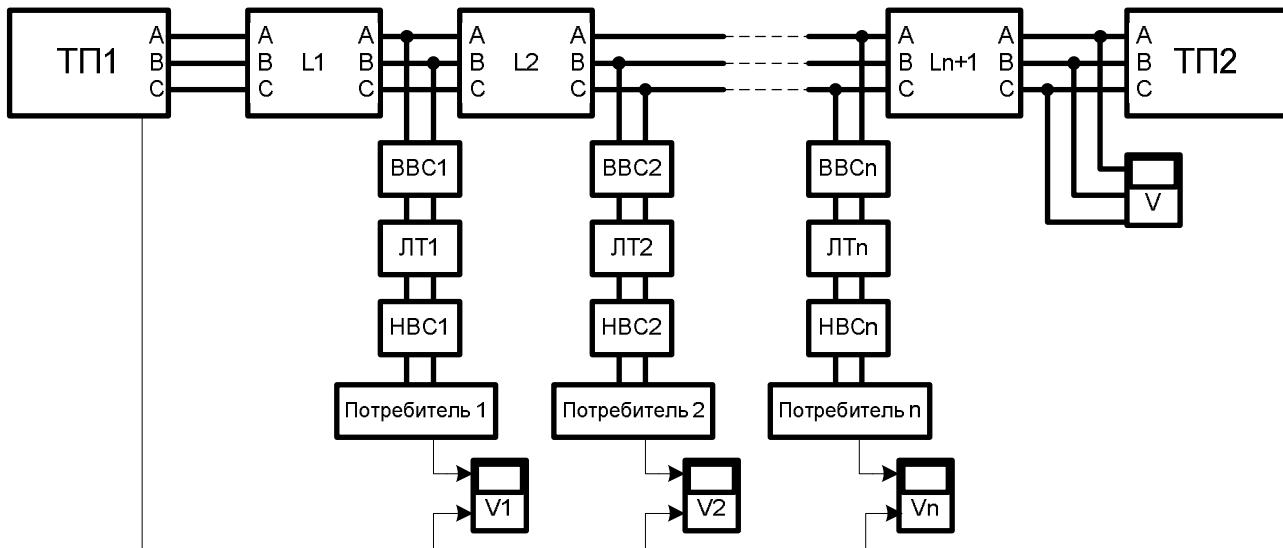


Рисунок 1 – Структурная схема ВЛ СЦБ

В представленной модели учтены параметры воздушной линии (L_n); тип используемого однофазного трансформатора (LT_n); параметры проводов высоковольтного (VBC_n) и низковольтного (NBC_n) спуска; распределение нагрузки по фазам ВЛ СЦБ с учетом транспозиции; возможный обрыв провода какой-либо фазы на различных участках.

В модели принимается, что для электроснабжения используются односторонняя (консольная) схема питания линий от тяговой подстанции ТП1.

При составлении имитационной модели за основу были приняты данные о расположении и составе потребителей на участке перегона, приведенного на рисунке 2. При моделировании линия электропередач разделена на участки (L_1 – L_9). В качестве границ этих участков приняты точки подключения потребителей к линии.

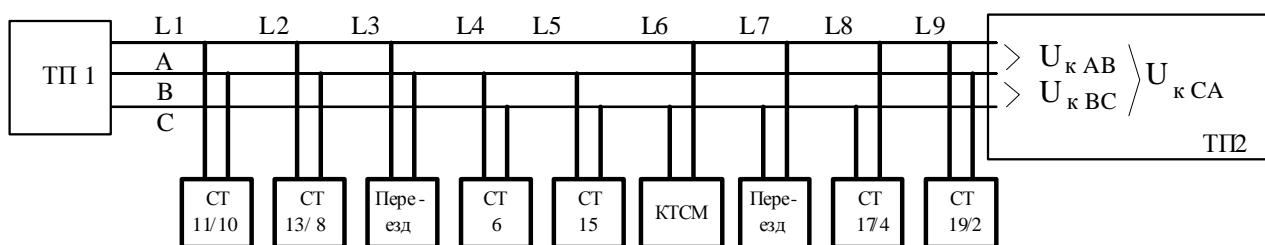


Рисунок 2 – Схема подключения нагрузок к ВЛ СЦБ

При работе с моделью проведены однотипные численные эксперименты. На выбранном участке линии электропередач вносились повреждения, представляющие собой обрыв провода фазы, после чего определялось напряжение на вторичной обмотке линейного трансформатора для каждого потребителя и в конце линии (на ТП2). Такие численные эксперименты проводились для всех возможных сочетаний участка обрыва и поврежденной фазы.

Результаты, полученные в процессе моделирования для обрыва фазы С, сведены в таблицу 1.

Информационные технологии, автоматика, связь, телекоммуникации

Таблица 1 – Напряжение в различных точках ВЛ СЦБ при повреждениях

		Напряжение										на входе ТП2		
		на вторичной обмотке ОМ потребителя								на входе ТП2				
поврежденная фаза	участок повреждения	СТ 11/10 (AB)	СТ 13/8 (AB)	переезд (AB)	СТ 6 (BC)	СТ 15 (BC)	пост КТСМ (CA)	переезд (CA)	СТ 17/4 (CA)	СТ 19/2 (AB)	AB	BC	CA	
Напряжение при повреждении, В	норм. режим	215	216	222	216	216	222	222	215	216	10007	10028	9979	
	L1	216	216	222	172	172	67	67	67	216	10000	7780	3040	
	L2	216	216	222	172	172	67	67	67	216	10000	7780	3040	
	L3	216	216	222	170	170	65	65	65	216	10000	8972	1472	
	L4	216	216	222	190	150	56	56	55	216	10000	8130	2545	
	L5	216	216	222	218	202	57	57	55	216	10040	9333	2581	
	L6	216	216	222	218	218	65	63	63	216	10040	10005	2828	
	L7	216	216	222	217	217	223	88	87	216	9750	10005	3450	
	L8	216	216	222	217	217	223	223	122	216	10000	6800	5650	
	L9	216	216	222	217	217	223	223	216	216	10000	5162	5126	

Каждая строка таблицы 1 содержит результаты одного численного эксперимента, при этом клетка, выделенная цветом, содержит значение напряжения на входе потребителя, расположенного сразу после места повреждения.

Введем понятие числового логического коэффициента соответствия по напряжению (ЧЛКСН). ЧЛКСН ($N_{U_{AB}}$, $N_{U_{BC}}$, $N_{U_{CA}}$) – коэффициент, который в случае соответствия линейного напряжения своему нормальному значению принимает значение «единица», иначе – значение «ноль», соответственно для напряжений U_{AB} , U_{BC} и U_{CA} . «Нормальное значение» напряжения определяется исходя из данных, накопленных по результатам измерения в безаварийном режиме работы ВЛ СЦБ с учетом допустимых отклонений.

Введем понятие числового логического коэффициента целостности провода фазы (ЧЛКПФ). ЧЛКПФ (C_A , C_B , C_C) – коэффициент, который в случае отсутствия обрыва фазного провода принимает значение «единица», иначе – значение «ноль», соответственно для фаз А, В, С.

При обрыве провода какой либо фазы линейное напряжение между неповрежденными фазными проводами остается без изменений. В то же время межфазное напряжение между проводами, один из которых поврежден, изменится.

Заполним таблицу истинности для C_A , C_B , C_C :

Таблица 2 – Таблица истинности C_A , C_B , C_C

$N_{U_{k_{AB}}}$	$N_{U_{k_{BC}}}$	$N_{U_{k_{CA}}}$	Примечание	C_A	C_B	C_C
0	0	0	Нет ОО	~	~	~
0	0	1	$\overline{C_B} \cdot C_A \cdot C_C$	1	0	1
0	1	0	$\overline{C_A} \cdot C_B \cdot C_C$	0	1	1
0	1	1	$C_C \cdot (\overline{C_A} + \overline{C_B})$	~	~	1
1	0	0	$\overline{C_C} \cdot C_A \cdot C_B$	1	1	0
1	0	1	$C_A \cdot (\overline{C_B} + \overline{C_C})$	1	~	~
1	1	0	$C_B \cdot (\overline{C_A} + \overline{C_C})$	~	1	~
1	1	1	$C_A \cdot C_B \cdot C_C$	1	1	1

Запишем логические выражения ЧЛКПФ для проводов фаз (C_A , C_B , C_C) через ЧЛКСН на входе ТП2:

Информационные технологии, автоматика, связь, телекоммуникации

$$\begin{cases} C_A = \overline{N_{U_{BC}}} + N_{U_{AB}} \cdot N_{U_{CA}}; \\ C_B = \overline{N_{U_{AC}}} + N_{U_{AB}} \cdot N_{U_{BC}}; \\ C_C = \overline{N_{U_{AB}}} + N_{U_{BC}} \cdot N_{U_{CA}}. \end{cases} \quad (1)$$

Полученное выражение для C_A следует трактовать следующим образом.

В случае, если оба линейных напряжения U_{AB} и U_{CA} в конце линии соответствуют нормальному значению ($(N_{U_{AB}} = 1) \cap (N_{U_{CA}} = 1)$), провод фазы A исправен ($C_A = 1$). В случае, если хотя бы одно из линейных напряжения U_{AB} и U_{CA} в конце линии не соответствует нормальному значению ($(N_{U_{AB}} = 0) \cup (N_{U_{CA}} = 0)$) и при этом линейное напряжение U_{BC} в конце линии соответствуетциальному значению ($N_{U_{BC}} = 1$), существует вероятность ОО провода фазы A . Наличие неопределенности в данных таблицы 2 связано с тем, что при ОО одно из линейных напряжений между проводами, использующими поврежденную фазу, может измениться несущественно по отношению к своему нормальному значению. Это объясняется влиянием линейных напряжений друг на друга через высоковольтные обмотки ЛТ. Выражения для C_B и C_C трактуются аналогично.

По напряжениям на вторичных обмотках ЛТ всех потребителей, в случае ОО, возможно уточнение места повреждения ВЛ СЦБ. До места ОО напряжение на вторичных обмотках ЛТ всех потребителей, подключенных к линии, существенно меняться не будет, в то время как после места ОО на всех потребителях, использующих поврежденную фазу, будет наблюдаться изменение параметров напряжения питания.

На основании сказанного можно сформулировать следующие правила уточнения места повреждения в случае ОО:

место обрыва находится перед наименее удаленным от ТП потребителем с ЧЛКСН, равным нулю;

место обрыва находится после наиболее удаленного от ТП потребителя, использующего для питания поврежденную фазу, с ЧЛКСН, равным единице.

Однако возможны случаи, когда определение места обрыва ВЛ СЦБ затруднено. По данным таблицы 1 видно, что диагностирование повреждения фазы C на участке $L5$ по приведенным выше правилам невозможно. В случае повреждения фазы C на участке $L5$ напряжение питания на СТ 15 поступает от фаз B и A через питающее трансформаторы соседних потребителей (рисунок 3), но при этом меняется фаза питающего напряжения.

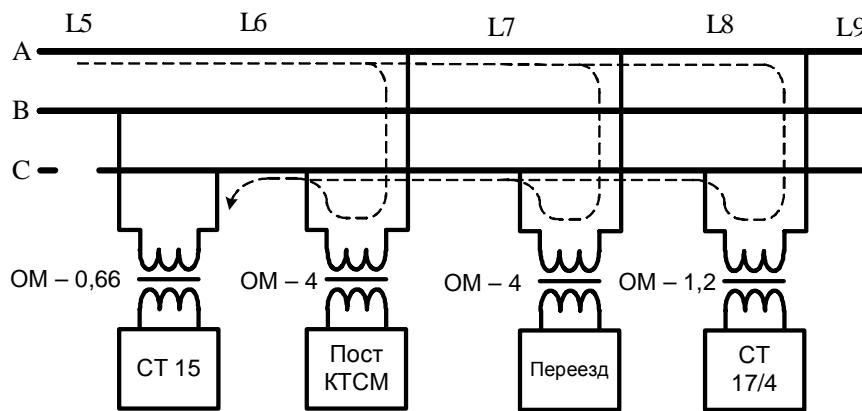


Рисунок 3 – Подпитка СТ 15 при повреждении фазы С

Кроме того, эффективность методики уточнения места обрыва в ВЛ СЦБ по значениям напряжений зависит от стабильности электроснабжения на рассматриваемом участке железной дороги.

С целью более точного и надежного определения места ОО в ВЛ СЦБ предлагается дополнительно измерять фазовый сдвиг между линейными напряжениями в конце линии, а

Информационные технологии, автоматика, связь, телекоммуникации

также на каждом потребителе сдвиг фаз между напряжением питания и контрольным сигналом.

По сдвигу фаз между напряжением на вторичной обмотке ЛТ каждого потребителя и контрольным сигналом можно определить, есть ли ОО на участке от ТП до этого потребителя (для двух фазных проводов, использующихся для питания данного ЛТ). Сдвиг фаз между контрольным сигналом и напряжением питания будет меняться на каждом потребителе, подключенным после места ОО и использующим для питания поврежденный фазный провод.

С целью проверки изменения сдвига фаз между напряжением на вторичной обмотке ЛТ каждого потребителя и линейным напряжением U_{AB} на выходе питающей ТП для всех возможных сочетаний участка обрыва и поврежденного провода, а также для определения сдвига фаз между линейными напряжениями в конце линии было проведено моделирование. Результаты моделирования обрыва провода фазы С приведены в таблице 3. В качестве контрольного сигнала использовалось линейное напряжение U_{AB} на выходе питающей ТП.

Введем понятие числового логического коэффициента соответствия по фазе (ЧЛКСФ). ЧЛКСФ ($N_{\varphi_{AB}}$, $N_{\varphi_{BC}}$, $N_{\varphi_{CA}}$) – коэффициент, который в случае соответствия сдвига фаз между напряжением питания и контрольным сигналом своему нормальному значению, принимает значение «единица», иначе – значение «ноль», соответственно для фаз напряжений U_{AB} , U_{BC} , U_{CA} «нормальное значение» сдвига фаз определяется исходя из данных, накопленных по результатам измерения в безаварийном режиме с учетом допустимых отклонений.

При обрыве провода какой-либо фазы фазовый сдвиг между напряжениями неповрежденных фазных проводов остается без изменений. В то же время фазовый сдвиг напряжений между проводами, один из которых поврежден, изменится.

Таблица 3 – Сдвиг фаз в различных точках ВЛ СЦБ при повреждении

		Напряжение												
		на вторичной обмотке ОМ потребителя										на входе ТП2		
поврежденная фаза	участок повреждения	СТ 11/10 (AB)	СТ 13/8 (AB)	переезд (AB)	СТ 6 (BC)	СТ 15 (BC)	пост КТСМ (CA)	переезд (CA)	СТ 17/4 (CA)	СТ 19/2 (AB)	AB	BC	CA	
Напряжение при повреждении, В	норм. режим	0	0	0	120	120	-120	-120	-120	0	0	120	-120	
	L1	0	0	0	167	167	-106	-103	-103	0	0	164	-104	
	L2	0	0	0	164	164	-106	-103	-103	0	0	166	-104	
	L3	0	0	0	164	164	-106	-103	-103	0	0	166	-104	
	L4	0	0	0	167	167	-112	-110	-110	0	0	169	-112	
	L5	0	0	0	120	164	-88	-85	-85	0	0	164	-83	
	L6	0	0	0	120	120	-76	-70	-70	0	0	157	-70	
	L7	0	0	0	120	120	-120	-95	-95	0	0	144	-95	
	L8	0	0	0	120	120	-120	-120	-88	0	0	135	-88	
	L9	0	0	0	120	120	-120	-120	-120	0	0	162	-162	

Заполним таблицу истинности для C_A , C_B , C_C :

Таблица 4 – Таблица истинности C_A , C_B , C_C

$N_{\varphi_{AB}}$	$N_{\varphi_{BC}}$	$N_{\varphi_{CA}}$	Примечание	C_A	C_B	C_C
0	0	0	Не ОО	~	~	~
0	0	1	$C_A \cdot \overline{C_B} \cdot C_C$	1	0	1
0	1	0	$\overline{C_A} \cdot C_B \cdot C_C$	0	1	1
1	0	0	$C_A \cdot C_B \cdot \overline{C_C}$	1	1	0
1	1	1	$C_A \cdot C_B \cdot C_C$	1	1	1

Запишем логические выражения ЧЛКПФ для проводов фаз (C_A , C_B , C_C) через ЧЛКСФ на входе ТП2:

$$\begin{cases} C_A = \overline{N_{\varphi_{BC}}} + N_{\varphi_{AB}} \cdot N_{\varphi_{CA}}; \\ C_B = \overline{N_{\varphi_{AC}}} + N_{\varphi_{AB}} \cdot N_{\varphi_{BC}}; \\ C_C = \overline{N_{\varphi_{AB}}} + N_{\varphi_{BC}} \cdot N_{\varphi_{CA}}. \end{cases} \quad (2)$$

Полученное выражение для C_A следует трактовать следующим образом.

В случае, если фазовый сдвиг φ_{AB} , и φ_{CA} в конце линии соответствует нормальному значению ($(N_{\varphi_{AB}} = 1) \cap (N_{\varphi_{CA}} = 1)$), провод фазы A исправен ($C_A = 1$). В случае, если хотя бы один из фазовых сдвигов φ_{AB} или φ_{CA} в конце линии не соответствуетциальному значению ($(N_{\varphi_{CA}} = 0) \cup (N_{\varphi_{CA}} = 0)$) и при этом фазовый сдвиг φ_{BC} соответствует нормальному значению ($N_{\varphi_{BC}} = 1$), существует ОО провода фазы A. Выражения для C_B и C_C трактуются аналогично.

Таким образом, по значениям фазового сдвига в конце линии можно однозначно определить, на каком из проводов произошло повреждение.

По сдвигу фаз между напряжением на вторичной обмотке ЛТ каждого потребителя и контрольным сигналом можно определить, есть ли ОО на участке от ТП до этого потребителя (для двух фазных проводов, использующихся для питания данного ЛТ). Аналогично напряжению сдвиг фаз будет меняться на каждом потребителе, подключенному после места ОО и использующем для питания поврежденный фазный провод.

В качестве примера рассмотрим ОО провода фазы C на участке L5. В нормальном режиме сдвиг фаз между линейным напряжением U_{AB} на выходе ТП и напряжением питания СТ 15 составляет 6,7 мс (120°) (рисунок 4). В случае подпитки СТ 15 от ЛТ соседних потребителей при повреждении провода фазы C сдвиг фаз составит 9,1 мс (164°), что является отличительным признаком этого повреждения (рисунок 5).

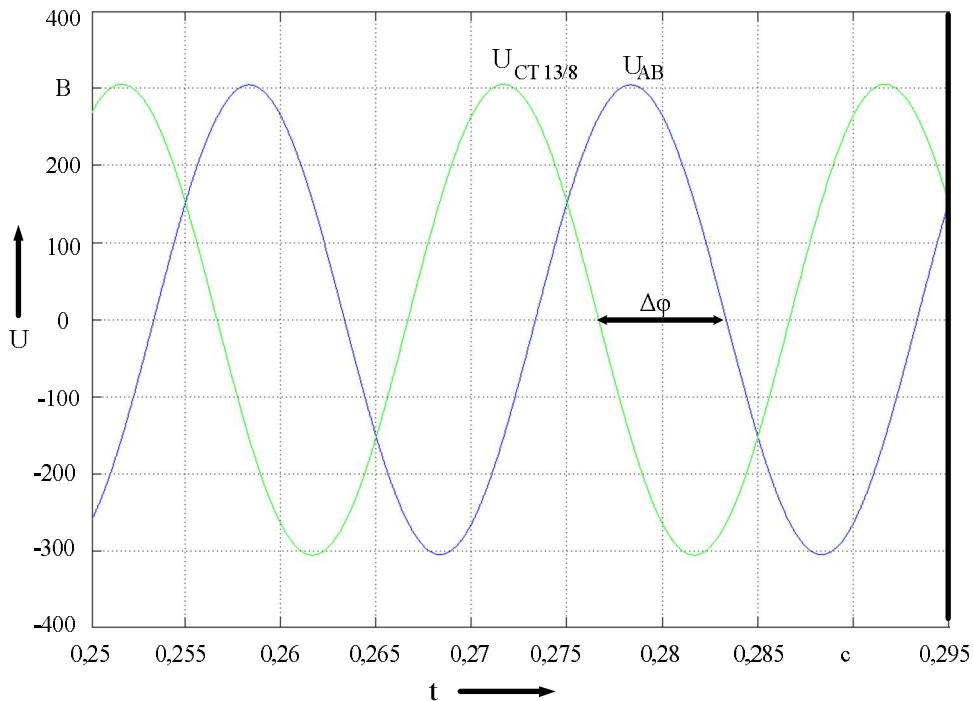


Рисунок 4 –Напряжение питания на СТ 15 в нормальном режиме

Правила уточнения места обрыва изменения сдвига фаз в качестве отличительного признака ОО какого-либо провода ВЛ СЦБ будут аналогичными правилам для значений напряжений:

место обрыва находится перед наименее удаленным от ТП потребителем с ЧЛКСФ, равным нулю;

Информационные технологии, автоматика, связь, телекоммуникации

место обрыва находится после наиболее удаленного от ТП потребителя, использующего для питания поврежденную фазу, с ЧЛКСФ, равным единице.

По результатам моделирования можно сделать следующие выводы:

напряжение в любой точке ВЛ СЦБ зависит от параметров источника, параметров линии и порядка распределения нагрузок по фазам;

по значениям сдвига фаз между линейными напряжениями в конце линии можно однозначно определить фазный провод с ОО;

по значениям напряжения питания на вторичной обмотке ЛТ каждого потребителя возможно уточнение места повреждения, но есть вероятность ошибки вследствие подпитки потребителя через обмотки ЛТ соседних потребителей;

по значению сдвига фаз между напряжением питания на вторичной обмотке ЛТ каждого потребителя и контрольным сигналом возможно более надежное и эффективное уточнение места обрыва фазного провода;

точность определения места повреждения определяется шагом транспозиции (3 км), а при некоторых повреждениях увеличивается и определяется расстоянием между потребителями;

применение аппаратуры, измеряющей межфазное напряжение в конце линии электроснабжения устройств ЖА перегона, напряжение питания каждой нагрузки и сдвиг его фазы относительно контрольного сигнала, а также передающей всю полученную информацию на центральный пункт с целью обработки, позволит определить участок линии электроснабжения с обрывом фазного провода.

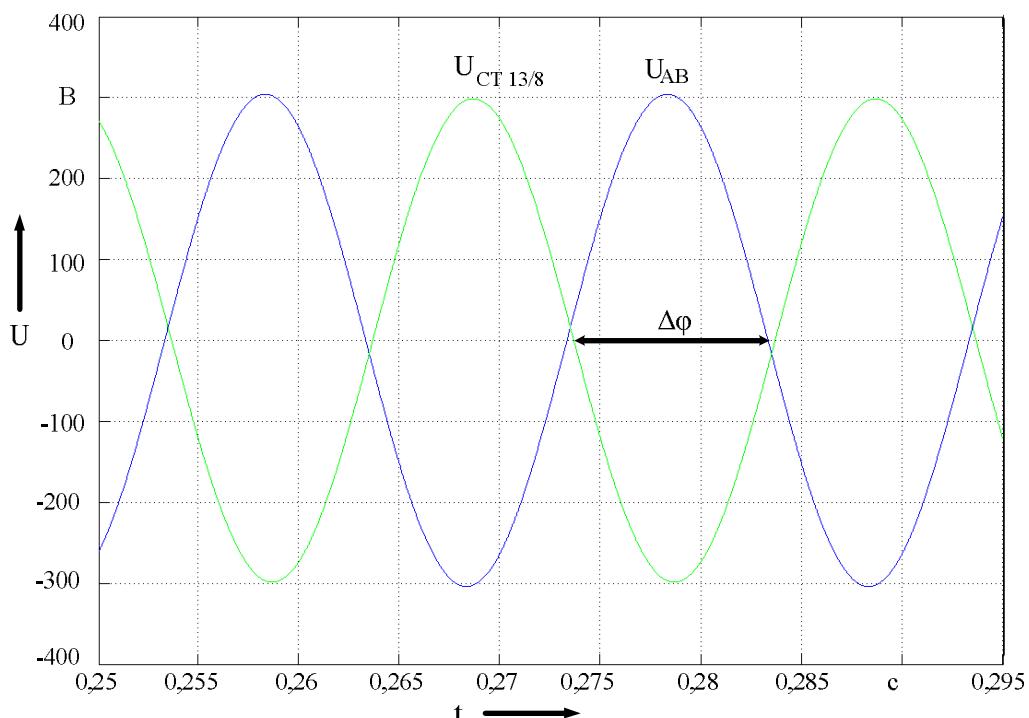


Рисунок 5 – Напряжение питания на СТ 15 при обрыве провода фазы С

Список литературы

1. Тарута, П. В. Экспериментальная оценка величины провала напряжения при подключении резервного выпрямительного агрегата [Текст] / П. В. Тарута, М. А. Карабанов // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2010. – № 2 (2). – С. 76 – 80.
2. Соколов, М. М. Контроль качества электрической энергии в системах электроснабжения устройств автоматики железных дорог [Текст] / М. М. Соколов // // Известия Транссиба / Ом-

ский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – № 1 (5). – С. 77 – 83.

3. Сидоров, О. А. Анализ влияния отклонения напряжения питания на надежность функционирования сигнальной точки [Текст] / О. А. Сидоров, М. А. Карабанов // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – № 1 (5). – С. 100 – 104.

4. Карабанов, М. А. Снижение влияния системы тягового электроснабжения на электропитание нетяговых потребителей в моменты подключения преобразовательных агрегатов [Текст] / М. А. Карабанов // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – № 3 (7). – С. 58 – 67.

5. Ратнер, М. П. Электроснабжение нетяговых потребителей железных дорог [Текст] / М. П. Ратнер, Е. Л. Могилевский. – М.: Транспорт, 1985. – 295 с.

6. Шалин, А. И. Замыкания на землю в сетях 6 – 35 кВ. Достоинства и недостатки различных защит [Текст] / А. И. Шалин // Новости ЭлектроТехники. – 2005. – № 3 (33).

УДК 621.3.05,519.65

Е. А. Альтман, Д. А. Елизаров

ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ ОЦЕНКИ ПАРАМЕТРОВ СИГНАЛОВ В ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ В СИСТЕМЕ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

В статье произведен анализ методов определения параметров гармоник сигнала и предложена модификация метода корреляционных функций, позволяющая существенно повысить точность определения фазы сигнала. Рассматриваются следующие методы: Якобсена (Jacobsen's Modified Quadratic Estimator), два метода Квина (Quinn's Estimator, Quinn's Second Estimator), Маклеода (Macleod's Estimator) и метод корреляционных функций. Для всех методов произведена оценка точности определения параметров гармоник сигналов при различных уровнях шума. На основе полученных результатов разработаны рекомендации по применению рассмотренных методов.

Для сокращения расходов электроэнергии в тяговой сети железнодорожного транспорта важное значение имеют средства контроля состояния сети. В статье рассматривается задача оценки параметров гармоник сигнала: частоты, амплитуды и фазы.

Сигналы в тяговой сети железнодорожного транспорта имеют ярко выраженную основную гармонику с частотой, используемой в промышленных сетях, 50 Гц, т. е. с некоторыми ограничениями их можно считать однотональными.

В статье производится анализ точности алгоритмов оценки параметров однотонального сигнала. Применение дополнительных методов для определения параметров сигнала обусловлено неспособностью дискретного преобразования Фурье (ДПФ) точно определить частоту сигнала, когда максимум ДПФ не совпадает со спектром сигнала, что наглядно отражено на рисунке 1.

На рисунке 1 номера отсчетов максимума ДПФ и его двух соседних вершин обозначены как k , $k+1$ и $k - 1$ соответственно. Номер максимальной гармоники спектра сигнала обозначен как k_{peak} . Разность между k_{peak} и k – как δ .

В статье [1] рассмотрены методы оценки частоты гармоник однотонального сигнала: Якобсена (Jacobsen's Modified Quadratic Estimator), два метода Квина (Quinn's Estimator, Quinn's Second Estimator), Маклеода (Macleod's Estimator) и метод корреляционных функций. Все методы, кроме метода корреляционных функций, являются интерполяционными алгоритмами для нахождения параметров сигнала. В диапазоне от минус 30 до минус 15 дБ интерполяционные методы имеют большое значение среднеквадратичной ошибки в отличие от метода корреляционных функций. Если сравнивать оставшиеся пять методов, то можно отметить хорошие результаты у метода Маклеода и у второго метода Квина. При малом уровне шумов (от 10 дБ) все методы показали относительно высокую точность. Учитывая высокую

Информационные технологии, автоматика, связь, телекоммуникации

вычислительную сложность метода корреляционных функций, в данном случае предпочтительней применять интерполяционные методы.

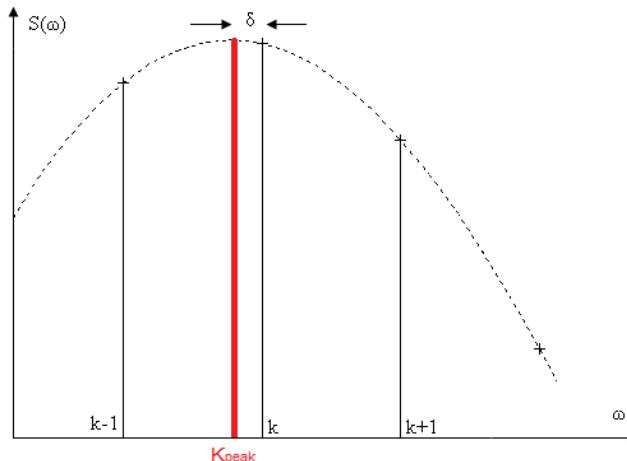


Рисунок 1 – Непрерывный спектр сигнала и отчеты ДПФ

В данной работе основное внимание уделяется методам оценки амплитуды и фазы гармоник сигнала.

В качестве исследуемого сигнала рассмотрим периодический сигнал $y(t)$ с периодом T_s и спектром, ограниченным N -й гармоникой и белым шумом $\eta(t)$:

$$y(t) = \sum_{v=0}^{v=N} A_v \cos\left(\frac{2 \cdot \pi}{T_s} v \cdot t + \varphi_v\right) + \eta(t), \quad (1)$$

где A_v – амплитуда v -й гармоники;

φ_v – фаза v -й гармоники.

Для интерполяционных методов существует единый алгоритм оценки амплитуды и фазы гармоник сигналов. Базовым элементом для нахождения амплитуды и фазы гармоник сигналов является параметр δ .

Параметр δ определяется по второму методу Квина [2]:

$$\delta = \frac{\hat{a}_{-1} + \hat{a}_{+1}}{2} + g(\hat{a}_{+1}) - g(\hat{a}_{-1}), \quad (2)$$

где $g(*)$ определяется по выражению:

$$g(x) = \frac{1}{4} \cdot \log(3x^4 + 6x^2 + 1) - \frac{\sqrt{6}}{24} \cdot \log\left(\frac{x^2 + 1 - \sqrt{\frac{2}{3}}}{x^2 + 1 + \sqrt{\frac{2}{3}}}\right); \quad (3)$$

\hat{a}_{-1} и \hat{a}_{+1} – по выражениям:

$$\begin{cases} \beta_{-1} = \operatorname{Re}\left(\frac{y(k-1)}{y(k)}\right), \beta_{+1} = \operatorname{Re}\left(\frac{y(k+1)}{y(k)}\right); \\ \hat{a}_{-1} = \frac{-\beta_{-1}}{\beta_{-1} - 1}, \hat{a}_{+1} = \frac{-\beta_{+1}}{\beta_{+1} - 1}. \end{cases} \quad (4)$$

Если параметр δ известен, амплитуда гармоник сигнала определяется по выражению [2]:

$$A_v = T_s^{-1} \frac{\left| \sum_{t=-1}^1 y(k+t) \cdot \bar{c}_t \right|}{\sum_{k=-1}^1 |c_t|^2}, \quad (5)$$

c_t – по выражению:

$$c_t = [e^{2\pi \cdot j \cdot \delta} - 1] / [4\pi \cdot j(\delta - t)]. \quad (6)$$

Фаза гармоник сигнала вычисляется по формуле:

$$\varphi = \arg \left(\sum_{t=-1}^1 y(k+t) \cdot \bar{c}_t \right). \quad (7)$$

Базовым параметром метода корреляционных функций является коэффициент корреляции. Для исследуемой функции сигнала формируется набор эталонов. Далее производится анализ на наличие связи в точках между параметрами сигнала и эталона. Наибольшее значение коэффициента корреляции показывает на эталон, параметр которого необходимо выбрать.

Приведенные в работе [3] формулы содержат неточности и не позволяют получить правильную оценку параметров сигнала, прежде всего фазы. В работе [3] не приводится также способ получения эталонов с действительным спектром, без которого определение фазы при значительном уровне шума невозможно. Рассмотрим вывод формул для оценки амплитуды и фазы. Для этого вернемся к формуле для нахождения коэффициента корреляции между множеством Y и эталоном W_j :

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^{i=M} Y_i \cdot W_{ji} &= \sum_{i=1}^{i=M} A_v e^{j \cdot \varphi_v} W \left(\frac{2\pi}{T_w} (i + \Delta r) \right) W \left(\frac{2\pi}{T_w} (i + \Delta r_j) \right) + \\ &+ \sum_{i=1}^{i=M} \Theta_w \left(\frac{2\pi}{T_w} (i + \Delta r) \right) W \left(\frac{2\pi}{T_w} (i + \Delta r_j) \right) = A_v e^{j \cdot \varphi_v} R(\Delta r - \Delta r_j) + S(\sigma^2), \end{aligned} \quad (8)$$

где Y – новый, ограниченный во времени сигнал, полученный в результате наложения окна на сигнал $y(t)$;

$W_j = \{W_{j1}, W_{j2}, \dots, W_{jM}\}$ – набор эталонных множеств из M точек (в нашем случае $M = 5$), каждая точка которого вычисляется по правилу:

$$W_{ji} = W \left(\frac{2\pi}{T_w} (i + \Delta r_j) \right); \quad (9)$$

$R(\Delta r - \Delta r_j)$ – корреляционная функция функций $W \left(\frac{2\pi}{T_w} (i + \Delta r) \right)$ и $W \left(\frac{2\pi}{T_w} (i + \Delta r_j) \right)$;

$S(\sigma^2)$ – случайная величина с нулевым математическим ожиданием и σ^2 – дисперсия шума;

T_w – период окна.

Новый ограниченный во времени сигнал Y получается путем наложения сигнала $y(t)$ на окно $w(t)$, имеющее отличное от нуля значение на временном отрезке $\left[-\frac{T_w}{2}, \frac{T_w}{2} \right]$. Процесс

наложения окна представляет собой домножение неограниченного во времени сигнала $y(t)$ на ограниченную во времени функцию $w(t)$. При определении параметров гармоник сигнала будет достаточно рассматривать пять гармоник возле максимальной гармоники спектра сиг-

Информационные технологии, автоматика, связь, телекоммуникации

нала. В силу того, что мы исследуем однотональный сигнал, в его окрестности ничего не должно быть, поэтому другими гармониками мы пренебрегаем (или считаем их шумом). Величина $S(\sigma^2)$ соответствует теоретической границе Крамера – Рао и является теоретической погрешностью вычисляемого параметра сигнала.

Из условия равенства двух комплексных чисел в формуле (8) значения амплитуды должны быть равными друг другу. Если в качестве окна выбирается симметричная функция, то функция $W(\omega)$ и множество ее значений W_{ji} будут действительными. С учетом этого получаем соответственно модуль амплитуды v -й гармоники:

$$A_v = \frac{1}{R(\Delta r - \Delta r_j)} \sqrt{\left(\sum_{i=1}^{i=M} \operatorname{Re}(Y_i) W_{ji} \right)^2 + \left(\sum_{i=1}^{i=M} \operatorname{Im}(Y_i) W_{ji} \right)^2} - \frac{S(\sigma^2)}{R(\Delta r - \Delta r_j)}. \quad (10)$$

Когда эталоны формируются достаточно часто, корреляционная функция $R(\Delta r - \Delta r_j)$ определяется как сумма квадратов значений W_{ji} (обозначим эту сумму как E). Таким образом, формулу (10) для амплитуды гармоник можно переписать следующим образом:

$$A_v = \frac{1}{E} \sqrt{\left(\sum_{i=1}^{i=M} \operatorname{Re}(Y_i) W_{ji} \right)^2 + \left(\sum_{i=1}^{i=M} \operatorname{Im}(Y_i) W_{ji} \right)^2} - \frac{S(\sigma^2)}{E}. \quad (11)$$

Графики зависимостей дисперсий смещения оценки амплитуды гармоники сигнала от уровня шума представлены на рисунке 2, на них отражена также граница Крамера – Рао. Для определения амплитуды неравенство имеет вид [5]:

$$D(A) \geq \frac{2\sigma^2}{N}. \quad (12)$$

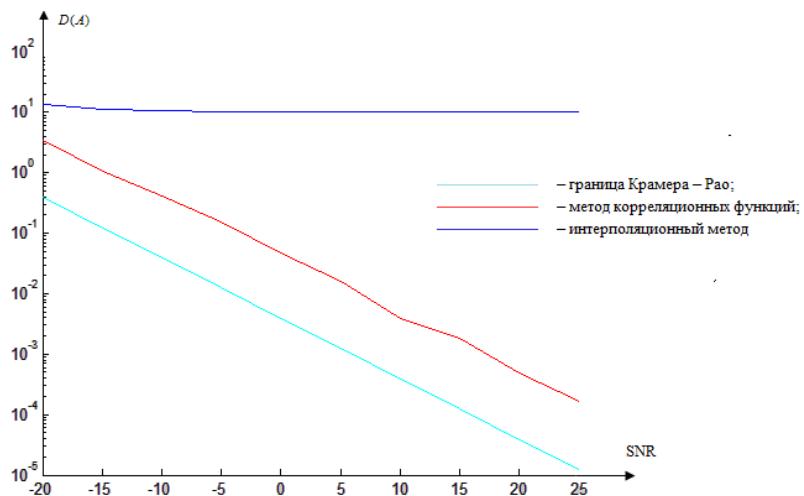


Рисунок 2 – Анализ точности результатов работы (определение амплитуды гармоники)

Из условия равенства двух комплексных чисел в формуле (8) значения угла ϕ правой и левой частей равны друг другу, с точностью до периода. Таким образом, фаза гармоники без учета функции $R(\Delta r - \Delta r_j)$:

$$\phi' = \operatorname{arctg} \left(\frac{\sum_{i=1}^{i=M} \operatorname{Im}(Y_i) W_{ji}}{\sum_{i=1}^{i=M} \operatorname{Re}(Y_i) W_{ji}} - S(\sigma^2) \right). \quad (13)$$

Информационные технологии, автоматика, связь, телекоммуникации

Формула (13) позволяет определить фазу гармоники относительно эталона. Для получения фазы относительно начала сигнала нужно учесть фазу эталона. При определении фазы гармоники сигнала необходимо учесть сдвиг фазы, связанный с отклонением значения параметра δ от нуля при определении функции $R(\Delta r - \Delta r_j)$. Сдвиг фазы определяется значением угла у набора эталона, который максимально соответствует исследуемому сигналу. Формирование эталона с действительным спектром описано в работе [6], в которой приводится формула:

$$phz(\delta) = \sin(\pi \cdot f), \quad (14)$$

где f – частота гармоники сигнала для отклонения, равного параметру δ ;

$phz(\delta)$ – угол фазы набора эталона, который максимально соответствует исследуемому сигналу.

Таким образом, фаза гармоники сигнала определяется по формуле:

$$\varphi = (\varphi' + phz(\delta)) + 2\pi k. \quad (15)$$

Графики зависимостей дисперсий смещения оценки фазы гармоники сигнала от уровня шума представлены на рисунке 3, на них отражена также граница Крамера – Рао. Для определения фазы неравенство имеет вид [5]:

$$D(\varphi) \geq \frac{2\sigma^2}{\pi \cdot A^2 \cdot N(N-1)}. \quad (16)$$

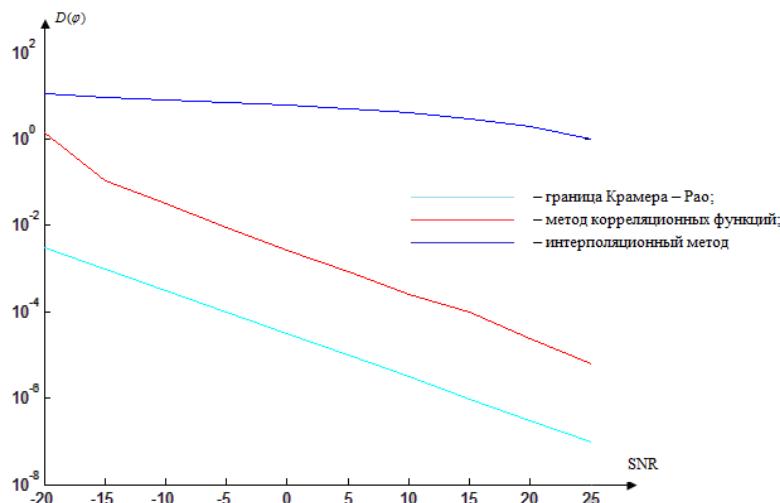


Рисунок 3 – Анализ точности результатов работы (определение фазы гармоники)

При обычном уровне шума интерполяционные методы способны определять частоту гармоник сигнала, но при определении амплитуды и фазы эффективным методом является метод корреляционных функций.

На основе представленных в статье материалов можно сделать следующие выводы:

1) при определении амплитуды и фазы гармоник рекомендуется использовать модернизированный метод корреляционных функций, так как другие методы не способны точно оценить данные параметры;

2) интерполяционные методы показали хорошие результаты только при условии отсутствия шума в системе и когда максимум ДПФ совпадает со спектром сигнала, однако смещение величин в данном случае все же больше, чем у модернизированного метода корреляционных функций;

Информационные технологии, автоматика, связь, телекоммуникации

3) оценку параметров гармоник сигнала лучше производить модернизированным методом корреляционных функций, потому что он обеспечивает точность оценки параметров, близкую к теоретической (нижняя граница Крамера – Рао).

Список литературы

1. Альтман, Е. А. Исследование методов определения параметров однотонального сигнала тяговой электрической сети [Текст] / Е. А. Альтман, Д. А. Елизаров / Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2010. – № 4 (4). – С.103 –111.
2. Quinn, B.G. Estimation of frequency, amplitude and phase from the DFT of a time series / B.G. Quinn // IEEE Trans. Signal Processing. – 1997. – Vol. 45. – № 3. – P. 814 – 817.
3. Грицутенко, С. С. Повышение достоверности измерения показателей качества электрической энергии в системе тягового электроснабжения: дис... канд. техн. наук [Текст] / С. С. Грицутенко. – Омск. – 2007. – 154 с.
4. Сергиенко, А. Б. Цифровая обработка сигналов [Текст] / А. Б. Сергиенко. – СПб: Питер, 2002. – 608 с.
5. Kay S. M. Fundamentals of Statistical Signal Processing: Estimation Theory / S. M. Kay// Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ. – 1993.
6. Альтман, Е. А. Формирование оконной функции с действительным спектром для оценки спектра сигнала электрической сети [Текст] / Е. А. Альтман, Д. А. Елизаров, А. Г. Малютин // Омский научный вестник / Омский гос. техн. ун-т. – Омск, 2012.
7. Черемисин, В. Т. Основные направления реализации федерального закона № 261-ФЗ от 23.11.09 «Об энергосбережении ...» в холдинге «Российские железные дороги» [Текст] / В. Т. Черемисин, М. М. Никифоров // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2010. – № 2 (2). – С.119 –123.
8. Никифоров, М. М. Концепция энергетического обследования ОАО «Российские железные дороги» [Текст] / М. М. Никифоров // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2010. – № 4 (4) . – С.120 –126.
9. Никифоров, М. М. Целевые показатели энергосбережения и повышения энергетической эффективности системы тягового электроснабжения и энергопотребления на нетяговые нужды [Текст] / М. М. Никифоров // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2010. – № 3 (3) . – С.110 –116.

УДК 004.414.3

С. С. Грицутенко, А. С. Сидоренко

КОМПЕНСАЦИЯ ЭФФЕКТА ДОПЛЕРА В OFDM-СИГНАЛЕ

В статье предложен метод компенсации эффекта Доплера на приемной стороне. Рассмотрены два фактора влияния эффекта Доплера на сигнал – сдвиг несущей и деформация спектра, а также методы борьбы с ними. Показано, что наибольший вклад в разрушение созвездия сигнала вносит сдвиг несущей, в то время как влияние деформации спектра практически не искажает форму принятого сигнала.

При передаче или приеме данных между двумя движущимися относительно друг друга с высокой скоростью объектами с использованием OFDM-сигналов возникает проблема ухудшения качества связи за счет негативного воздействия доплеровской нелинейной частотной модуляции, которая является причиной нарушения ортогональности поднесущих, а также вызывает сдвиг всей полосы сигнала. Поэтому компенсация влияния эффекта Доплера на сигнал позволит значительно улучшить соотношение «сигнал – шум» и уменьшить количество ошибок приема.

Информационные технологии, автоматика, связь, телекоммуникации

Прежде всего проанализируем, как эффект Доплера воздействует на OFDM-сигнал, а затем рассмотрим методы борьбы с этим влиянием. Сигнал $v(t)$, состоящий из поднесущих f_i , модулированный несущей частотой f_c , можно представить в виде:

$$\begin{aligned} s(t) &= 2v(t)\cos\omega_c t = 2 \sum_{i=0}^{N_s-1} A_i \cos(\omega_i t + \phi_i) \cos\omega_c t = \\ &= 2 \sum_{i=0}^{N_s-1} A_i \{ \cos[(\omega_c + \omega_i)t + \phi_i] + \cos[(\omega_c - \omega_i)t + \phi_i] \}, \end{aligned} \quad (1)$$

где $\omega_c = 2\pi f_c$; $\omega_i = 2\pi f_i$.

Фаза несущей предполагается равной нулю. Амплитуда несущей для упрощения дальнейшего анализа установлена равной двум. Доплеровский сдвиг f_D пропорционален относительной скорости движения приемника и передатчика v_r и вычисляется так:

$$f_D = \frac{v_r f_c}{c}, \quad (2)$$

где c – скорость света в вакууме ($\sim 3 \times 10^8$ м/с).

Рассмотрим OFDM-сигнал как сумму различных частотных компонентов. В этом случае каждый из компонентов подвергается сдвигу Доплера по формуле:

$$(f_c \pm f_i) \rightarrow (1 + \xi)(f_c \pm f_i), \quad (3)$$

где параметр ξ (положительный или отрицательный) является процентным изменением. Очевидно, что параметр

$$\xi = \frac{f_D}{f} = \frac{v_r}{c} \quad (4)$$

и определяется относительной скоростью передатчика и приемника. Так как

$$(1 + \xi)(f_c \pm f_i) = (1 + \xi)f_c \pm (1 + \xi)f_i, \quad (5)$$

то можно предположить, что

$$f_c \rightarrow (1 + \xi)f_c \quad (6)$$

и

$$f_i \rightarrow (1 + \xi)f_i. \quad (7)$$

Это говорит о том, что эффект Доплера одинаково смещает и несущую частоту f_c , и каждую поднесущую f_i на одинаковую величину ξ . Сдвиг Доплера описывается выражениями:

$$f_{Dc} = \xi f_c = \frac{v_r f_c}{c} \quad (8)$$

и

$$f_{Di} = \xi f_i = \frac{v_r f_i}{c}. \quad (9)$$

Соответственно OFDM-сигнал с доплеровским сдвигом будет иметь вид:

$$\begin{aligned} s(t) &= \sum_{i=0}^{N_s-1} A_i \cos[(1 + \xi)(\omega_c + \omega_i)t + \phi_i] = \\ &= \sum_{i=0}^{N_s-1} A_i \cos[(1 + \xi)\omega_i t + \phi_i] \cos[(1 + \xi)\omega_c t] - \\ &\quad - A_i \sin[(1 + \xi)\omega_i t + \phi_i] \sin[(1 + \xi)\omega_c t]. \end{aligned} \quad (10)$$

Информационные технологии, автоматика, связь, телекоммуникации

Подразумевая, что $A_i \cos[(1+\xi)\omega_i t + \phi_i]$ является модулирующим сигналом для несущей $\cos((1+\xi)\omega_c t)$ и аналогично для второй части, выражение (10) доказывает, что эффект Доплера одинаково влияет на несущую и модулированную частоту. Этот вывод может быть применен и к любому другому модулированному сигналу. Стоит заметить, что параметр ξ может быть получен в приемнике с помощью алгоритмов оценки временного рассогласования [1].

Расстояние между поднесущими в сигнале определяется символьной скоростью $R_s = 1/T$ в модулированном сигнале. Так как каждая поднесущая частота является целым множителем R_s , то когда частота поднесущей меняется на величину ξ из-за эффекта Доплера, R_s меняется на такую же величину ξ . Этот вывод также применим к любому модулированному сигналу.

Тот факт, что частоты всех поднесущих меняются на одинаковую величину, разрушает ортогональность между поднесущими. Это происходит потому, что различие между поднесущими более не равно mR_s . Вместо этого оно становится равным $(1+\xi)mR_s$, где m – положительное целое число, $\xi \ll 1$.

Таким образом, при приеме сигнала, подвергшегося доплеровскому искажению, необходимо решить две отдельные задачи.

1. Скомпенсировать изменение несущей частоты, т. е. необходимо из частоты каждой поднесущей вычесть (либо прибавить в зависимости от направления движения приемника) величину ξf_c .

2. Скомпенсировать изменение ширины полосы сигнала.

Начнем рассмотрение вопроса со второго пункта. Как видно из выражения (1), OFDM-сигнал является суммой синусоид с определенными частотой и фазой. Эффект Доплера приводит к изменению частоты каждой гармоники. При известной величине сдвига частоты можно попытаться интерполировать сигнал по известным принятым отсчетам и деформировать его («раздвинуть» поднесущие или, наоборот, «сжать» их) в обратную сторону. Для этого можно воспользоваться интерполяционным рядом Котельникова – Шеннона:

$$s(t) = \sum_{k=0}^{N_s-1} s(k\Delta t) \text{sinc}(\pi F(t - k\Delta t)), \quad (11)$$

где $s(k\Delta t)$ – отсчеты интерполируемого сигнала; F – частота дискретизации сигнала.

Формула (11) является разложением сигнала $s(t)$ по системе ортогональных функций. Для больших массивов дискретных данных точность восстановления сигнала обычно ограничивается интервалом задания функции sinc , который задает число членов ряда.

Из формулы (11) следует, что если для частоты дискретизации сигнала справедливо неравенство $F \geq 2f_{\max}$, где f_{\max} – наибольшая частота в спектре произвольной непрерывной функции $s(t)$, то функция $s(t)$ может представляться в виде числовой последовательности дискретных значений $s(k\Delta t)$, $k = 0, 1, 2, \dots$ и однозначно по этой последовательности восстанавливаться, в пределе – без потери точности [3]. Однако реальные сигналы (в том числе и тот, с которым мы будем работать) ограничены по времени, поэтому при непосредственном использовании формулы (11) на интерполированный сигнал будет воздействовать эффект Гиббса [2]. Чтобы избежать этого, воспользуемся окном Чебышева, которое будем применять к интерполирующей функции sinc для каждого отсчета сигнала. Кроме того, использование окна позволяет равномерно распределить помеху по всему сигналу. Тогда формула (11) перепишется в виде:

$$s(t) = \sum_{k=0}^{N_s-1} s(k\Delta t) \text{sinc}(\pi F(t - k\Delta t)) \text{chebwin}(k, N_s), \quad (12)$$

где $\text{chebwin}(k, N_s)$ – числовая последовательность, состоящая из N_s отсчетов, форма которой соответствует окну Чебышева и максимум которой находится в k -м отсчете. Таким образом, максимум окна всегда соответствует максимуму функции sinc .

Компенсация изменения несущей частоты сигнала не вызывает сложностей и выполняется с помощью формулы:

$$s(t) = s_{dist}(t) \exp(2\pi j \Delta f), \quad (13)$$

где Δf – частота, на которую необходимо сдвинуть сигнал; $s_{dist}(t)$ – принятый искаженный сигнал, дополненный комплексной составляющей, являющейся исходным сигналом, но сдвинутым на $\pi/2$. Положительный показатель степени приводит к сдвигу сигнала вправо, отрицательный – влево.

Моделирование сигнала и воздействия на него эффекта Доплера проводилось в среде MATLAB. Для построения модели был использован сигнал со следующими параметрами: несущая частота – 3,4 ГГц; количество поднесущих – 256; ширина полосы сигнала – 1,75 МГц; вид модуляции – 64QAM.

Эти данные соответствуют одному из системных профилей стандарта WiMAX (IEEE802.16). Небольшое количество поднесущих и минимальная ширина полосы сигнала были взяты специально. Во-первых, полученные данные можно будет экстраполировать и на более информационноемкие профили и, во-вторых, большое количество поднесущих, а соответственно и точек, непропорционально увеличивает сложность расчетов для моделирования. Тип модуляции взят наиболее информационно емкий из всех предусмотренных в стандарте, так как именно на этот тип модуляции из-за малого межсимвольного расстояния помехи будут оказывать наибольшее влияние.

Модель была построена в предположении, что на сигнал не воздействуют никакие помехи кроме эффекта Доплера. Сигнал, подвергшийся воздействию эффекта Доплера, был получен с помощью формулы:

$$s(t) = \sum_{n=0}^N \operatorname{Re}[s(n)] \cos(2\pi F_{Dk} \Delta t + \operatorname{Im}[s(n)]), \quad (14)$$

где F_{Dk} – частота каждой поднесущей, полученной из формулы (9); N – количество поднесущих в OFDM-сигнале; Δt – длительность одного OFDM-символа в сигнале; $s(n)$ – символы, полученные после 64QAM-модуляции.

Интерполяция сигнала производилась с помощью выражения, полученного из формулы (12):

$$s(t) = \sum_{k=0}^{2N-1} s(k\Delta t) \operatorname{sinc}(\pi F(t \cdot \operatorname{delta} - k\Delta t)) \operatorname{chebwin}(k, Ns), \quad (15)$$

где delta – коэффициент, отвечающий за временной сдвиг сигнала, принятого на вход приемника, причем $\operatorname{delta} = 1 + \xi$; $\operatorname{chebwin}$ – окно Чебышева, состоящее из $2N$ отсчетов и имеющее ослабление в 60 дБ.

Теперь рассмотрим, как предложенная методика восстанавливает сигнал, в котором смоделировано воздействие эффекта Доплера. При относительной неподвижности передатчика и приемника созвездие сигнала будет иметь вид, представленный на рисунке 1. Некоторые из точек в созвездии пустые. Это вызвано тем, что не все символы в сигнале уникальны:

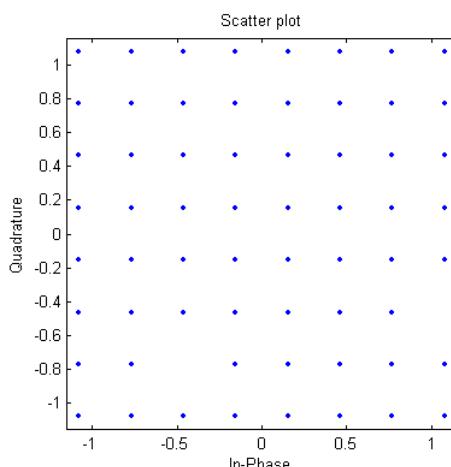


Рисунок 1 – Созвездие сигнала при относительном покое передатчика и приемника

Информационные технологии, автоматика, связь, телекоммуникации

При увеличении скорости приемника картинка будет меняться. Результат можно посмотреть на рисунке 2 для относительной скорости между приемником и передатчиком в 20 км/ч и на рисунке 3 для относительной скорости в 50 км/ч.

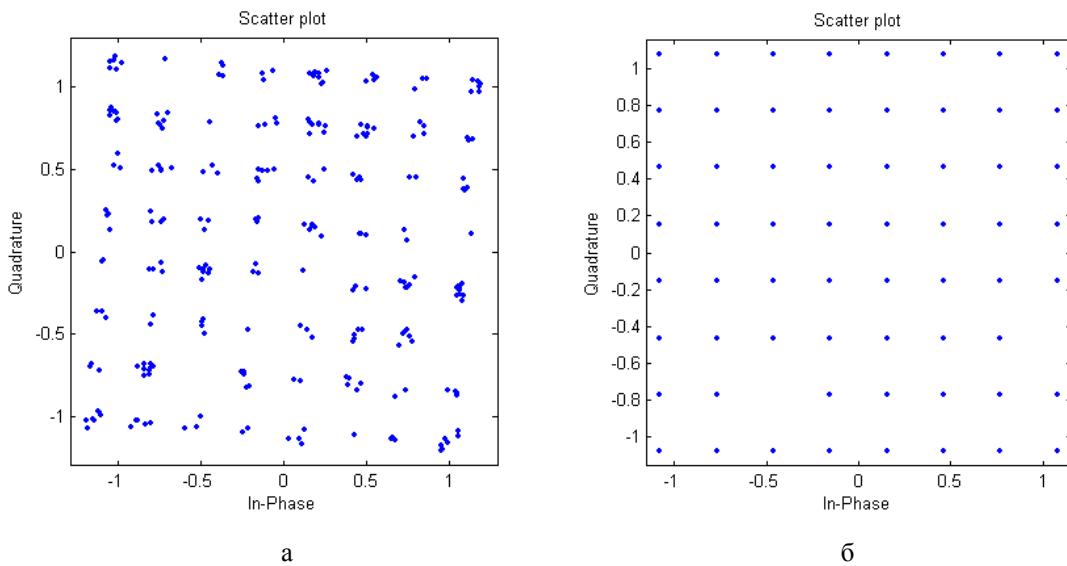


Рисунок 2 – Созвездие при учете сдвига несущей (а) и без него (б)

Как видно из рисунка 3, уже при скорости 50 км/ч, если учитывать сдвиг несущей, созвездие полностью разрушается и символы становятся неразличимыми для приемника. Если же принимать во внимание только сдвиги поднесущих, то созвездие не изменяется. Действительно, на основе формул (8) и (9) несущая частота будет сдвинута на порядок 10^3 Гц, а поднесущие – всего на 10^{-3} Гц, что не влияет на достоверность демодуляции.

На рисунке 4 изображено созвездие сигнала, который был получен при относительной скорости приемника и передатчика, равной 50 км/ч, и к которому перед демодуляцией были применены преобразования (12) и (13).

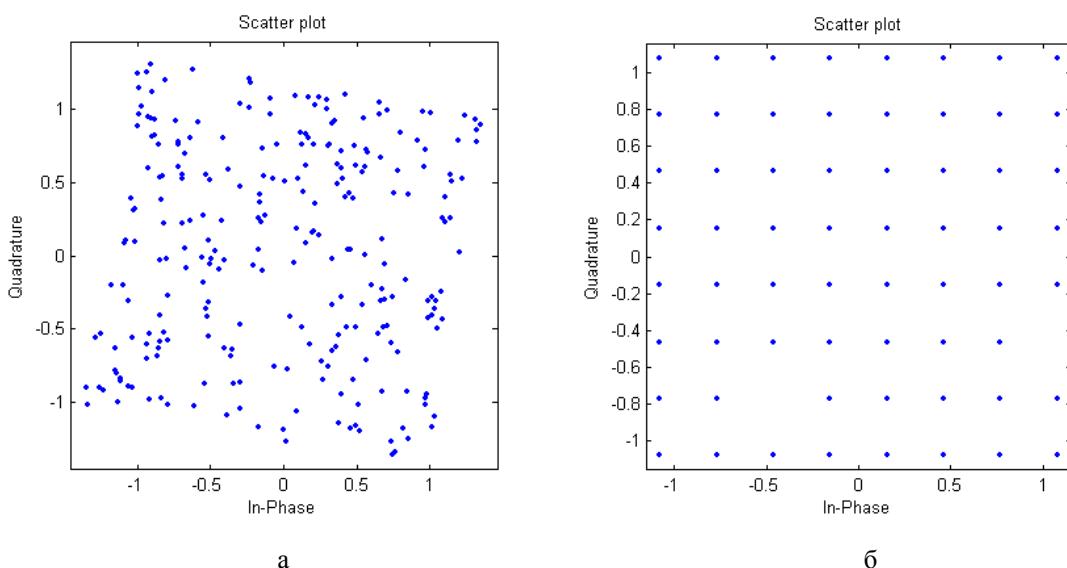


Рисунок 3 – Созвездие при учете сдвига несущей (а) и без него (б)

Как видно на рисунке 4, некоторые искажения в созвездии все же присутствуют, но оно уже может быть однозначно распознано демодулятором. Неполное восстановление сигнала можно объяснить накапливающимися ошибками вычисления, воздействием помехи, которая

возникает при интерполяции и потерей нескольких последних отсчетов сигнала ввиду увеличения его длительности из-за снижения частоты.

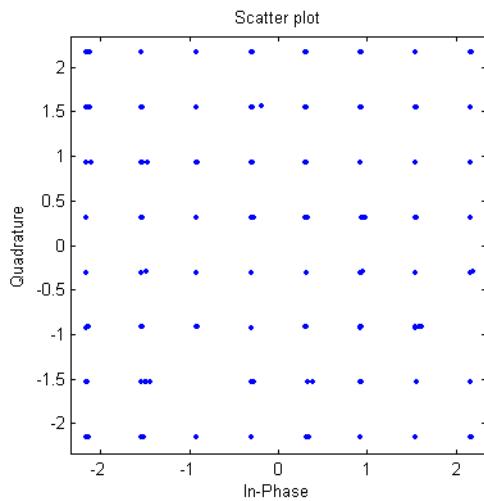


Рисунок 4 – Созвездие сигнала после восстановления

В заключение заметим, что данный метод будет корректно работать лишь при «сжатии» сигнала в частотной области (или, что то же самое, «растяжении» во временной), потому что только в этом случае не будет нарушаться положение теоремы Котельникова о частоте дискретизации. В противном случае высшие частотные составляющие сигнала будут потеряны, так как превысят частоту дискретизации на приемнике.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что при наличии знания о величине сдвига частоты, существует возможность достаточно хорошо восстановить исходный сигнал. Недостатком представленного метода является значительное увеличение требуемых вычислительных ресурсов на приемной стороне, хотя эти сложности могут быть преодолены применением алгоритмов параллельных вычислений [3]. Кроме того, рассмотренный метод интерполяции при незначительных модификациях можно использовать и для других задач, не связанных напрямую с компенсацией эффекта Доплера, например, для выравнивания характеристик АЦП [7].

Список литературы

1. Квиткова, Е. Б. Метрики, используемые в алгоритмах временной синхронизации OFDM-сигнала [Текст] / Е. Б. Квиткова // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – 2011. – № 4. – С. 75 – 79.
2. Грицутенко, С. С. Введение понятия «дельта-вектор» в пространстве Гильберта для корректного представления данных в информационных системах [Текст] / С. С. Грицутенко // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2010. – № 1. – С. 73 – 79.
3. Сидоренко, А. С. Ограничения алгоритмов параллельных вычислений в цифровой обработке сигналов [Текст] / А. С. Сидоренко // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – 2010. – №3. – С. 89 – 93.
4. Грицутенко, С. С. Метод линеаризации характеристики преобразования АЦП [Текст] / С. С. Грицутенко, А. Г. Панюков // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2012. – №1. – С. 78 – 83.

Информационные технологии, автоматика, связь, телекоммуникации

УДК 681.3:681.5

В. Г. Шахов, Е. П. Вишнякова

ЛОГИСТИКА КАК ПРИКЛАДНАЯ ЗАДАЧА ТЕХНИЧЕСКОЙ КИБЕРНЕТИКИ

В статье рассматриваются задачи прикладной кибернетики применительно к территориально разнесенным объектам, которые являются предметом изучения логистики. Приводятся разделы кибернетики, нашедшие применение в логистике, даются некоторые определения и задачи, решаемые с помощью этого математического аппарата.

По определению, данному основателями научного направления логистики, оно предполагается как раздел экономики, связанный с финансовыми потоками на некоторой территории и с оптимизацией этих потоков по одному из критериев [1]. Фактически задача оптимизации может обобщаться на достаточно большое число приложений, основанных на гипотезе территориальной разобщенности. В результате получается задача, которую можно сформулировать следующим образом.

Существует конечное множество территориально рассредоточенных пунктов, связанных между собой одним из способов транспортировки и взаимодействующих друг с другом как непосредственно, так и опосредованно.

Существуют числовые оценки непосредственного взаимодействия клиентов. При этом возникают количественные характеристики взаимодействий, оцениваемые, например, в денежных единицах, во времени, в затрачиваемой энергии передачи или других количественных эквивалентах. Необходимо оптимизировать совокупность таких взаимодействий по одному из критериев оптимизации и подобрать способ взаимодействия клиентов рассредоточенной сети, оптимизирующий эти взаимодействия по выбранному критерию.

Общая постановка задачи может быть использована в большом числе приложений. Приведем несколько примеров, конкретизирующих общую проблему.

1) Существует территория, которую можно разбить на конечное множество территориально рассредоточенных пунктов. Необходимо создать алгоритм взаимодействия этих пунктов по одному из критериев оптимизации. В качестве примеров можно привести службу скорой помощи, пожарную службу, системы быстрого реагирования, полицейские услуги, средства почтовой связи и т. д. Критерии оптимизации – минимум времени или минимум стоимости. При этом если в качестве критерия выбрать один из параметров количественного оценивания (время, стоимость транспортировки, стоимость потерь, совокупные затраты), то можно составить алгоритм взаимодействия, отвечающий выбранному критерию.

2) Существует конечное множество объектов взаимодействия на обозначенной территории, а также совокупность приоритетов взаимодействия. Желательно оптимизировать (гармонизировать) протоколы взаимодействия по одному из выбранных критериев. Предположим, общая структура логистического взаимодействия может быть представлена в виде, приведенном на рисунке 1.

Внутренние взаимодействия представлены ребрами графа, обозначающего взаимодействия территориально рассредоточенных объектов. Подобная модель предполагает множество вариантов исследования, зависящих от объектов исследования, критериев оценивания и способов описания (моделирования).

Простейшая модель – топологическая. В ней вершины внутреннего графа обозначают конкретные объекты взаимодействия, ребра имеют количественные оценки из числа приведенных выше (стоимость, время и др.). Методика исследования строится на основе выбранного критерия оптимизации и одним из известных способов оптимизации [2 – 4].

Второй тип модели – имитационная. В ней входы воспринимаются как случайные воздействия на систему, описываемую по формату на рисунке 1. Для дальнейшего анализа система воспринимается как система массового обслуживания, на которую принимаются заявки.

Информационные технологии, автоматика, связь, телекоммуникации

Каждая заявка принимается независимо от других, но может иметь свой приоритет (очередность обслуживания). Если модель составлена удачно (отвечает принципам адекватности модели группе объектов), то с ее помощью можно принимать реальные решения для множества однотипных объектов, что позволяет экономить время и средства для получения или прогнозирования реальных результатов.

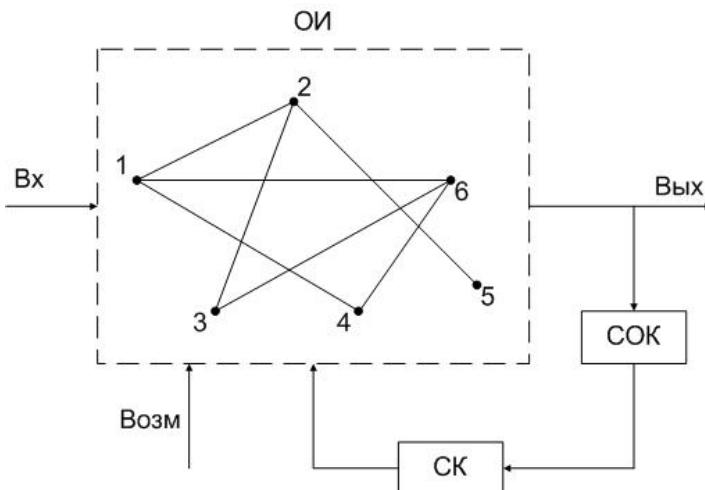


Рисунок 1 – Структура взаимодействия в логистической модели:

ОИ – объект исследования, т. е. собственно рассредоточенная система пунктов со своими связями; Вх – входные воздействия, влияющие на систему; Вых – реакция системы, выраженная в некоторой контролируемой форме; Возм – возмущения, действующие на ОИ и не поддающиеся управлению; СОК – система оценки качества функционирования ОИ; СК – система коррекции

Назовем некоторые методы анализа рассредоточенных объектов, которые можно отнести к разряду логистических моделей.

Задача, известная в литературе как симплекс-метод [4]. В ней оптимизируется решение на основе системы линейных уравнений. В основе решения используется принцип, на основе которого количество уравнений меньше количества неизвестных. Под линейным программированием понимается задача оптимизации, связанная с наличием альтернативных вариантов, т. е. с неоднозначностью решений. Для транспортных систем это может сводиться к различным маршрутам перевозок. Такая задача была сформулирована в средине прошлого века и была реализована в различных конкретных проектах.

Название метода связано с тем, что в его основе лежит система линейных алгебраических уравнений вида:

$$\begin{cases} a_{11}X_1 + a_{12}X_2 + \dots + a_{1N}X_N = b_1; \\ a_{21}X_1 + a_{22}X_2 + \dots + a_{2N}X_N = b_2; \\ \dots \\ a_{N1}X_1 + a_{N2}X_2 + \dots + a_{NN}X_N = b_N, \end{cases} \quad (1)$$

где N – порядок системы (имеется в виду сама логистическая система, т. е. количество участвующих в ней клиентов, или узлов графической модели); a_{ij} – константы, подлежащие оптимизации; b_j – константы, определяющие цену решения.

Применительно к логистике каждое уравнение может быть представлено как маршрут на графике логистической системы, в котором вершины соответствуют этапам производимых работ или местам нахождения пунктов системы, коэффициенты a_{ij} – веса ребер соответствующего графа, а b_j – цены соответствующих маршрутов. Необходимо минимизировать издержки на транспортировку или затрачиваемое на это время.

Основным принципом, лежащим в основе оптимизации, является то, что количество уравнений меньше числа неизвестных, т. е. появляется возможность выбора. Если жесткая

Информационные технологии, автоматика, связь, телекоммуникации

система линейных уравнений имеет единственное решение, то даже при одном «недостающем» уравнении появляется бесконечное количество решений. В этом и состоит принцип оптимизации.

В задачах линейного программирования вводится так называемая *целевая функция*:

$$q = c_1x_1 + c_2x_2 + \dots + c_Nx_N. \quad (2)$$

Необходимо добиться неотрицательного решения уравнения (1), обеспечивающего минимум целевой функции. Сущность симплекс-метода сводится к следующему. Вначале находится некоторое допустимое базисное решение. Его можно найти классическим методом, приравняв к нулю «лишние» аргументы и решив систему линейных алгебраических уравнений. Это и есть базовое решение. После этого проверяется, является ли это решение оптимальным. Для этого любой из аргументов можно проварировать методом чувствительности: насколько каждый из коэффициентов уравнения влияет на конечный результат. После этого можно составить ранжированный ряд коэффициентов влияния по принципу убывания:

$$c_I \geq c_J \geq c_K \dots \geq c_S. \quad (3)$$

После ранжирования составляется матрица решений размерности $I \times J$, в которой решение находится методом просмотра с левого верхнего угла. Матрица составляется по принципу уменьшения коэффициентов влияния, которые располагаются методом «змейки».

Применительно к логистике каждое уравнение может быть представлено как маршрут на графе логистической системы, в котором вершины соответствуют этапам производимых работ или местам нахождения пунктов системы, коэффициенты a_{IJ} – веса ребер соответствующего графа, а b_J – цены соответствующих маршрутов. Необходимо минимизировать издержки на транспортировку или затрачиваемое на это время.

Цена маршрута определяется в зависимости от типа решаемой задачи по разным критериям. В простейшем случае это суммарное время на перевозку $T_{\text{сум}}$ или суммарные издержки $\Pi_{\text{сум}}$:

$$T_{\text{сум}} = \sum_I \sum_J T_{IJ}; \quad (4)$$

$$\Pi_{\text{сум}} = \sum_I \sum_J \Pi_{IJ}. \quad (5)$$

Возможны другие варианты оценивания. В частности, в некоторых случаях вместо сумм используют произведения:

$$T_{\text{сум}} = \prod_I \prod_J T_{IJ}; \quad (6)$$

$$\Pi_{\text{сум}} = \prod_I \prod_J \Pi_{IJ}. \quad (7)$$

Еще один вариант – введение нормирующих (весовых) коэффициентов a_{IJ} . Выражение (4) принимает вид:

$$T_{\text{сум}} = \sum_I \sum_J a_{IJ} T_{IJ}. \quad (8)$$

Здесь значения a_{IJ} могут иметь разную интерпретацию в зависимости от типа решаемой задачи. Например, это ограничения по скорости на выделяемом участке или требования уступить дорогу для более срочных грузов (пассажиров), или особые условия транспортировки (например, скоропортящиеся, взрывоопасные или токсичные грузы). На железнодорожном транспорте это могут быть контейнерные (контрейлерные) поезда транснационального назначения.

Следующий, более сложный вариант – использование констант, входящих в выражения

Информационные технологии, автоматика, связь, телекоммуникации

(4) – (8) в виде функций времени. Задача при этом намного усложняется, так как от системы линейных уравнений надо переходить к дифференциальным уравнениям.

Наконец, еще более сложная задача – введение нелинейностей в упомянутые уравнения. Нелинейности могут входить как зависимости от скорости движения, от профиля пути, от технических характеристик транспортного средства.

Следующий уровень – введение случайностей в модель транспортировки. Это может быть связано с атмосферными явлениями (ветер, температура, течения для водного транспорта, сигналы светофоров для наземного транспорта), а также с дорожными ситуациями. Несмотря на кажущуюся незначительность этот фактор имеет большое значение на практике. Например, случайная неисправность рельсового транспорта приводит к его остановке, загрузка порта приводит к задержкам на обслуживание транспортных единиц, занятость взлетно-посадочных полос создает задержки для самолетов. Обнаруженные неисправности транспортных единиц влияют на пропускную способность систем перевозки независимо от их типа.

Перечисленные задачи на практике должны решаться в динамичном режиме: условия транспортировки меняются в зависимости от сезона, месяца, дня недели, времени суток. Обычно этим занимаются диспетчеры – опытные специалисты с профессиональными знаниями по управлению движением транспорта. Для совершенствования методов управления перевозками существуют специальные методы и оборудование, облегчающие работу диспетчеров, но тем не менее это очень ответственная и напряженная работа.

Применительно к транспортным системам применимы несколько типов характерных задач.

Определение *критических вершин* графа транспортной системы. Под критической вершиной понимается вершина, называемая *узловой*. Это такая вершина, которая приводит граф к несвязному (ее удаление приводит к невозможности составления маршрута по всем вершинам).

На рисунке 2 приведен график с критической вершиной 4: ее удаление приводит график к несвязному. Возможны частично критические вершины, удаление которых приводит к заметному усложнению перевозок, но не лишает возможности доставки. На том же графике вершина 2 является частично критической, так как связь между 1 и 3 остается, но она более длинная.

Определение оптимального маршрута на графике. Оптимальным считается маршрут, имеющий наименьший вес (цену). Часто задачи оптимизации сводятся к частным случаям

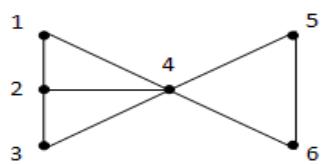


Рисунок 2 – К определению критической вершины

для двух выбранных вершин. При этом наиболее часто используется метод перебора. В принципе некоторое псевдооптимальное решение при этом может быть получено, но оно для всей системы объектов не является по-настоящему оптимальным, так как не учитывает других взаимодействий, но даже и в этом случае задача достаточно сложна. Предположим, в графике транспортной сети имеется N вершин. Тогда для прокладки одного оптимального маршрута необходимо в среднем $Z = N^2/2$ операций, а для всей сети с учетом независимости маршрутов $S = Z(Z-1)/2$.

Как видно из последнего выражения, с ростом сложности сети сложность вычислений увеличивается по кубическому закону. Здесь еще не учитывается топология сетей, т. е. количество ребер и их расположение, взаимодействия между ребрами и вершинами, а также критические ситуации на дорогах в течение суток и в зависимости от погодных условий. Простой пример – управление светофорами в городе. Ночью при практическом отсутствии движения светофоры можно переключать на мигающий режим, и этого достаточно. Днем жесткое управление светофорами приводит к пробкам, особенно в критические часы. Тогда на выручку приходит регулировщик. В последнее время работа регулировщиков отдается интеллектуальным техническим системам, управляющим светофорами в зависимости от длины очередей. А если по дороге следует машина «скорой помощи», МЧС

Информационные технологии, автоматика, связь, телекоммуникации

или должностного лица с эскортом сопровождения? Таких факторов появляется достаточно много для любого вида транспортировки, в том числе при передаче информации.

Формирование дублирования. Задача наиболее актуальна при наличии критических вершин: при их наличии нужно создать дублирующие маршруты. Для любого графа, описывающего транспортную сеть, важным является определение *связности* S : это наименьшее количество вершин, удаление которых приводит граф к несвязному. Полный, или полно связный, граф имеет все возможные ребра, т. е. в нем каждая вершина связана с остальными. Понятно, что для графа с N вершинами связность равна единице. В наше время дублирование возможно несколькими способами:

дублирование видов транспортировки (например, резервные самолеты, локомотивы, автомобили, суда). Это достаточно затратный путь, требующий немалых средств для поддержания работоспособности транспортных средств;

дублирование маршрутов (способов связи с вершинами графа). Это могут быть физические маршруты (новые дороги, транспортные развязки), что еще дороже;

переход на другие виды транспортировки (например, сопряжение железнодорожного и водного транспорта). При этом необходимы специальные транспортные интерфейсы – узлы сопряжения видов транспорта. Это погрузочно-разгрузочные узлы, склады, их инфраструктура с соответствующими технологиями. Например, при разгрузке нефтепродуктов из цистерн нужны соответствующие емкости, при перегрузке сыпучих продуктов или контейнеров необходимы специальные краны, а твердых малогабаритных грузов – кары.

Отметим, что подобные задачи возникают и при транспортировке информационных потоков. Например, переход от оптоволоконных линий связи к проводным или радиоканальным (в том числе спутниковым) требует специальных интерфейсов и оборудования. Здесь же существует и дублирование линий связи (например, дублирование волокон оптического кабеля), и дублирование типов связи (переход от оптоволокна к спутниковым системам связи).

Наличие дублирования заметно повышает надежность транспортных систем. Это легко доказать на основе теории вероятностей. Предположим, вероятность отказа в обслуживании безызбыточной системы (без дублирования) равна P_o . Если присутствует дублирование, результирующая вероятность подчиняется формуле Байеса:

$$P_o^* = P_o P_d \quad (9)$$

где P_d – вероятность отказа дублирующей системы.

Если учесть, что вероятности меньше единицы, то результирующая вероятность меньше наименьшей. Можно научиться «продвинутым» технологиям из смежных областей использования, в том числе из теории связи, где накоплен достаточный опыт в повышении надежности транспортировки.

Применительно к транспортным задачам важное значение имеет матричное представление графов. Простейший вариант – *матрицы смежностей*. Предположим, существует граф транспортной системы, представляющий формальное представление промежуточных и конечных станций и возможные способы их достижения. При этом если возможен

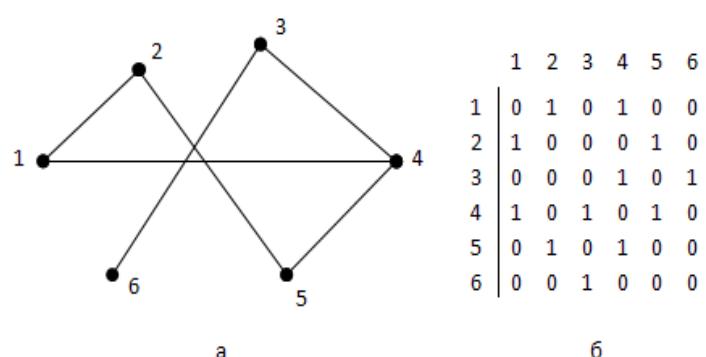


Рисунок 3 – Матричное представление графа

маршрут по одному ребру (дуге) из вершины I к вершине J , элемент матрицы C_{IJ} равен единице, в противном случае – 0. Приведем пример графа транспортной системы, содержащего шесть вершин (например, населенных пунктов или пунктов взаимодействия) (рисунок 3).

Граф состоит из шести вершин, соединенных маршрутами транспортировки, причем в

Информационные технологии, автоматика, связь, телекоммуникации

данном случае не оценивается стоимость доставки. Вершина I , соединенная с вершиной J одним ребром, считается смежной к ней. Аналогично вершина J считается смежной к I , т. е. отношение смежности *симметрично*. Поэтому матрица смежностей тоже симметрична. На рисунке 3,б приведена матрица смежностей для графа. По рисунку 3, а видно, что матрица симметрична (строки можно заменить столбцами и наоборот). Количество единиц матрицы равно половине количества ребер. И граф, и его матрица имеют взаимно однозначное соответствие (по графу можно построить единственную матрицу и наоборот).

Усложненная задача на графике *взвешенные* графы. В них каждое ребро представляет вес транспортировки в приведенных выше единицах (стоимость или время). Можно решать задачи оптимизации перевозок или их дублирования.

Третий вариант – направленные (ориентированные) графы, или *орграфы*, в них ребра называются *дугами* и имеют одно направление. Примером могут служить автодороги с односторонним движением, паромные переправы, морские (речные) порты с возможностью ограниченного обслуживания судов. В орграфах возможно движение только в направлении дуг.

Орграфы могут представляться и в матричной форме. При этом если из вершины I можно достичь вершины J по одной дуге, соответствующий элемент матрицы равен единице, в противном случае – 0. В качестве примера на рисунке 4 приведены орграф с шестью вершинами и соответствующая ему матрица смежностей.

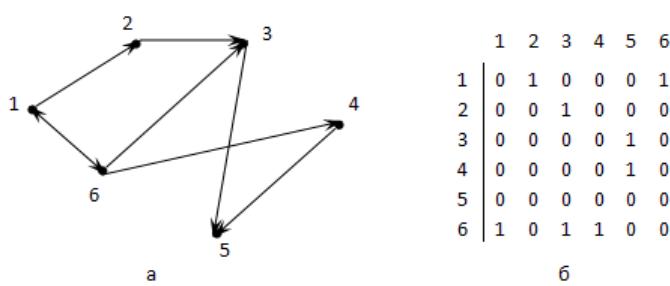


Рисунок 4 – Матричное представление орграфа

По сравнению с графиком общего вида матрица несимметрична и может содержать особые вершины. В приведенном примере это вершина 5, в которую дуги только входят; она называется *стоком* (вершина, из которой дуги только исходят, – *исток*).

Так же, как и для графов общего вида, веса дуг могут отличаться от 0 (1) и будут означать веса транспортировки. Это уже задача логистики, оценивающая стоимость транспортировки.

Классические задачи, решаемые на графах, могут иметь следующие виды.

Составить перечень альтернативных маршрутов из п. I в п. J и сопоставить их по критерию наибольшей эффективности.

При наличии основного маршрута следования предложить дублирующие варианты транспортировки.

Разработать проект модернизации транспортной системы по критерию максимальной живучести (предложить варианты строительства новых трасс перевозки, обеспечивающих работоспособность транспортной системы при повреждении основных маршрутов).

Модели конечномерной трассировки: на заданной поверхности графа необходимо найти некоторое множество маршрутов, позволяющих достичь конечного пункта с определенными критериями оптимизации.

Модели промежуточных пунктов: имеется конечное множество источников (пунктов передачи) и приемников (пунктов доставки). Необходимо оптимально разместить промежуточные пункты транспортировки, удовлетворяющие выбранному критерию оптимизации. Такая задача в рамках логистических моделей еще не ставилась.

Модели интерфейсов. В контексте логистических систем это означает следующие прикладные задачи. Имеется необходимость взаимодействия разных видов транспорта (морской, речной, железнодорожный, автомобильный, воздушный). Желательно разместить пункты взаимодействия (интерфейсы), обеспечивающие оптимальную транспортировку по выбранному критерию. Здесь же можно решать задачу оптимизации буфера (размера и объемов складов, порядка очередности обработки с учетом категорированности грузов). Такая задача тоже не ставилась.

Информационные технологии, автоматика, связь, телекоммуникации

Несмотря на достаточно формальную оценку задач анализа они имеют хорошие практические приложения, которые могут быть внесены в общую задачу логистики. Приведем некоторые примеры практических задач, которые могут (и должны) решаться на уровне логистики.

1) Имеется конечное множество некоторых ресурсов (товаров, денег, информации), которые нужно переместить по заданному графу взаимодействий с выбранным критерием оптимизации. Например, практическая задача оптимального размещения АЗС (автозаправочных станций) с учетом их ограниченного количества: где их размещать при учете территории и ограниченности средств. Та же задача может ставиться на примере выпечки булочек и других кондитерских изделий с учетом конечного числа кондитерских фабрик, точек продажи и единиц доставки; то же можно исследовать по поводу оптимизации траекторий движения инкассаторов, такси, машин «скорой помощи», пожарных. По таким принципам работают навигаторы, ставшие уже бытовыми приборами.

2) Задачи предпроектного проектирования. Создается новая инфраструктура территории, предназначенной для производства конкретного продукта. Нужно обеспечить своевременную доставку ингредиентов (полуфабрикатов, комплектующих изделий), позволяющих достичь конкретного результата за заданное время и с учетом ограниченного финансирования. Такая задача решалась на множестве госзаказов, включая создание атомного оружия, ракетные программы, системы гособороны. Как правило, такие программы не имеют ограничений финансирования, но с позиций здравого смысла ограничения должны присутствовать всегда.

3) Прогнозистика – наука, определяющая возможное будущее проектов. Логистика имеет возможности прогнозирования ситуаций и процессов, особенно в области коррекции дальнейших действий управления. Это позволит упростить процедуры принятия решений и их коррекции.

Перечисленные задачи и алгоритмы их решения возникают постоянно и могут быть решены на основе существующих разделов математики. Кроме того, существуют мощные пакеты компьютеризации моделирования, которые имеют множество приложений в области логистических задач. Главное – это четкая формулировка задачи исследования.

Среди множества прикладных задач, которые долгое время считались экзотическими и пригодными только для сугубых математиков, задачи логистики имеют хорошее применение. Например, теория игр [5] может найти применение при анализе вероятных решений логистических задач именно на этапах проектирования и прогнозирования, особенно в регионах Сибири и Дальнего Востока.

Авторы статьи работают в указанном направлении по конкретным проблемам, связанным с достижением конкретных результатов.

Список литературы

1. Джонсон, Дж. Современная логистика [Текст] / Дж. С. Джонсон, Д. Ф. Вуд, Д. Л. Вордлоу. – М.: Вильямс, 2004. – 624 с.
2. Просветов, Г. И. Математические методы в логистике: задачи и решения [Текст] / Г. И. Просветов. – М.: Альфа-Пресс, 2009. – 304 с.
3. Николашин, В. М. Основы логистики [Текст] / В. М. Николашин, А. С. Синицына / Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте. – 2007. – 252 с.
4. Коршунов, Ю. М. Математические основы кибернетики [Текст] / Ю. М. Коршунов. – М.: Энергия. – 1980. – 448 с.
5. Мазалов, В. В. Математическая теория игр и приложения [Текст] / В. В. Мазалов. – СПб: Лань. – 2010. – 448 с.
6. Ильина, У. В. Использование прикладных задач логистики в теории информационной безопасности [Текст] / У. В. Ильина, В. Г. Шахов // Безопасность информационных систем. – 2011. – № 2.

Путь и искусственные сооружения

УДК 624.074: 539.3

В. Б. Мещеряков, З. Л. Аунг

ПОВЕДЕНИЕ ТОНКОСТЕННЫХ СТЕРЖНЕЙ ПРИ УДАРНЫХ НАГРУЗКАХ

Предложена концепция расчета стержней на продольный и поперечный удар массивным телом. Определение параметров контактной силы выполняется на основе теории Г. Герца. Нелинейное интегральное уравнение решается численным методом Эйлера. Колебания стержня после окончания удара рассматриваются с учетом сформировавшихся к этому моменту времени начальных условий. При поперечном ударе по тонкостенным стержням открытого профиля учитываются деформации сдвига.

Проблемой соударения твердых тел интересовались многие ученые. Элементарное решение задачи предложил в 1807 г. Томас Юнг [17]. В этом «первом приближении» кинетическая энергия ударяющего тела приравнивалась к потенциальной энергии ударяемого тела. При этом не учитывалось влияние инерции ударяемого тела. Позднее И. Ходкинсон [15] на основании проведенных им опытов предложил при ударе в среднем сечении шарнирно опертой балки учитывать половину массы балки. Теоретическое обоснование такому подходу дал Х. Кокс [13], он уточнил величину приведенной массы балки как 17/35 от истинной массы. Так появилось «второе приближение» в решении задачи.

Учет появляющихся колебаний при продольном ударе по стержню выполнил Л. Навье [16]. При поперечном ударе этот вопрос исследовал Б. Сен-Венан [12]. Его решение получено в виде бесконечных рядов. При удержании нескольких первых членов ряда это решение совпадает со «вторым приближением» Х. Кокса. В статье [10] С. П. Тимошенко применил теорию Г. Герца [14] к задаче поперечного удара по шарнирно опертой балке. Нелинейное интегральное уравнение для определения контактной силы при ударе решалось пошаговым методом. На каждом шаге искомая сила сохраняла постоянное значение. Зависимость перемещения оси балки в точке удара от контактной силы представлена бесконечным рядом по формам собственных колебаний. Модель балки принята на основе гипотезы Эйлера – Бернулли. Содержание статьи [10] вошло в монографию [11], изданную в 1975 г. под редакцией Э. И. Григорюка.

С основами теории соударения упругих тел можно познакомиться по монографиям В. Гольдсмита [2], С. А. Зегжды [4] и Я. Г. Пановко [8].

Исследование работы стержня на ударное действие состоит из ряда математических операций, и для каждой из них можно выбрать наиболее рациональный подход. Рассмотрим эти операции (этапы) исследования.

Основной задачей в расчетах на удар является определение параметров контактной силы. При этом можно опираться на теорию Г. Герца [14]. Эта теория была ориентирована на определение контактной силы при статическом взаимодействии двух упругих тел. Ее применение к динамическому взаимодействию основано на том, что в зоне контакта наблюдается смятие малых объемов тел, и можно пренебречь силами инерции этих малых объемов. Этой возможностью пользовались Г. Герц и А. Н. Динник [3].

Ввиду возникающего контакта двух тел они вынуждены начать двигаться *совместно*. Перемещение ударяющего тела u_1 должно быть воспринято ударяемым телом. Тела имеют в малой окрестности точки контакта упругие местные деформации, между перемещениями точек контакта имеется небольшое различие – сближение тел u , зависящее от величины контактной силы $P(t)$. Опираясь на теорию Г. Герца [2, 14], можно записать такое уравнение:

$$P(t) = K_0 u^{3/2} = K_0 (u_1 - u_2)^{3/2}. \quad (1)$$

Здесь K_0 – параметр контактной жесткости, зависящий от свойств соударяющихся тел [2].

Путь и искусственные сооружения

Если в уравнение (1) подставить выражения u_1 и u_2 , зависящие от силы $P(t)$, то оно будет служить математической моделью рассматриваемого процесса соударения.

Если ударяющее тело моделируется материальной точкой (массивное тело), то его перемещение можно записать на основе второго закона Ньютона:

$$u_1(t) = \frac{gt^2}{2} + V_0 t - \frac{1}{m} \int_0^t P(\tau)(t-\tau)d\tau. \quad (2)$$

Здесь $V_0 = \sqrt{2gh}$ – начальная скорость соударения; h – высота, с которой падает ударяющее тело. Начало отсчета времени t и перемещения u_1 соответствует моменту касания соударяющихся тел. Отметим, что первое слагаемое правой части выражения (2) опускается ввиду его относительной малости. Этот факт известен из курса теоретической механики – сила тяжести как не имеющая ударного происхождения может не учитываться в данной задаче удара.

Динамическое поведение упругого стержня при центральном продольном воздействии может быть описано дифференциальным уравнением в частных производных:

$$EA \frac{\partial^2 u_2}{\partial z^2} - \rho A \frac{\partial^2 u_2}{\partial t^2} = \delta(z)P(t). \quad (3)$$

Уравнение (3) можно решать, применяя интегральное преобразование Лапласа [5], переходя к уравнению в обыкновенных производных. При этом имеется возможность учета отраженных волн. В уравнении (3) введены обозначения: E – модуль упругости материала; ρ – плотность; A – площадь поперечного сечения; $\delta(z)$ – дельта-функция Дирака; z – координата точек оси стержня.

Отметим, что можно решать однородное уравнение, учитывая силу $P(t)$ в граничных условиях.

При центральном поперечном ударе по бисимметричному тонкостенному стержню его поведение будем описывать системой дифференциальных уравнений в частных производных с учетом деформаций сдвига при изгибе [6, 7]:

$$EI_x \frac{\partial^4 \varphi_x}{\partial z^4} + \rho A \frac{\partial^2 \varphi_x}{\partial t^2} - \rho I_x \left(1 + \frac{E}{Gf_{xx}} \right) \frac{\partial^4 \varphi_x}{\partial z^2 \partial t^2} + \rho I_x \frac{\rho}{Gf_{xx}} \frac{\partial^4 \varphi_x}{\partial t^4} = 0; \quad (4)$$

$$\frac{\partial \xi_y}{\partial z} = \varphi_x - \frac{EI_x}{GA} f_{xx} \left(\frac{\partial^2 \varphi_x}{\partial z^2} - \frac{\rho}{E} \frac{\partial^2 \varphi_x}{\partial t^2} \right). \quad (5)$$

Здесь обозначено: ξ_y – прогиб оси стержня при изгибе; φ_x – угол поворота сечения; G – модуль сдвига; I_x – момент инерции поперечного сечения; f_{xx} – коэффициент формы сечения при изгибе.

Решение уравнений (4), (5) связано с вычислением корней биквадратного частотного уравнения:

$$(\lambda^2 - \lambda_x^2)(\lambda^2 - \lambda_0^2) + \frac{\lambda_x^2}{\mu_x^2 r_x^2} = 0. \quad (6)$$

Здесь обозначено: $\lambda_0 = s/c_0$, $\lambda_x = s/c_x$, $\mu_x = c_0/c_x$; s – параметр преобразования Лапласа; $c_0 = \sqrt{E/\rho}$ – скорость распространения продольной волны; $c_x = \sqrt{Gf_{xx}/\rho}$ – скорость распространения волны сдвига при изгибе.

Корни уравнения (6) можно записать таким образом:

Путь и искусственные сооружения

$$\lambda = \pm \lambda_0 \frac{\sqrt{2}}{2} \sqrt{(1 + \mu_x^2) \pm (1 - \mu_x^2) \sqrt{1 - \varepsilon}}, \quad (7)$$

со следующим обозначением малой величины ε при больших значениях s :

$$\varepsilon = \frac{4c_0^2}{r_x^2 s^2 (1 - \mu_x^2)^2}. \quad (8)$$

В области оригиналов большим значениям s соответствуют малые значения времени t , что характерно для процесса удара.

Для получения приближенных значений корней используем дважды разложение выражения (7) в степенной ряд по параметру ε с удержанием двух слагаемых при каждом разложении. Если ограничиться в оригиналах трехкратными интегралами, то получаем:

$$\begin{cases} \lambda_1 = \pm \left(\frac{s}{c_0} + \frac{c_0}{2r_x^2 s (\mu_x^2 - 1)} \right); \\ \frac{1}{\lambda_1} = \pm \left(\frac{c_0}{s} - \frac{c_0^3}{2r_x^2 s^3 (\mu_x^2 - 1)} \right); \end{cases} \quad (9)$$

$$\begin{cases} \lambda_2 = \pm \left(\frac{s\mu_x}{c_0} - \frac{c_0}{2r_x^2 s \mu_x (\mu_x^2 - 1)} \right); \\ \frac{1}{\lambda_2} = \pm \left(\frac{c_0}{s\mu_x} + \frac{c_0^3}{2r_x^2 s^3 \mu_x^3 (\mu_x^2 - 1)} \right). \end{cases} \quad (10)$$

При эксцентричном поперечном ударе по бисимметричному тонкостенному стержню необходимо дополнительно рассматривать систему дифференциальных уравнений в частных производных с учетом деформаций сдвига при кручении [6, 7]:

$$EI_{\omega} \frac{\partial^4 \Phi_{\omega}}{\partial z^4} - GI_d \frac{\partial^2 \Phi_{\omega}}{\partial z^2} + Ar^2 \frac{\partial^2 \Phi_{\omega}}{\partial t^2} - I_{\omega} \left(+ \frac{E}{Gf_{\omega\omega}} \right) \frac{\partial^4 \Phi_{\omega}}{\partial z^2 \partial t^2} + I_{\omega} \frac{\partial^4 \Phi_{\omega}}{\partial t^4} = \quad (11)$$

$$\frac{\partial \xi_{\omega}}{\partial z} = \Phi_{\omega} - \frac{EI_{\omega} f_{\omega\omega}}{GAr^2} \left(\frac{\partial^2 \Phi_{\omega}}{\partial z^2} - \frac{\rho}{E} \frac{\partial^2 \Phi_{\omega}}{\partial t^2} \right), \quad (12)$$

где ξ_{ω} – угол закручивания стержня вокруг центра тяжести;

Φ_{ω} – мера депланации сечения;

I_{ω} – секториальный момент инерции поперечного сечения;

I_d – момент чистого кручения;

$f_{\omega\omega}$ – коэффициент формы сечения при кручении;

$r = \sqrt{(I_x + I_y)/A}$ – полярный радиус инерции сечения.

Характеристическое уравнение при кручении имеет вид:

$$\lambda^4 - \left(\frac{\alpha}{\mu_{\omega}^2 r_{\omega}^2} + \lambda_0^2 + \lambda_{\omega}^2 \right) \lambda^2 + \left(\frac{\alpha}{\mu_{\omega}^2 r_{\omega}^2} + \lambda_0^2 \right) \lambda_{\omega}^2 + \frac{\lambda_{\omega}^2}{\mu_{\omega}^2 r_{\omega}^2} = 0. \quad (13)$$

Здесь введены обозначения: $\mu_{\omega} = \frac{c_0}{c_{\omega}}$; $r_{\omega}^2 = \frac{I_{\omega}}{Ar^2}$; $\alpha = \frac{I_d}{Ar^2 f_{\omega\omega}}$; $\lambda_{\omega} = s/c_{\omega}$; $c_{\omega} = \sqrt{Gf_{\omega\omega}/\rho}$ –

скорость распространения волны сдвига при кручении.

Путь и искусственные сооружения

Безразмерная величина α для стандартных двутавров находится в диапазоне 0,0023 – 0,0122. Ею можно пренебречь. Опуская подробности, для корней характеристического уравнения получаем приближенные выражения:

$$\begin{cases} \lambda_3 = \pm \left(\frac{s}{c_0} + \frac{c_0}{2sr_\omega^2(\mu_\omega^2 - 1)} \right); \\ \frac{1}{\lambda_3} = \pm \left(\frac{c_0}{s} - \frac{c_0^3}{2r_\omega^2 s^3 (\mu_\omega^2 - 1)} \right); \end{cases} \quad (14)$$

$$\begin{cases} \lambda_4 = \pm \left(\frac{s\mu_\omega}{c_0} - \frac{c_0}{2sr_\omega^2 \mu_\omega (\mu_\omega^2 - 1)} \right); \\ \frac{1}{\lambda_4} = \pm \left(\frac{c_0}{s\mu_\omega} + \frac{c_0^3}{2r_x^2 s^3 \mu_\omega^3 (\mu_\omega^2 - 1)} \right). \end{cases} \quad (15)$$

Нелинейное интегральное уравнение (1) с внесенными в него аналитическими выражениями $u_1(P, t)$ и $u_2(P, t)$ можно решать численно, например, пользуясь методом Эйлера. Шаг по времени следует согласовать с длительностью удара. В аналитических выражениях учитывается внутреннее трение в материале стержня [9].

По окончании ударного взаимодействия ударяющее тело может получить отрицательную скорость, т. е. может «отскочить». В этом случае необходимо рассмотреть повторные соударения. Если ударяющее тело остается в контакте с ударяемым, то его массу следует учесть при вычислении частоты и периода свободных колебаний ударяемого тела, которые возникают после удара. Учет массы ударника может быть выполнен с использованием понятия «приведенной массы» ударяемого тела.

Начальными условиями для свободных колебаний после удара служат перемещение и скорость точки контакта ударяемого тела, зафиксированные в момент окончания удара ($P(t) = 0$). При колебаниях учитывается внутреннее трение в материале стержня.

Рассмотрим удар массивного тела, падающего с некоторой высоты на колонну (рисунок 1). Исходные данные для решения задачи приведены в таблице 1. Расчеты проведены в соответствии с изложенной концепцией. Аналитическое выражение для перемещения ударяемого тела в точке удара имеет вид:

$$u_2(0, t) = \frac{1}{\rho A c_0} \exp\left(-\frac{\gamma\pi}{2L} c_0 t\right) \left[\int_0^t P(\tau) d\tau + 2 \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n \int_{nt^*}^t P(\tau) d\tau \right] \quad (16)$$

где $t_* = 2L/c_0$ – время пробега волны растяжения-сжатия от точки соударения до конца стержня и обратно; γ – коэффициент внутреннего трения в материале.

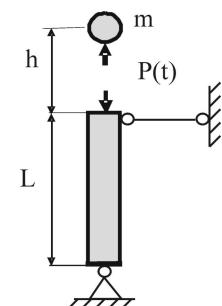


Рисунок 1 – Расчетная схема

Таблица 1 – Исходные данные для расчета

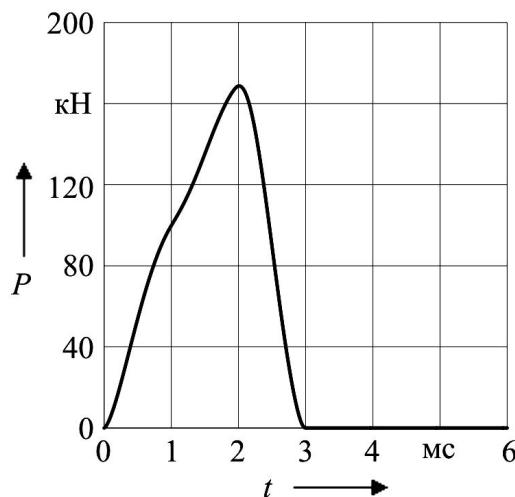
Наименование параметра	Числовое значение параметра
Масса ударяющего тела m , кг	120
Начальная скорость удара, V_0 , м/с	1,6
Площадь поперечного сечения колонны (двутавр №18) A , м^2	0,00268
Высота колонны L , м	2,5
Контактная жесткость K_0 , $\text{Нм}^{-\frac{3}{2}}$	$3 \cdot 10^9$
Коэффициент внутреннего трения, γ	0,025

Путь и искусственные сооружения

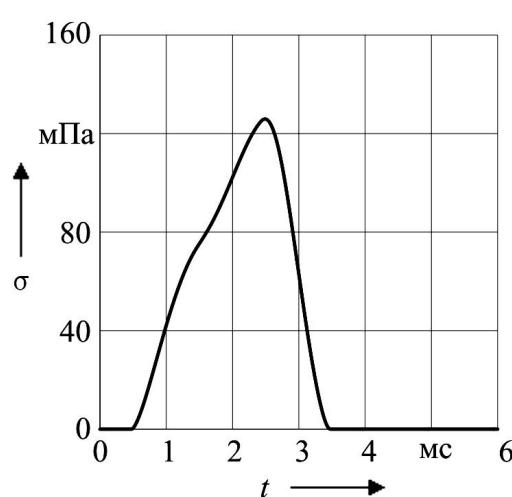
Нелинейное интегральное уравнение для определения контактной силы $P(t)$ имеет вид:

$$\left[\frac{P(t)}{K_0} \right]^{2/3} = V_0 t - \frac{1}{m} \int_0^t P(\tau)(t-\tau)d\tau - \frac{1}{\rho A c_0} \exp\left(-\frac{\gamma\pi}{2L} c_0 t\right) \left[\int_0^t P(\tau)d\tau + 2 \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n \int_{nt_*}^t P(\tau)d\tau \right]. \quad (17)$$

Шаг счета по времени был принят равным 10 мкс. Период колебаний после удара равен 772 мкс. В таблице 2 приведены максимальные значения параметров, на рисунках 2 и 3 показаны графики силовых и кинематических параметров.

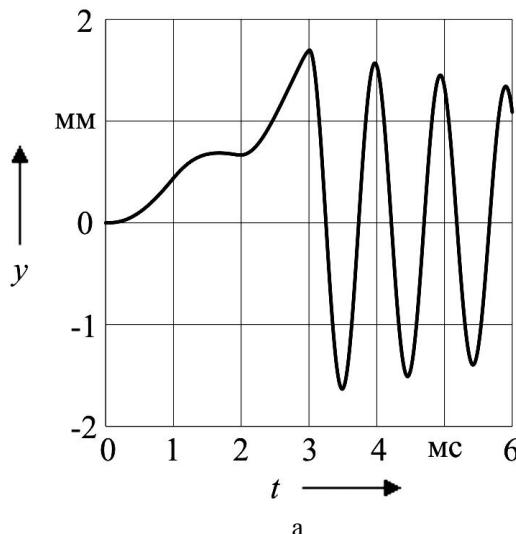


а

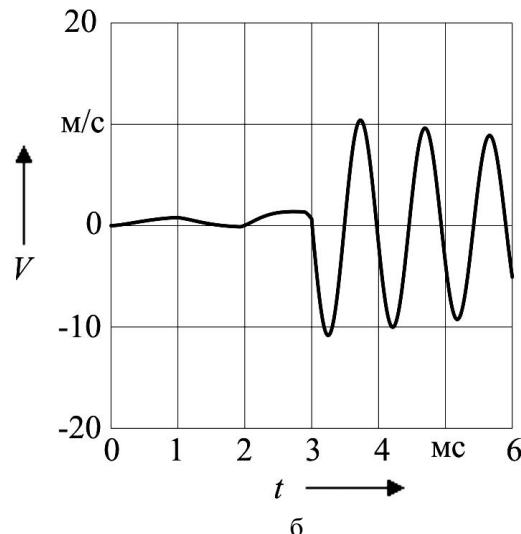


б

Рисунок 2 – Контактная сила (а) и напряжение сжатия (б) колонны



а



б

Рисунок 3 – Перемещение (а) и скорость (б) торцевого сечения колонны

Таблица 2 – Максимальные значения параметров и временные характеристики продольного удара

Наименование и размерность параметра	Числовое значение параметра	Момент времени, мкс
Контактная сила P , кН	168,7	2010
Количество отраженных волн, шт.	3	965, 1931, 2896
Реакция в опорном сечении, кН	337,4	2490
Перемещение y , мм	1,699	3010
Скорость V , м/с	10,841	3250
Нормальное напряжение, МПа	125,9	2590
Период колебаний после удара, мкс	772	После 3000 мкс

Путь и искусственные сооружения

Как видно по приведенным результатам (см. таблицу 2), процесс удара продолжался 3500 мкс, за это время успели прийти четыре отраженные волны. Ударяющее тело отскочило, повторный удар произойдет через 141600 мкс со скоростью 1,39 м/с.

Рассмотрим поперечный удар массивного тела по шарнирно закрепленному двутавру № 55 (рисунок 4). Исходные данные для решения задачи приведены в таблице 3.

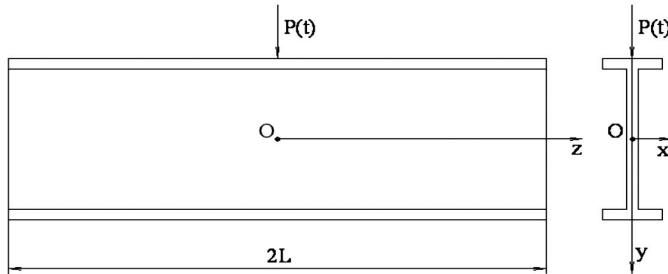


Рисунок 4 – Двутавровый стержень, испытывающий поперечный удар в среднем сечении (опорные устройства не показаны)

Таблица 3 – Исходные данные для расчета

Наименование и размерность параметра	Числовое значение параметра
Масса ударяющего тела m , кг	240
Начальная скорость удара V_0 , м/с	1,9
Площадь поперечного сечения двутавра № 50 А, м^2	0,0118
Длина двутавра $2L$, м	5
Момент инерции I_x , м^4	0,00055962
Коэффициент внутреннего трения γ	0,025

Расчеты проведены в соответствии с изложенной концепцией. Аналитические выражения перемещения ударяемого тела в точке удара и изгибающего момента в среднем сечении имеют вид:

$$\xi_y(P, t) = \frac{c_0}{2\rho I_x} \left[\exp\left(-\frac{1}{2} p_1 t\right) \left(\int_0^t d\tau_2 \int_0^{\tau_2} d\tau_1 \int_0^{\tau_1} P(\tau) d\tau + 2 \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n \int_{nt_*}^t d\tau_2 \int_0^{\tau_2} d\tau_1 \int_0^{\tau_1} P(\tau) d\tau \right) + \right. \\ \left. + \frac{1}{\mu_x} \exp\left(-\frac{1}{2} p_1 t\right) \left(\int_0^t d\tau_2 \int_0^{\tau_2} d\tau_1 \int_0^{\tau_1} P(\tau) d\tau + 2 \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n \int_{nt_*}^t d\tau_2 \int_0^{\tau_2} d\tau_1 \int_0^{\tau_1} P(\tau) d\tau \right) \right]; \quad (18)$$

$$M_x(0, t) = -\frac{c_0}{2} \exp\left(-\frac{1}{2} p_1 t\right) \left[\int_0^t P(\tau) d\tau + 2 \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n \int_{nt_*}^t P(\tau) d\tau \right]. \quad (19)$$

Здесь введены следующие времена пробега волн от точки удара до опоры и обратно (L – половина длины стержня): $t_* = 2L/c_0$ – волны поворота сечений; $t_{**} = t_* \mu_x$ – волны сдвига; p_1 – первая частота изгибных колебаний.

Нелинейное интегральное уравнение для определения контактной силы $P(t)$ можно записать в виде:

$$[P(t)/K_0]^{2/3} = V_0 t - \frac{1}{m} \int_0^t P(\tau) (t - \tau) - \xi_{0y} P \, t \quad (20)$$

где перемещение $\xi_{0y}(P, t)$ определяется в точке удара.

Шаг счета по времени был принят равным 20 мкс. В таблице 4 приведены максимальные значения параметров, на рисунках 5 и 6 показаны графики силовых и кинематических па-

Путь и искусственные сооружения

метров. Пунктирные линии на графиках построены без учета деформаций сдвига, по теории В. З. Власова [1].

Таблица 4 – Максимальные значения параметров при ударе

Наименование и размерность параметра	Числовое значение параметра	
	с учетом сдвига	без учета сдвига
Контактная сила P , кН	61,65	71,11
Изгибающий момент, кНм	69,66	88,74
Нормальное напряжение, МПа	34,2	43,6
Перемещение y , мм	28,0	25,6
Скорость V , м/с	8,39	7,98
Момент окончания удара, мкс	820	920
Период свободных колебаний, мс	21,46	20,46

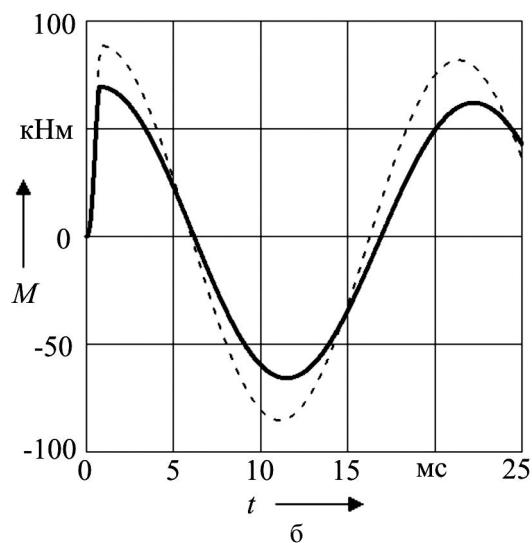
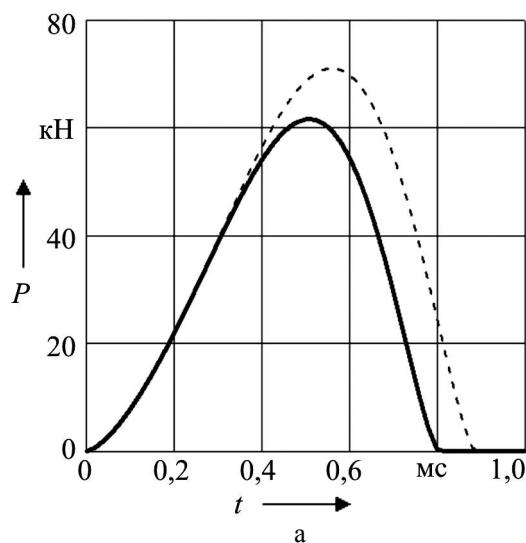


Рисунок 5 – Контактная сила (а) и изгибающий момент (б) в среднем сечении стержня

Как видно по приведенным результатам (см. таблицу 4), процесс удара продолжался менее одной миллисекунды, за это время отраженные волны прийти не успели. Ударяющее тело осталось на ударяемом теле. Его масса была учтена при определении частоты и периода свободных колебаний после удара. Ученые в расчетах деформации сдвига при изгибе повлияли таким образом: силовые параметры уменьшились на 15 – 28 %, кинематические увеличились на 4 – 10 %.

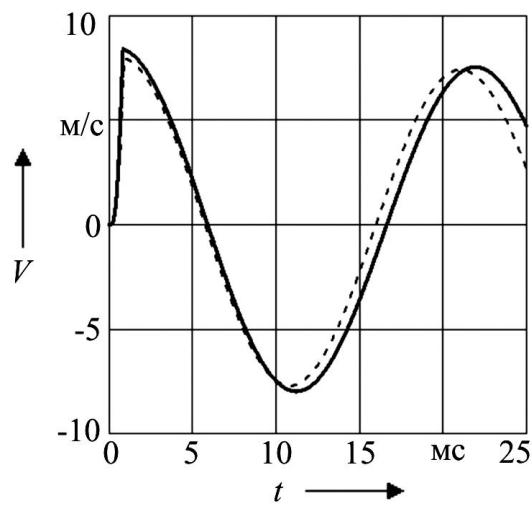
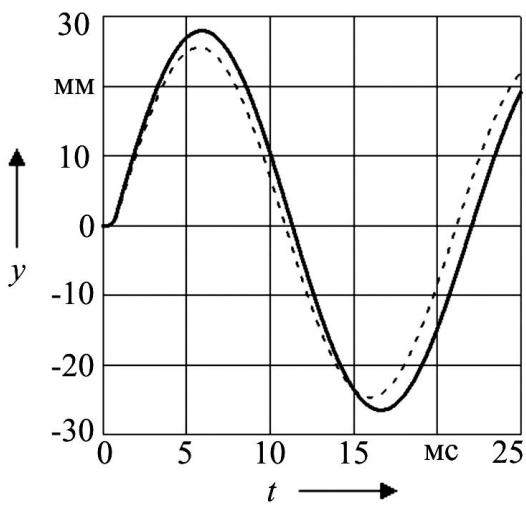


Рисунок 6 – Перемещение (а) и скорость (б) центра тяжести среднего сечения

Путь и искусственные сооружения

Рассмотрим поперечный удар в среднем сечении шарнирно закрепленного двутавра № 50 с учетом эксцентрикитета (рисунок 7) при тех же условиях удара. Дополнительные исходные данные для проведения расчетов приведены в таблице 5.

Таблица 5 – Дополнительные исходные данные к задаче

Наименование и размерность параметра	Числовое значение параметра
Эксцентрикитет e_x , м	0,02
Секториальный момент инерции I_ω , м ⁶	$8,605 \cdot 10^{-7}$
Момент инерции при чистом кручении I_d , м ⁴	$9,13 \cdot 10^{-7}$

Расчеты проведены в соответствии с изложенной концепцией. Аналитические выражения угла закручивания, а также силовых параметров получены в таком виде:

$$\xi_\omega(P, t) = \frac{c_0(\mu_\omega + 1)e_x}{2\rho I_\omega \mu_\omega} \exp\left(-\frac{1}{2} p_{1\omega} t\right) \int_0^t d\tau_2 \int_0^{\tau_2} d\tau_1 \int_0^{\tau_1} P(\tau) d\tau; \quad (21)$$

$$\xi_\omega(P, t) = \frac{c_0(\mu_\omega + 1)e_x}{2\rho I_\omega \mu_\omega} \exp\left(-\frac{1}{2} p_{1\omega} t\right) \int_0^t d\tau_2 \int_0^{\tau_2} d\tau_1 \int_0^{\tau_1} P(\tau) d\tau, \quad M_\omega(0, t) = \frac{e_x}{2} P(t); \quad (22)$$

$$B_\omega(0, t) = -\left[\frac{c_0 e_x}{2} \int_0^{t_1} P(\tau) d\tau \right] \exp\left(-\frac{1}{2} p_{1\omega} t\right), \quad M_d(0, t) = -\frac{\alpha e_x c_0^2}{2 \mu_\omega^2 r_\omega^2} \int_0^t d\tau_1 \int_0^{\tau_1} P(\tau) d\tau. \quad (23)$$

Возникающая при соударении контактная сила $P(t)$ может быть определена из нелинейного интегрального уравнения:

$$\left[P(t)/K_0 \right]^{2/3} = V_0 t - \frac{1}{m} \int_0^t P(\tau) (t - \tau - d) - \xi_{y\omega}(P, t), \quad (24)$$

где $\xi_{y\omega}(P, t) = \xi_y(P, t) + e_x \xi_\omega(P, t)$ в точке удара.

Шаг счета по времени был принят равным 20 мкс. В таблице 6 приведены максимальные значения параметров, на рисунках 8 – 11 показаны графики силовых и кинематических параметров.

Таблица 6 – Максимальные значения параметров при ударе

Наименование и размерность параметра	Числовое значение параметра	
	с учетом сдвига	без учета сдвига
Контактная сила P , кН	55,99	64,86
Изгибающий момент M_x , кНм	59,13	75,95
Нормальное напряжение σ_x , МПа	29,1	37,3
Бимомент B_ω , кНм	1,186	1,522
Нормальное напряжение σ_ω , МПа	29,1	37,3
Изгибо-крутящий момент M_ω , кНм	0,560	0,646
Момент чистого кручения M_d , кНм	0,568	0,805
Перемещение y , мм	21,8	20,3
Скорость V , м/с	6,52	6,32
Момент окончания удара, мкс	760	840
Период изгибных колебаний, мс	21,5	20,5
Период крутильных колебаний, мс	61,9	61,8

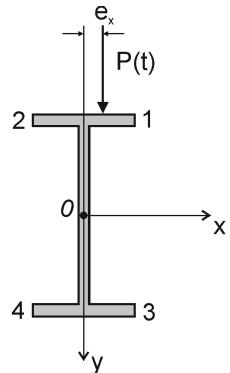


Рисунок 7 – Среднее сечение двутавра ($z = 0$)

Путь и искусственные сооружения

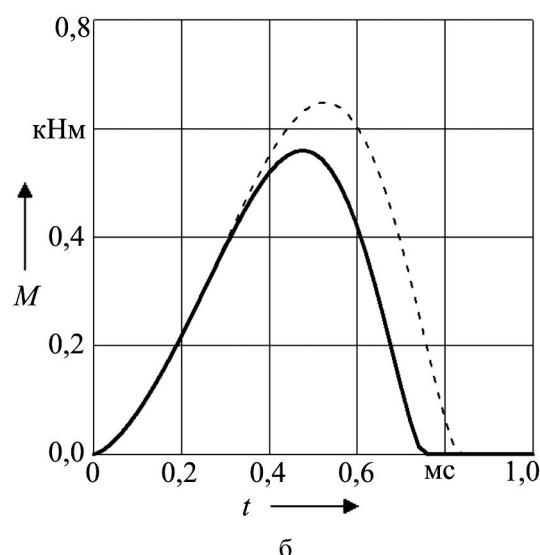
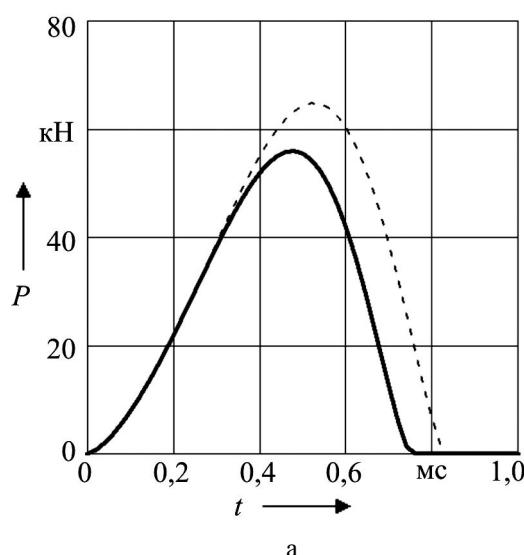


Рисунок 8 – Контактная сила (а) и изгибно-крутящий момент (б) в среднем сечении стержня

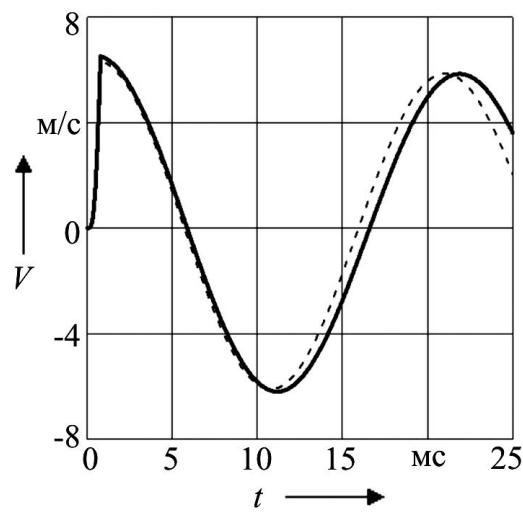
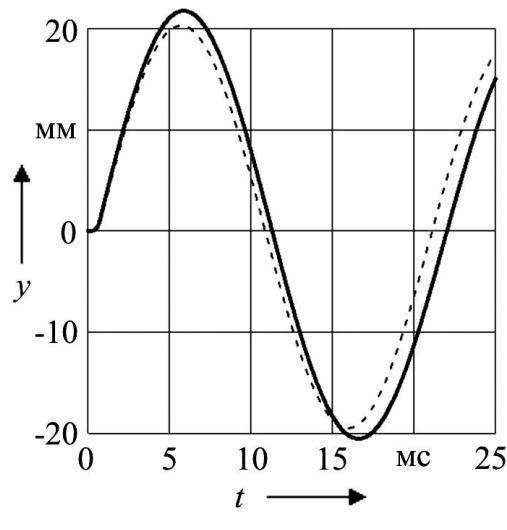


Рисунок 9 – Перемещение (а) и скорость (б) центра тяжести среднего сечения стержня

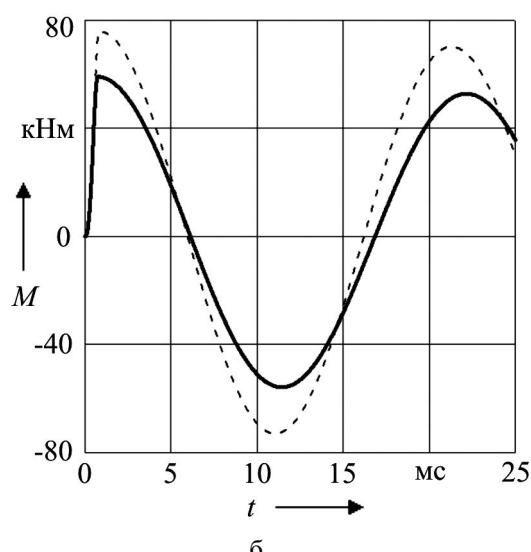
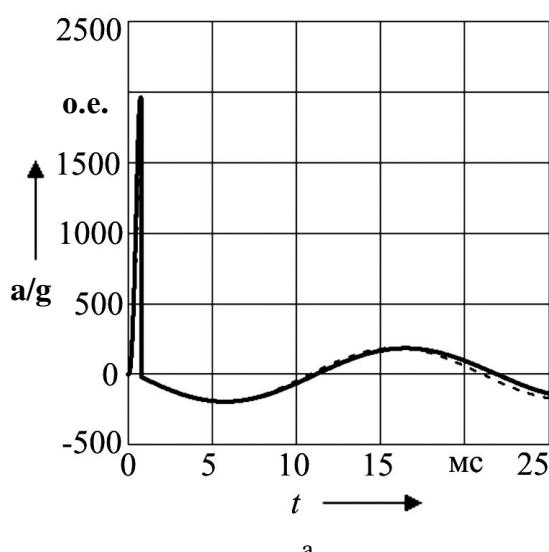


Рисунок 10 – Ускорение (а) и изгибающий момент (б) центра тяжести среднего сечения двутавра

Путь и искусственные сооружения

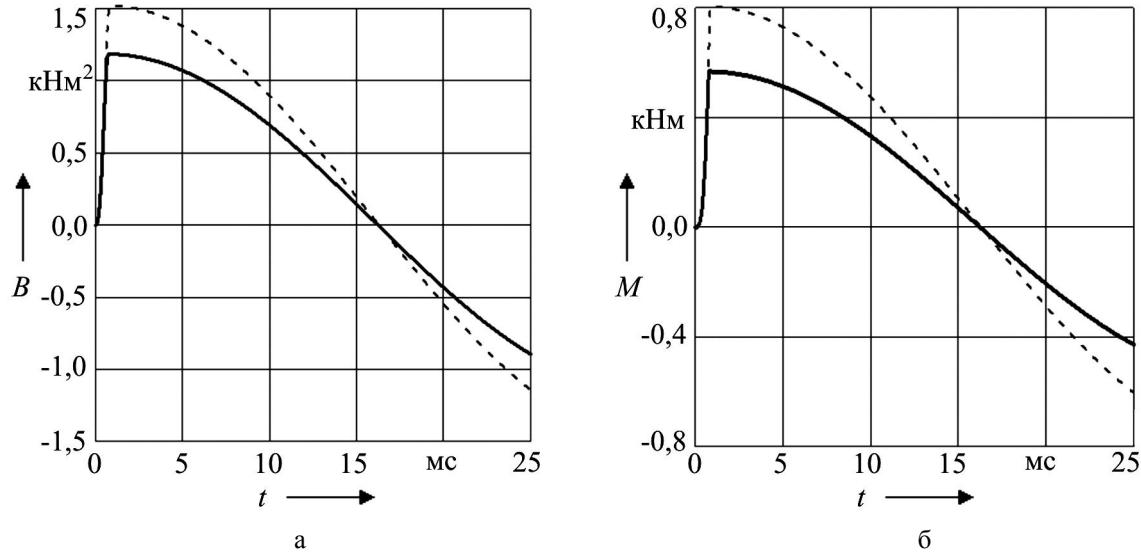


Рисунок 11 – Бимомент (а) и момент чистого кручения (б) в среднем сечении двутавра

Как видно из приведенных результатов (см. таблицу 6), процесс удара продолжался еще меньше во времени по сравнению с центральным ударом. Ученые в расчетах деформации сдвига при изгибе и кручении повлияли таким образом: силовые параметры уменьшились на 16 – 29 %, кинематические увеличились на 2 – 8 %. По сравнению с центральным ударом кинетическая энергия, полученная двутавром при ударе, распределилась между изгибом и кручением. Ввиду этого силовые параметры при изгибе уменьшились.

В заключение можно отметить, что в приведенных примерах проявились все предусмотренные в предложенной концепции ситуации (влияние отраженных волн, учет массы удара тела в определении частоты колебаний после удара и т. д.).

Получаемые на основании расчета данные позволяют оценивать прочность и жесткость стержней при действии ударных нагрузок.

Список литературы

1. Власов, В. З. Тонкостенные упругие стержни [Текст] / В. З. Власов. – М.: Физматгиз, 1959. – 568 с.
2. Гольдсмит, В. Удар. Теория и физические свойства соударяющихся тел [Текст] / В. Гольд-смит. – М.: Стройиздат, 1965. – 447 с.
3. Динник, А. Н. Удар и сжатие упругих тел [Текст] / А. Н. Динник // Избранные труды АН УССР. – Киев, 1952. – Т. 1. – С. 13 – 114.
4. Зегжда, С. А. Соударение упругих тел [Текст] / С. А. Зегжда. – Санкт-Петербургский гос. ун-т. – СПб, 1997. – 316 с.
5. Корн, Г. А. Справочник по математике для научных работников и инженеров [Текст] / Г. А. Корн, Т. М. Корн. – М.: Наука, 1973. – 832 с.
6. Мещеряков, В. Б. О распространении изгибо-крутильных волн в тонкостенных стержнях открытого профиля [Текст] / В. Б. Мещеряков // ПММ. – 1977. – Т. 41. – Вып. 2. – С. 372 – 375.
7. Мещеряков, В. Б. Динамика тонкостенных стержней открытого профиля [Текст] / В. Б. Мещеряков, Е. В. Чефанова // Вестник МИИТа. – 2000. – Вып. 3. – С. 123 – 130.
8. Пановко, Я. Г. Введение в теорию механического удара [Текст] / Я. Г. Пановко – М.: Наука, 1977. – 224 с.
9. Сорокин, Е. С. К теории внутреннего трения при колебаниях упругих систем [Текст] / Е. С. Сорокин. – М.: Госстройиздат, 1960. – 131 с.
10. Тимошенко, С. П. К вопросу о действии удара на балку [Текст] / С. П. Тимошенко // Известия Санкт-Петербургского политехн. ин-та. – СПб, 1912. – Вып. 2. – Т. 17. – С. 407 – 425.

Путь и искусственные сооружения

11. Тимошенко, С. П. Прочность и колебания элементов конструкций [Текст] / С. П. Тимошенко. – М.: Наука, 1975. – 576 с.
12. Clebsch, A. Teorie de l'elasticite des corps solides /Traduite par Saint-Venant et Flamant/ [Текст] / A. Clebsch. – Paris, Dunod, 1883. – 900 p.
13. Cox, H. On impact on elastic beams [Текст] / H. Cox // Trans. of the Cambridge Philos. Soc., 1851. – Vol. 9. – P. 1. – P. 73 – 78.
14. Hertz, H. Über die Beruhrung fester elastisher Korper (On the contact of the elastic solids) [Текст] / H. Hertz // J. Reine und Angewandte Mathematik, 1882. – B. 92. – P.156 – 171.
15. Hodkinson, E. Experimental researches on the strength of iron. Report of the Commissioners appointed to inquire into the application of iron to railway structures [Текст] / E. Hodkinson // Appendix A. London, 1849. – P. 1–114.
16. Navier, L. M. Resume des lecons donnees a l'ecole des ponts et chausses sur l'application de la mecanique a l'establissement des constructions et des machines[Текст] / L. M. Navier // Premiere partie, 3-me edition, Paris: Dunod. – Fascicule II, 1864. – T. 1.– 853 p.
17. Young, Th. A course of lectures on natural philosophy and the mechanical arts [Текст] / Th. Young. – London, 1807. – Vol. 1. – XXIV – 796 p.
18. Мещеряков, В. Б. Устойчивость стержней при продольном и поперечном ударе [Текст] / В. Б. Мещеряков, З. Л. Аунг // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2012. – № 1. – С. 98 – 106.

АННОТАЦИИ

УДК 621.791.75

К ВОПРОСУ ПРИМЕНЕНИЯ КЕРАМИЧЕСКИХ ФЛЮСОВ НА ОСНОВЕ МИНЕРАЛЬНЫХ КОНЦЕНТРАТОВ ДЛЯ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ ПОДВИЖНОГО СОСТАВА

Бабенко Эдуард Гаврилович

Дальневосточный государственный университет путей сообщения (ДВГУПС).

680021, г. Хабаровск, ул. Серышева, 47.

Доктор технических наук, профессор кафедры «Технология металлов», ДВГУПС.

Тел.:(4212) 40-70-99.

E-mail: tm@festu.khv.ru

Кузьмичев Евгений Николаевич

Дальневосточный государственный университет путей сообщения (ДВГУПС).

680021, г. Хабаровск, ул. Серышева, 47.

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Тепловозы и тепловые двигатели», ДВГУПС.

Тел.:(4212) 40-72-28.

E-mail: accord@festu.khv.ru

Новачук Ярослав Антонович

Дальневосточный государственный университет путей сообщения (ДВГУПС).

680021, г. Хабаровск, ул. Серышева, 47.

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Тепловозы и тепловые двигатели», ДВГУПС.

Тел.: (4212) 40-75-81.

E-mail: novachuk@inbox.ru

Представлены результаты экспериментальных исследований по созданию легирующих вольфрамсодержащих керамических флюсов для автоматической наплавки низколегированных сталей на основе многокомпонентного минерального сырья Дальнего Востока. Созданы флюсы, при использовании которых содержание вольфрама в наплавленном металле составляет 0,3 – 6,9 мас. % и можно формировать покрытия с широким диапазоном эксплуатационных свойств.

Ключевые слова: наплавка под флюсом, низкоуглеродистая проволока, керамический флюс, шеелитовый концентрат, вольфрам, износстойкость, ударная вязкость.

THE PROSPECTS OF APPLICATION OF CERAMIC FLUXES ON THE BASIS OF MINERAL CONCENTRATES FOR RESTORATION OF DETAILS OF THE ROLLING STOCK

Babenko Edward Gavrilovich

Far Eastern State Transport University (FESTU).

47, Str. Serysheva, Khabarovsk, 680021, Russia.

Dr.Sci.Tech., professor of department «Technology metals», FESTU.

Phone: (4212) 40-70-99.

E-mail: tm@festu.khv.ru

АННОТАЦИИ

Kuzmichev Evgeny Nikolaevich

Far Eastern State Transport University (FESTU).

47, Str. Serysheva, Khabarovsk, 680021, Russia.

Cand.Tech.Sci., the senior lecturer of department «Locomotives and thermal engines», FESTU.

Phone: (4212) 40-72-28.

E-mail: accord@festu.khv.ru

Novachuk Yaroslav Antonovich

Far Eastern State Transport University (FESTU).

47, Str. Serysheva, Khabarovsk, 680021, Russia.

Cand.Tech.Sci., the senior lecturer of department «Locomotives and thermal engines», FESTU.

Phone: (4212) 40-75-81.

E-mail: novachuk@inbox.ru

The results of pilot studies on creation of containing ceramic flux alloying tungsten for automatic melting of low-alloyed steel on the basis of multicomponent mineral raw materials of the Far East are presented. The fluxes at the use of which content of tungsten in melting metal equals 0,3 ... 6,9 mas. % are created. This allows to form covering with a wide range of operational properties.

Keywords: *melting under flux, low-carbon alloy a welding wire, ceramic flux, scheelite concentrate, tungsten, wear resistance, impact strength.*

УДК 629.424.3:621.436

ИССЛЕДОВАНИЕ НАДЕЖНОСТИ РАБОТЫ И СРЕДСТВ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ТОПЛИВНОЙ АППАРАТУРЫ ДИЗЕЛЕЙ

Балагин Дмитрий Владимирович

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.

Аспирант, инженер кафедры «Локомотивы», ОмГУПС.

Тел.: (3812) 31-34-17.

E-mail: BalaginDV@omgups.ru

В статье выполнен анализ отказов и эффективности средств диагностирования технического состояния топливной аппаратуры дизелей в условиях эксплуатации.

Ключевые слова: *топливная аппаратура, дизель, тепловизионный контроль, трубопровод высокого давления, топливный насос высокого давления, форсунка, цилиндр, пирометр, тепловизор, термограмма.*

АННОТАЦИИ

RESEARCH OF RELIABILITY OF WORK AND DIAGNOSTIC DEVICES OF THE TECHNICAL CONDITION FUEL EQUIPMENTS OF DIESEL ENGINES

Balagin Dmitry Vladimirovich

Omsk State Transport Univirsity (OSTU).

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

The post-graduate student, engineer of departament «Locomotives», OSTU.

Phone: (3812) 31-34-17.

E-mail: BalaginDV@omgups.ru

In article it is analyzed refusals and efficiency diagnostic devices of a technical condition fuel equipments of diesel engines under operating conditions.

Keywords: *fuel equipment, diesel engine, thermavision control, pipeline of a high pressure, fuel pump of a high pressure, fuel injectors, cylinder, pyrometer, thermal imager, heat pattern.*

УДК 629.423.31

ПОВЫШЕНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН МЕТОДОМ ХИМИКО-ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

Белан Дмитрий Юрьевич

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.

Кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры «Технология транспортного машиностроения и ремонта подвижного состава», ОмГУПС.

Тел.: (3812) 31-18-11.

Ражковский Александр Алексеевич

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Технология транспортного машиностроения и ремонта подвижного состава», ОмГУПС.

Тел.: (3812) 31-18-11.

Данная статья посвящена описанию методики упрочнения углеродом медной поверхности коллектора. Для улучшения коммутационных характеристик и повышения надежности работы электрических машин предлагается использовать метод химико-термической обработки.

Ключевые слова: *тяговый электродвигатель, коллекторно-щеточный узел, температура, упрочнение, износостойкость.*

АННОТАЦИИ

IMPROVING PERFORMANCE ELECTRIC MACHINES BY CHEMICAL-HEAT TREATMENT

Belan Dmitry Urevich

Omsk State Transport Univirsity (OSTU).

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

Cand.Tech.Sci., the senior lecturer of departament «Technology of transport machine-building and repair of rolling stock», OSTU.

Phone: (3812) 31-18-11.

Razhkovsky Alexander Alexeevich

Omsk State Transport Univirsity (OSTU).

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

Cand.Tech.Sci., the senior lecturer of departament «Technology of transport machine-building and repair of rolling stock», OSTU.

Phone: (3812) 31-18-11.

This article is dedicated to strengthening the carbon surface of a copper collector. To improve the switching characteristics and improve the reliability of electric machines is proposed to use the method of chemical-thermal treatment.

Keywords: *traction motor, the collector-brush unit, temperature, hardening, wear resistance.*

УДК 621.333-83: 629.424.1

ПРИМЕНЕНИЕ МИКРОПРОЦЕССОРНЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧЕЙ ТЕПЛОВОЗОВ ДЛЯ РЕАЛИЗАЦИИ ОПТИМАЛЬНЫХ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ДИЗЕЛЕЙ

Володин Александр Иванович

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.

Доктор технических наук, профессор, действительный член Российской академии транспорта, заслуженный деятель науки РФ, первый проректор, проректор по учебной работе, ОмГУПС.

Тел.: (3812) 31-06-00.

Сергеев Сергей Валерьевич

ОАО «ВНИКТИ».

140402, Московская область, г. Коломна, ул. Октябрьской рев., 410.

Заведующий отделом ТССП.

Тел.: (496) 618-84-07.

Кирьяков Максим Николаевич

ОАО «ВНИКТИ».

140402, Московская область, г. Коломна, ул. Октябрьской рев., 410.

Ведущий инженер.

АННОТАЦИИ

Тел.: (496) 618-84-07.
E-mail: Maxim_kir@rambler.ru

В данной статье описано применение микропроцессорных систем управления электропередачей тепловозов для реализации оптимальной тепловозной характеристики, обеспечивающей минимальный расход топлива тепловозами в эксплуатации.

Ключевые слова: микропроцессорная система управления, электропередача тепловоза, оптимальная тепловозная характеристика, объект регулирования, оптимальная настройка, топливная экономичность.

APPLICATION OF MICROPROCESSOR CONTROL SYSTEMS ELECTRO TRANSMISSION OF LOCOMOTIVES FOR THE REALIZATION OF OPTIMAL MODES OF OPERATION OF DIESEL ENGINES

Volodin Alexander Ivanovich

Omsk State University of Transport (OSTU).
35, Marx av., Omsk, 644046, Russia.
Doctor of technical sciences, professor, the full member Russian academy transport, the honoured worker of science of the Russian Federation, the first pro-rector, the pro-rector on study.
Phone: (3812) 31-06-00.

Sergeyev Sergey Valeryevich

Open society «VNIKTI».
410, Oktyabrskaya st., Moscow, 140402.
Head of department of TSSR.
Ph.: (496) 618-84-07.

Kirjakov Maxim Nikolaevich

Open society «VNIKTI».
410, Oktyabrskaya st., Moscow, 140402.
The leading engineer.
Phone: (496) 618-84-07.
E-mail: Maxim_kir@rambler.ru

In this article application of microprocessor control systems by an electricity transmission of locomotives for implementation of the optimum diesel characteristic providing the minimum fuel consumption with locomotives in operation is described.

Keywords: microprocessor control system, locomotive electricity transmission, optimum diesel characteristic, object of regulation, optimum control, fuel profitability.

УДК 629.4.048.3:681.5.017

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВАГОННОГО КОНДИЦИОНЕРА С ПОВЫШЕННОЙ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТЬЮ

Громов Антон Юрьевич

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

АННОТАЦИИ

644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.

Аспирант кафедры «Вагоны и вагонное хозяйство», ОмГУПС.

Тел.: 8-903-926-74-46.

E-mail: gromov_omsk@mail.ru

В статье представлены методика и результаты экспериментальных исследований возможности повышения холодопроизводительности установки кондиционирования воздуха в составе пассажирского вагона без дополнительных затрат электрической энергии на работу компрессора.

Ключевые слова: пассажирский вагон, установка кондиционирования воздуха, теплообмен, солнечная радиация, температурный напор, холодопроизводительность.

PILOT STUDIES OF THE RAILWAY CONDITIONER WITH THE INCREASED THERMODYNAMIC EFFICIENCY

Gromov Anton Yurjevich

Omsk State University of Transport (OSTU).

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

The post-graduate student of chair «Cars and carload economy», OSTU.

Phone: 8-903-926-74-46.

E-mail: gromov_omsk@mail.ru

In article the technique and results of the pilot studies of increase possibility the railway car air condition system cooling capacity without additional costs of electric energy of operation of the compressor are presented.

Keywords: passenger railway car, air condition system, heat exchange, solar radiation, temperature pressure, cooling capacity

УДК 656.6.08

ПРИМЕНЕНИЕ СУПЕРМАГНИТОВ В УСТРОЙСТВАХ ВИБРОЗАЩИТЫ ПОДВИЖНОГО СОСТАВА

Гурова Елена Геннадьевна

Новосибирская государственная академия водного транспорта (НГАВТ).

630099, г. Новосибирск, ул. Щетинкина, 33.

Кандидат технических наук, доцент, НГАВТ.

Тел.: 8-913-949-21-36.

E-mail: lena319@mail.ru

В статье предложено применение неодимовых супермагнитов в устройствах виброзащиты подвижного состава. Компенсатор жесткости может быть выполнен как два встречно включенных супермагнита. Приведены расчетные характеристики супермагнитов.

Ключевые слова: виброизолятор, неодимовый супермагнит, усилие, компенсатор жесткости.

АННОТАЦИИ

FOR USE IN SUPER MAGNETS VIBROISOLATION ISOLATION

Gurova Elena Gennadievna

Novosibirsk State Academy of Water Transport (NSAWT).

33, Schetinkina st., 630099, Novosibirsk.

Cand.Tech.Sci., the position of Associate Professor, NSAWT.

Phone: 8-913-949-21-36.

E-mail: lena319@mail.ru

The paper suggested the use of neodymium super magnets in vibration protection devices. The compensator can be implemented stiffness as two opposite super magnets included. The calculated characteristics of super magnets

Keywords: *shock absorbers, neodymium super magnet, effort.*

УДК 621.336

РАЦИОНАЛЬНАЯ АЭРОДИНАМИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ТОКОПРИЕМНИКА ПО УСЛОВИЯМ ТОКОСЪЕМА

Маслов Геннадий Петрович

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.

Доктор технических наук, профессор кафедры «Электроснабжение железнодорожного транспорта», ОмГУПС.

Чепурко Алексей Евгеньевич

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.

Аспирант кафедры «Электроснабжение железнодорожного транспорта», ОмГУПС.

Тел.: 8-951-413-44-35.

E-mail: Alexey.Chep@inbox.ru

В статье рассмотрено влияние аэродинамической составляющей на величину контактного нажатия при различных скоростях движения. Определен допустимый диапазон изменения аэродинамической подъемной силы, выбрана рациональная аэродинамическая характеристика токоприемника при определенной величине его приведенной массы.

Ключевые слова: *рациональная аэродинамическая характеристика, допустимый диапазон контактного нажатия, аэродинамическая подъемная сила.*

АННОТАЦИИ

THE RATIONAL AERODYNAMIC CHARACTERISTIC OF THE PANTOGRAPH UNDER THE TERMS OF CURRENT COLLECTION

Maslov Gennady Petrovich

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Dr. Sci.Tech, professor of the chair «Power supply of Railroad Transport», OSTU.

Chepurko Alexey Evgenyevich

Omsk State Transport University (OSTU).

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

The post-graduate student of the chair «Power supply of Railroad Transport», OSTU.

Phone: 8-951-413-44-35.

E-mail: Alexey.Chep@inbox.ru

In article influence of an aerodynamic component on size of contact pressing is considered at various speeds of movement. The admissible range of change of aerodynamic carrying power is defined, the rational aerodynamic characteristic of a current collector is chosen at a certain size of its specified weight.

Keywords: rational aerodynamic characteristic, admissible range of contact pressing, aerodynamic carrying power.

УДК 629.4.017:531.43:544.021

ПРИМЕНЕНИЕ СОВРЕМЕННЫХ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ ПОДХОДОВ К ОЦЕНКЕ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ НА ПРИМЕРЕ ТОРМОЗНЫХ КОЛОДОК

Матяш Юрий Иванович

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.

Доктор технических наук, профессор кафедры «Вагоны и вагонное хозяйство»,
ОмГУПС.

Тел.: 8-960-990-13-89.

Крохин Сергей Николаевич

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.

Кандидат физико-математических наук, доцент, заведующий кафедрой «Физика и химия», ОмГУПС.

Тел.: (381-2) 31-53-68.

Сосновский Юрий Михайлович

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

АННОТАЦИИ

644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.

Кандидат физико-математических наук, доцент кафедры «Физика и химия», ОмГУПС.

Тел.: (381-2) 31-53-68, 8-908-109-19-29.

E-mail: sosnovskyy@mail.ru

В данной статье рассмотрены проблемы эксплуатации тормозных колодок, применяемых на пассажирских вагонах железнодорожного транспорта. Показано, что отвод тепловой энергии при торможении является актуальной задачей. Рассмотрены физические основы теплопроводности твердых тел с учетом ангармонического характера тепловых колебаний атомов. Предложен экспресс-метод оценки теплопроводности чугунных тормозных колодок пассажирских вагонов.

Ключевые слова: *деструктивный процесс, теплоемкость, теплопроводность, тормозные колодки, рыхлость, чугун, пассажирский вагон.*

APPLICATION OF MODERN PHYSICAL AND CHEMICAL APPROACHES TO THE HEAT CONDUCTIVITY ASSESSMENT ON THE EXAMPLE OF BRAKE BLOCKS

Matjash Yury Ivanovich

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx Avenue, Omsk, 644046, Russia.

Doctor of Technical Sciences, Professor of department «Cars and Cars Economy», OSTU.

Phone: 8-960-990-13-89.

Krokhin Sergey Nikolaevich

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx Avenue, Omsk, 644046, Russia.

Candidate of Physics and Mathematics Sciences, Associate Professor, head of department «Physic and Chemistry», OSTU.

Phone: (381-2) 31-53-68.

Sosnovsky Yury Mikhailovich

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx Avenue, Omsk, 644046, Russia.

Candidate of Physics and Mathematics Sciences, Associate Professor of department «Physic and Chemistry», OSTU.

Phone: (381-2) 31-53-68, 8-908-109-19-29.

E-mail: sosnovskyy@mail.ru

In this article problems of operation of brake blocks applied on carriages of railway transport are considered. We shown that branch of thermal energy when braking is an actual task. Physical bases of heat conductivity of solid bodies taking into account angarmonichesky nature of thermal fluctuations of atoms are considered. The express a method of assessment heat conductivity of pig-iron brake shoes of carriages is presented.

АННОТАЦИИ

Keywords: *destructive process, thermal capacity, heat conductivity, brake blocks, friability, pig-iron, the carriage.*

УДК 629.45.048

РАСЧЕТ ЭФФЕКТИВНОСТИ УФ-СТЕРИЛИЗАТОРА МОДЕРНИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ ВОДОСНАБЖЕНИЯ ПАССАЖИРСКОГО ВАГОНА

Томилова Ольга Сергеевна

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.

Преподаватель кафедры «Вагоны и вагонное хозяйство», ОмГУПС.

Тел.: (3812) 31-06-72.

E-mail: motovilova@yandex.ru

В статье приведена классификация основных методов обеззараживания воды, возможных к применению на железнодорожном транспорте, рассмотрены недостатки существующей методики определения эффективности УФ-излучения, предложены и определены с помощью приложения Flow Works программы SolidWorks количественные показатели эффективности на основе элементов статистики: среднеквадратическое отклонение и модальная величина дозы облучения для типового и УФ-стерилизатора с концентрично установленными патрубками модернизированной системы водоснабжения пассажирского вагона.

Ключевые слова: пассажирский вагон, система водоснабжения, стерилизатор, ультрафиолет, доза облучения, эффективность обеззараживания, плотность распределения, среднеквадратическое отклонение.

EFFICIENCY CALCULATION OF THE ULTRA-VIOLET STERILIZER OF THE CARRIAGE WATER SUPPLY MODERNIZED SYSTEM

Tomilova Olga Sergeevna

Omsk transport university (OSTU).

35 Marx av., Omsk, 644046, Russia.

The teacher of department «Cars and carload economy», OSTU.

Phone: (3812) 31-06-72.

E-mail: motovilova@yandex.ru

In article there is classification of the main methods of water disinfection potential for use in railway transport, disadvantages of existing methods for determining the effectiveness of UV radiation, proposed and defined by using the SolidWorks Flow Works quantitative efficiency indicators based on the elements of statistics such as standard deviation and the modal value of the dose for a typical UV sterilizer and one with a concentrically mounted pipes for carriage water supply modernized system.

Keywords: passenger carriage, water supply system, sterilizer, ultraviolet light, the radiation dose, the efficacy of disinfection, the probability density function, the standard deviation.

АННОТАЦИИ

УДК 625.143.3:624.024

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ РЕЛЬСОВ И ГЕОМЕТРИИ ИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ КАТАНИЯ

Шилер Валерий Викторович

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.

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

Тел.: 8-913-626-87-53.

E-mail: shiler_val@inbox.ru

Представлен анализ состояния геометрических параметров рельсовой колеи и внутренних напряжений металла рельсов. Предложены новые методы их измерения с повышенной точностью. Приведены результаты измерения напряженного состояния рельсов после рельсошлифования. Выявлены серьезные недостатки в технологии шлифовки рельсов и контроля ее результатов.

Ключевые слова: геометрические параметры, рельсовая колея, внутренние напряжения, рельс, рельсошлифование.

THE RESULTS OF STUDIES OF STRESS STATE OF RAILS AND THE GEOMETRY OF THEIR SURFACES SKATING

Shiler Valeriy Viktorovich

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Ph. D., assistant professor of the department «Rolling the same electric road», OSTU.

Phone: 8-913-626-87-53.

E-mail: shiler_vai@inbox.ru

The analysis of the state of the geometric parameters of the rail track and internal stresses of the metal rails. The new methods of their measurements with increased accuracy. The results of measurements of the stress state of the rails after rail grinding. Identified a number of serious flaws in the technology grinding rails and monitoring its results.

Keywords: geometrical parameters, rail track, internal stresses, rail, rail grinding.

УДК 624.332:621.316.97

ОЦЕНКА КОРРОЗИОННОЙ ОПАСНОСТИ АЛЮМИНИЕВЫХ КАБЕЛЕЙ В ПОЛИМЕРНОМ ИЗОЛИРУЮЩЕМ ПОКРОВЕ В УСЛОВИЯХ РАБОТЫ ЭЛЕКТРИФИЦИРОВАННОГО ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА

Кандаев Василий Андреевич

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

АННОТАЦИИ

644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.

Доктор технических наук, профессор кафедры «Системы передачи информации»,
ОмГУПС.

Тел.: (3812)31-06-94.

E-mail: kandaev_va@mail.ru

Авдеева Ксения Васильевна

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Системы передачи информации»,
ОмГУПС.

Тел.: (3812)31-06-94.

E-mail: avdeeva_kv@mail.ru

Слептерева Надежда Константиновна

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.

Аспирант кафедры «Системы передачи информации», ОмГУПС.

Тел.: (3812)31-06-94.

E-mail: viniwedal@mail.ru

Определено влияние электротяги постоянного и переменного тока на коррозионное состояние алюминиевых кабелей в полимерном изолирующем покрове.

Ключевые слова: *защитный потенциальный диапазон, оболочка кабеля, блуждающие токи.*

EVALUATION OF CORROSION HAZARD FOR ALUMINUM CABLES WITH POLYMERIC ISOLATION BLANKET IN CONDITION OF WORKING ELECTRIFIED RAILWAY

Kandaev Vasilii Andreevich

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Dr.Sci.Tech., professor of chair «Information transmission system», OSTU.

Phone: (3812)31-06-94.

E-mail: kandaev_va@mail.ru

Avdeeva Ksenia Vasilievna

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Cand.Tech.Sci., the senior lecturer of chair «Information transmission system», OSTU.

Phone: (3812)31-06-94.

E-mail: avdeeva_kv@mail.ru

Sleptereva Nadezhda Konstantinovna

Omsk State Transport University (OSTU).

АННОТАЦИИ

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

The postgraduate student of chair «Information transmission system», OSTU.

Phone: (3812)31-06-94.

E-mail: viniwedal@mail.ru

The influence of DC and AC electric traction to the corrosion condition of aluminum cables with polymeric isolation blanket evaluated.

Keywords: protective potential range, cable shell, stray currents.

УДК 621.316.97

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОЛЯРИЗАЦИОННЫХ ПАРАМЕТРОВ ЗАЗЕМЛЯЮЩИХ УСТРОЙСТВ

Кандаев Василий Андреевич

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.

Доктор технических наук, профессор кафедры «Системы передачи информации»,
ОмГУПС.

Тел.: (3812)31-06-94.

E-mail: kandaev_va@mail.ru

Мухин Валерий Анатольевич

Омский государственный университет им. Ф. М. Достоевского (ОмГУ).

644077, г. Омск, пр. Мира, 55, а.

Кандидат технических наук, профессор кафедры «Неорганическая химия», ОмГУ.

Тел.: (8381) 26-81-99.

E-mail: mukhin@univer.omsk.su

Сырецкая Анастасия Олеговна

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.

Аспирант кафедры «Системы передачи информации», ОмГУПС.

Тел.: (3812) 31-06-94.

E-mail: nastja.ivanova@gmail.com

Приведены аналитические зависимости для определения перенапряжения на границе раздела «металл – электролит», экспериментальная проверка выполненного расчета поляризации реального заземляющего устройства.

Ключевые слова: поляризация, лимитирующая стадия, граница раздела «металл – грунт», заземляющее устройство.

АННОТАЦИИ

DETERMINATION OF POLARISATION PARAMETERS OF GROUNDING SYSTEM

Kandaev Vasilii Andreevich

Omsk State Transport University(OSTU).

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

Dr. Sci. Tech., professor of chair «Information transmission system», OSTU.

Phone: (3812)31-06-94.

E-mail: kandaev_va@mail.ru

Mukhin Valeriy Anatolevich

Omsk State University F. M. Dostoevsky (OSU).

55?a, Mir av., Omsk, 644077, Russia.

Cand. Tech. Sci., the professor of chair «Inorganic chemistry», OSU.

Phone: (8381) 26-81-99.

E-mail: mukhin@univer.omsk.su

Syretskaya Anastasia Olegovna

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Post-graduate student of the department «Information transfer systems», OSTU.

Phone: (8381)31-06-94.

E-mail: -mail: nastja.ivanova@gmail.com

Analytical dependence for determination of overtension of «metal – ground» interface were given, calculation of polarization of real grounding system was performed, experimental check of calculation results were given.

Keywords: polarization, limiting phase, grounding systems, «metal – ground» interface, interface resistance.

УДК 621.331:621.311.4:621.314.5

АНАЛИЗ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ, ВОЗВРАЩАЕМОЙ ИНВЕРТОРАМИ ТЯГОВЫХ ПОДСТАНЦИЙ ПОСТОЯННОГО ТОКА В СЕТЬ ЭНЕРГОСИСТЕМ

Комякова Ольга Олеговна

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Теоретическая электротехника»,
ОмГУПС.

Тел.: (3812) 31-06-88.

E-mail: komyakovaoo@mail.ru

Комяков Александр Анатольевич

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

АННОТАЦИИ

644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Теоретическая электротехника», ОмГУПС.

Тел.: (3812) 44-39-23.

E-mail: tskom@mail.ru

Вильгельм Александр Сергеевич

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.

Аспирант кафедры «Теоретическая электротехника», ОмГУПС.

Тел.: (3812) 44-39-23.

E-mail: vilgelm87@gmail.com

В статье выполнен анализ качества электрической энергии, возвращаемой двенадцатипульсовым выпрямительно-инверторным преобразователем с последовательным соединением шестипульсовых мостовых секций, работающим в инверторном режиме, при несимметричных и несинусоидальных режимах работы питающей энергосистемы.

Ключевые слова: гармоники, качество электрической энергии, выпрямительно-инверторный преобразователь, несимметричное и несинусоидальное напряжение.

THE ANALYSIS OF QUALITY OF THE ELECTRIC ENERGY RETURNED BY INVERTERS OF TRACTION SUBSTATIONS OF THE DIRECT CURRENT IN THE NETWORK OF POWER SUPPLY SYSTEMS

Komyakova Olga Olegovna

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Cand.Tech.Sci., the senior lecturer of the department «Theoretical the electrical engineer», OSTU.

Phone: (3812) 31-06-88.

E-mail: komyakovaoo@mail.ru

Komiakov Alexandr Anatolievich

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Cand.Tech.Sci., the senior lecturer of the department «Theoretical the electrical engineer», OSTU.

Phone: (3812) 44-39-23.

E-mail: tskom@mail.ru

Vilgelm Aleksandr Sergeevich

Omsk State Transport University (OSTU).

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

The post-graduate student of the department «Theoretical the electrical engineer», OSTU.

Phone: (3812) 44-39-23.

E-mail: vilgelm87@gmail.com

АННОТАЦИИ

In article it is analysed qualities of the electric energy returned by 12-pulse inverter at asymmetrical and not sinusoidal operating modes of a feeding power supply system.

Keywords: harmonicas, quality of electric energy, inverter, asymmetrical and not sinusoidal tension.

УДК 621.333

ПРИМЕНЕНИЕ ИДЕИ «ПЕРЕДАЧИ НЕЧАЕВА» ПРИ РАЗРАБОТКЕ КОМПОНОВОЧНОЙ СХЕМЫ ТЯГОВОГО ПРИВОДА ЛОКОМОТИВА С ПАРАЛЛЕЛЬНЫМИ ПОТОКАМИ МОЩНОСТИ

Милованова Евгения Алексеевна

Иркутский государственный университет путей сообщения (ИрГУПС).

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

Кандидат технических наук, доцент, ИрГУПС.

Тел.: (3952) 63-83-66. Факс: (3952) 63-83-66.

E-mail: milovanova@irgups.ru

Милованов Алексей Алексеевич

Иркутский государственный университет путей сообщения (ИрГУПС).

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

Кандидат технических наук, доцент, ИрГУПС.

Тел.: (3952) 63-83-83. Факс: (3952) 38-77-46.

Милованов Алексей Игоревич

Иркутский государственный университет путей сообщения (ИрГУПС).

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

Кандидат технических наук, доцент, ИрГУПС.

Тел.: (3952) 63-83-83. Факс: (3952) 38-77-46.

E-mail: amilovanov@irgups.ru

Предложена конструкторская разработка зубчатой передачи с высокими показателями технологичности при изготовлении и эксплуатации. Обоснована возможность реализации на базе этой зубчатой передачи компоновочной схемы тягового привода с параллельными потоками мощности.

Ключевые слова: зубчатая передача, тяговый привод, компоновочная схема, параллельные потоки мощности.

APPLICATION OF IDEAS «NECHAEV'S TRANSFER» IN THE DEVELOPMENT THE LAYOUT TRACTION DRIVE ENGINES WITH PARALLEL THREADS MOSHNOSTI

Milovanova Evgeniya Alexeevna

Irkutsk State Transport University (ISTU).

15, Chernyshevskogo st., Irkutsk, 664074, Russia.

АННОТАЦИИ

Cand. Tech. Sci., associate professor, ISTU.
Phone: (3952) 63-83-66. Fax: (3952) 63-83-66.
E-mail: milovanova@irgups.ru

Milovanov Alexei Alexeevich
Irkutsk State Transport University (ISTU).
15, Chernyshevskogo st., Irkutsk, 664074, Russia.
Cand. Tech. Sci., associate professor, ISTU.
Phone: (3952) 63-83-83. Fax: (3952) 38-77-46.

Milovanov Alexei Igorevich
Irkutsk State Transport University (ISTU).
15, Chernyshevskogo st., Irkutsk, 664074, Russia.
Cand. Tech. Sci., associate professor, ISTU.
Phone: (3952) 63-83-83. Fax: (3952) 38-77-46.
E-mail: amilovanov@irgups.ru

An engineering development of the driving gear with high technological indexes during the manufacturing and operation has been suggested here. And also a possibility of the quill drive layout diagram with parallel flow capacity value instantiation on the base of this driving gear has been proved here.

Keywords: *driving gear, quill drive, layout diagram, parallel capacity flows.*

УДК 62-83 (075.8): 621.313.333: 629.423.32

О ПРЯМОМ ПУСКЕ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С ДВУХСТУПЕНЧАТОЙ КОМПЕНСАЦИЕЙ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ В СОСТАВЕ ВСПОМОГАТЕЛЬНОГО ПРИВОДА ЭЛЕКТРОВОЗА

Пустоветов Михаил Юрьевич

Ростовский государственный университет путей сообщения (РГУПС).
344038, г. Ростов-на-Дону, пл. Ростовского стрелкового полка народного ополчения, 2.
Кандидат технических наук, доцент, Старший научный сотрудник НИИЦа «Криотранс-энерго», РГУПС.
Тел.: (863)245-37-47.
E-mail: mgsn2006@rambler.ru

Вспомогательный электропривод электровозов часто строится на базе трехфазных асинхронных двигателей. В ряде схем асинхронного вспомогательного привода практикуется прямой пуск двигателей, чему сопутствуют значительные пусковые токи. Это предъявляет повышенные требования к установленной мощности питающего преобразователя. Рассмотрен способ снижения пусковых и рабочих токов за счет использования трехфазных конденсаторных батарей. Приведены результаты компьютерного моделирования.

Ключевые слова: *вспомогательный электропривод электровоза, мотор-компрессор, автономный инвертор напряжения, синус-фильтр, асинхронный двигатель, прямой пуск, компенсация реактивной мощности.*

ABOAT INDUCTION MOTOR DIRECT-ON-LINE STARTING METHOD AT TWO-STAGE REACTIVE POWER COMPENSATION IN THE ELECTRIC LOCOMOTIVE AUXILIARY ELECTRIC DRIVE

Pustovetov Michail Yurievich

Rostov State Transport University (RSTU).

2, Rostovskogo Strelkovogo Polka Narodnogo Opolcheniya sq., Rostov-on-Don, 344038, Russia.

Cand.Tech.Sci., associate professor, Senior Researcher in Science-Investigation and Test Center «Cryotransenergo», RSTU.

Phone: (863)245-37-47.

E-mail: mgsn2006@rambler.ru

It is often that electric locomotive auxiliary electric drive is based on 3-phase induction motors. There are some schemes of auxiliary electric drive with direct-on-line starting method of induction motors. Features of these cases are large starting currents and oversize of feeding converter. The method of starting and working currents minimization by 3-phases batteries of capacitors is presented. Results of computing are discussed.

Keywords: *electric locomotive auxiliary electric drive, motor-compressor, self-commutated voltage inverter, sine-wave filter, induction motor, direct-on-line starting method, reactive power compensation.*

УДК 621.331 :621.311

КОНТРОЛЬ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ЛИНИИ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ УСТРОЙСТВ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЙ АВТОМАТИКИ

Соколов Максим Михайлович

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.

Кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры «Автоматика и телемеханика», ОмГУПС.

Тел.: 8-904-587-98-17.

E-mail: SokolovMM@omgups.ru

В статье рассматриваются вопросы контроля состояния проводов линии электроснабжения устройств железнодорожной автоматики. Предложена методика определения поврежденного провода и места обрыва с использованием математического аппарата алгебры логики.

Ключевые слова: *электроснабжение, устройства автоматики, логический коэффициент.*

АННОТАЦИИ

THE TECHNICAL CONDITION MONITORING OF POWER SUPPLY LINE FOR DEVICES OF RAILWAY AUTOMATICS

Sokolov Maxim Mihaylovich

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Cand. Sci. Tech., the teacher of department « Automatics and telemechanics », OSTU.

Phone: 8-904-587-98-17.

E-mail: SokolovMM@omgups.ru

In this article, the technical condition monitoring of power supply line for devices of railway automatics is considered. The method of determining the damaged wires and location of the break with using the mathematical apparatus of boolean logic algebra is proposed.

Keywords: *electric power supply, devices of automatics, the logical coefficient.*

УДК 621.3.05, 519.65

ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ ОЦЕНКИ ПАРАМЕТРОВ СИГНАЛОВ В ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ В СИСТЕМЕ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

Альтман Евгений Анатольевич

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Автоматика и системы управления», ОмГУПС.

Тел.: (3812) 31-05-89.

E-mail: altmanea@gmail.com

Елизаров Дмитрий Александрович

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.

Аспирант кафедры «Автоматика и системы управления», ОмГУПС.

Тел.: 8-913-674-20-05.

E-mail: elizarovda@gmail.com

В статье произведен анализ методов определения параметров гармоник сигнала и предложена модификация метода корреляционных функций, позволяющая существенно повысить точность определения фазы сигнала. Рассматриваются следующие методы: Якобсена (Jacobsen's Modified Quadratic Estimator), два метода Квина (Quinn's Estimator, Quinn's Second Estimator), Маклеода (Macleod's Estimator) и метод корреляционных функций. Для всех методов произведена оценка точности определения параметров гармоник сигналов при различных уровнях шума. На основе полученных результатов разработаны рекомендации по применению рассмотренных методов.

Ключевые слова: частота, амплитуда, фаза, энергоэффективность, качество сигнала, алгоритм, спектр сигнала, белый шум, ДПФ, соотношение «сигнал – шум».

INCREASE OF ACCURACY OF THE ASSESSMENT OF PARAMETERS OF SIGNALS IN THE ELECTRIC NETWORK IN SYSTEM OF TRACTION POWER SUPPLY

Altman Evgeniy Anatolevich

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx av, Omsk, 644046, Russia.

Cand. Tech. Sci., the senior lecturer of department «Automatics and control systems», OSTU.

Phone: (3812) 31-05-89.

E-mail: altmanea@gmail.com

Elizarov Dmitry Alexandrovich

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx av, Omsk, 644046, Russia.

The post-graduate student of department «Automatics and control systems», OSTU.

Phone: 8-913-674-20-05.

E-mail: elizarovda@gmail.com

The paper has been analysis the work of methods by definition parameters of single tone and also updating of a method of the correlation functions is offered, allowing essentially to increase accuracy of definition of a phase of a signal. In the work following algorithms, such as a method of Jakobsena (Jacobsen's Modified Quadratic Estimator), a method of Makledoda (Macleod's Estimator), two methods of Quinn (Quinn's Estimator, Quinn's Second Estimator) and a method of correlation functions are considered. For all methods the deviation of parameters harmonics of a signal at various noise levels. On the basis of the received results we have been developed recommendations about application of the considered methods depending on noise level.

Keywords: frequency, amplitude, phase, power efficiency, quality of a signal, algorithm, signal spectrum, white noise, DFT, Signal-to-Noise Ratio

УДК 004.414.3

КОМПЕНСАЦИЯ ЭФФЕКТА ДОПЛЕРА В OFDM-СИГНАЛЕ

Грицутенко Станислав Семенович

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Системы передачи информации»,
ОмГУПС.

Тел.: 8-960-983-81-11.

E-mail: st256@mail.ru

Сидоренко Андрей Сергеевич

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.

Аспирант кафедры «Системы передачи информации», ОмГУПС.

АННОТАЦИИ

Тел.: 8-913-640-69-48.

E-mail: andrey.s.sidorenko@gmail.com

В статье предложен метод компенсации эффекта Доплера на приемной стороне. Рассмотрены два фактора влияния эффекта Доплера на сигнал – сдвиг несущей и деформация спектра, а также методы борьбы с ними. Показано, что наибольший вклад в разрушение созвездия сигнала вносит сдвиг несущей, в то время как влияние деформации спектра практически не искажает форму принятого сигнала.

Ключевые слова: *эффект Доплера, интерполяция сигнала, сигнальное созвездие, демодулятор.*

Gritsutenko Stanislav Semenovich

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Cand.Tech.Sci., assistant professor of department «Data transmission system», OSTU.

Phone: 8-960-983-81-11.

E-mail: st256@mail.ru

Sidorenko Andrey Sergeevich

Omsk State Transport University (OSTU).

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

The post-graduate student of department «Data transmission system», OSTU.

Phone.: 8-913-640-69-48.

E-mail: andrey.s.sidorenko@gmail.com

This article describes a method of the Doppler-spread compensation process in a receiver. There are two factors of the Doppler-spread – a carrier shift and a spectrum distortion; also reducing methods are described here. The article shows that the carrier shift has the biggest impact on a signal constellation; and the spectrum distortion almost doesn't corrupt a signal.

Keywords: *Doppler-spread, signal interpolation, signal constellation, demodulator.*

УДК 681.3:681.5

ЛОГИСТИКА КАК ПРИКЛАДНАЯ ЗАДАЧА ТЕХНИЧЕСКОЙ КИБЕРНЕТИКИ

Шахов Владимир Григорьевич

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

644046, г. Омск, пр. Маркса 35.

Кандидат технических наук, профессор кафедры «Автоматика и системы управления», ОмГУПС.

Тел.: (3812) 31-05-89.

Вишнякова Екатерина Павловна

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

644046, г. Омск, пр. Маркса 35.

АННОТАЦИИ

Магистрант кафедры «Автоматика и системы управления», ОмГУПС.
Тел.: (3812) 31-05-89.

В статье рассматриваются задачи прикладной кибернетики применительно к территориально разнесенным объектам, которые являются предметом изучения логистики. Приводятся разделы кибернетики, нашедшие применение в логистике, даются некоторые определения и задачи, решаемые с помощью этого математического аппарата.

Ключевые слова: логистика, средства транспортировки, транспортные интерфейсы, графы, маршруты, оптимизация.

LOGISTICS AS APPLIED TECHNICAL CYBERNETICS

Shakhov Vladimir Grigoryevich

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Cand. Tech. Sci., the professor of department «Automatics and control systems», OSTU.

Phone: (3812) 31-05-89.

Vishnyakova Ekaterina Pavlovna

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Master of department «Automatics and control systems», OSTU.

Phone: (3812) 31-05-89.

In this paper the authors consider the problems of applied cybernetics in relation to geographically dispersed sites, which are the subject of logistics. A section of cybernetics, which have found application in the logistics, given some torye-definition and problems solved with the help of mathematical apparatus. The proposed article is one of the planned in this area and the actualskiing is an introduction to mathematical logistics.

Keywords: logistics, transportation means, transportation interface, graphs, route optimization.

УДК 624.074: 539.3

ПОВЕДЕНИЕ ТОНКОСТЕННЫХ СТЕРЖНЕЙ ПРИ УДАРНЫХ НАГРУЗКАХ

Мещеряков Владимир Борисович

Московский государственный университет путей сообщения (МИИТ).

127994, г. Москва, ул. Образцова, д. 9, строение 9.

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

Тел.: (495) 684-24-56, (499) 978-16-73.

E-mail: vb.mesh@gmail.com, vest08@miit.ru

АННОТАЦИИ

Аунг Зо Лат

Московский государственный университет путей сообщения (МИИТ).
127994, г. Москва, ул. Образцова, д. 9, строение 9.
Аспирант кафедры «Теоретическая механика», МИИТ.
Тел.: (495) 684-24-56, (499) 978-16-73.

Предложена концепция расчета стержней на продольный и поперечный удар массивным телом. Определение параметров контактной силы выполняется на основе теории Г. Герца. Нелинейное интегральное уравнение решается численным методом Эйлера. Колебания стержня после окончания удара рассматриваются с учетом сформировавшихся к этому моменту времени начальных условий. При поперечном ударе по тонкостенным стержням открытого профиля учитываются деформации сдвига.

Ключевые слова: тонкостенные стержни, концепция удара, теория Герца, нелинейное интегральное уравнение, метод Эйлера, деформация сдвига при изгибе и кручении.

RESPONSE OF THE THIN WALLED RODS TO THE IMPACT LOADING

Mesheryakov Vladimir Borisovich

Moscow State University of Railway Engineering (MSURE).
9-9, Obraztsova Str., 127994, Moscow.
Doctor of Technical Sciences, Professor of Dept. «Theoretical Mechanics», MSURE.
Phone: (495) 684-24-56, (499) 978-16-73.
E-mail: vb.mesh@gmail.com, vest08@miit.ru

Aung Zaw Lat

Moscow State University of Railway Engineering (MSURE).
9-9, Obraztsova Str., 127994, Moscow.
Post-graduate student of Dept. «Theoretical Mechanics», MSURE.
Phone: (495) 684-24-56, (499) 978-16-73.

A concept for evaluating the response of the rod to a longitudinal and transverse impact by a mass is suggested. The parameters of contact force are obtained using Hertz' theory. The respective nonlinear integral equation is solved by Euler's method. The road oscillations after impact are considered using resulting initial conditions. For the case of transverse impact on the thin walled road with open profile the shear strains are taken into account.

Keywords: thin walled rods, impact concept, Hertz' theory, nonlinear integral equation, Euler's method, shear strain under bending and twisting.

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 предоставляются:

текст статьи на белой бумаге формата А4 в 2 экз., а также в электронном виде (на любом носителе или по e-mail), имя файла определяется по фамилии первого автора: фамилия.doc;

название статьи, аннотация, ключевые слова, название тематического раздела журнала, в который представляется статья (в отдельном файле – на русском и английском языках);

сведения об авторах в отдельном файле на русском и английском языках (фамилия, имя, отчество, ученая 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.

Требования к рукописи статьи:

рукопись статьи должна содержать УДК (в левом верхнем углу, обычный, 12 пт), инициалы и фамилию (по центру, 11 пт), название статьи (по центру, прописными буквами, полужирный, 12 пт), аннотацию на русском 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 алфавита, математические символы такие, например, как cos, sin, max, min, – прямым шрифтом;

текст в таблицах, подрисуночные подписи и названия таблиц набираются шрифтом Times New Roman, 10 пт;

межстрочный интервал одинарный, абзацный отступ – 0,75 см;

каждый рисунок дополнительно должен быть представлен в оригинальном файле (формат JPEG или TIFF, разрешение – не ниже 300 пикс/дюйм);

рисунки, выполненные в редакторе Word, должны быть вставлены как объект;

ссылки на литературу в тексте статьи указываются в квадратных скобках, список литературы имеет заголовок *Список литературы* (не более 10 наименований), библиографическое описание источников оформляется по требованиям ГОСТ 7.1-2003.

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 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.

По всем вопросам, связанным с подготовкой, представлением и публикацией материалов, необходимо обращаться в редакцию.

Редколлегия оставляет за собой право литературной редакции содержания статьи без согласования с авторами.

Научное издание

Научно-технический журнал «Известия Транссиба»

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Авилов Валерий Дмитриевич – д.т.н., ОмГУПС (Омск);
Бородин Анатолий Васильевич – д.т.н., ОмГУПС (Омск);
Ведрученко Виктор Родионович – д.т.н., ОмГУПС (Омск);
Горюнов Владимир Николаевич – д.т.н., ОмГТУ (Омск);
Гончар Игорь Иванович – д.ф.-м.н., ОмГУПС (Омск);
Демин Юрий Васильевич – д.т.н., НГАВТ (Новосибирск);
Ермоленко Дмитрий Владимирович – д.т.н., ВНИИЖТ (Москва);
Исмаилов Шаfigула Калимуллович – д.т.н., ОмГУПС (Омск);
Кандаев Василий Андреевич – д.т.н., ОмГУПС (Омск);
Костюков Владимир Николаевич – д.т.н., НПЦ «Динамика» (Омск);
Кузнецов Андрей Альбертович – д.т.н., ОмГУПС (Омск);
Лебедев Виталий Матвеевич – д.т.н., ОмГУПС (Омск);
Маслов Геннадий Петрович – д.т.н., ОмГУПС (Омск);
Медведев Владимир Ильич – д.т.н., СГУПС (Новосибирск);
Митрохин Валерий Евгеньевич – д.т.н., ОмГУПС (Омск);
Мочалин Сергей Михайлович – д.т.н., СибАДИ (Омск);
Нехаев Виктор Алексеевич – д.т.н., ОмГУПС (Омск);
Николаев Виктор Александрович – д.т.н., ОмГУПС (Омск);
Овчаренко Сергей Михайлович – д.т.н., ОмГУПС (Омск);
Рауба Александр Александрович – д.т.н., ОмГУПС (Омск);
Сафонов Эдуард Алексеевич – д.т.н., СибАДИ (Омск);
Сидоров Олег Алексеевич – д.т.н., ОмГУПС (Омск);
Сидорова Елена Анатольевна – д.т.н., ОмГУПС (Омск);
Сквородников Евгений Иванович – д.т.н., ОмГУПС (Омск);
Харламов Виктор Васильевич – д.т.н., ОмГУПС (Омск);
Четвергов Виталий Алексеевич – д.т.н., ОмГУПС (Омск);
Шпалтаков Владимир Петрович – д.э.н., ОмГУПС (Омск).

Редактор – Майорова Н. А.

Компьютерная верстка – Захаренко Е. И.

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 – ПИ № ФС77-36469.

Номер ISSN – 2220-4245.

Подписной индекс в общероссийском каталоге «Роспечать» – 66087.

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.

Адрес редакции (издательства): 644046, г. Омск, пр. Маркса, 35;
тел.: (3812) 31-05-54; e-mail: izvestia_transsiba@mail.ru

Подписано в печать 20.09.2012.

Тираж 500 экз.

