

**Министерство транспорта Российской Федерации
Федеральное агентство железнодорожного транспорта
ОАО «Российские железные дороги»**

**Правительство Омской области
Омский государственный университет путей сообщения**



ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЙ, КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА И ДИАГНОСТИКИ В ПРОМЫШЛЕННОСТИ И НА ТРАНСПОРТЕ



Омск 2020

Министерство транспорта Российской Федерации
Федеральное агентство железнодорожного транспорта
ОАО «Российские железные дороги»
Омский государственный университет путей сообщения



ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЙ, КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА И ДИАГНОСТИКИ В ПРОМЫШЛЕННОСТИ И НА ТРАНСПОРТЕ

Материалы четвертой всероссийской научно-технической
конференции с международным участием, посвящённой
75-летию победы в Великой Отечественной войне;
100-летию со дня рождения академика А. Д. Сахарова;
120-летию основания Омского государственного университета
путей сообщения
(октябрь 2020 г.)

Омск 2020

УДК 006
ББК 30.10
П75

Приборы и методы измерений, контроля качества и диагностики в промышленности и на транспорте: Материалы четвертой всероссийской научно-технической конференции с международным участием / Омский гос. ун-т путей сообщения. Омск, 2020. 391 с.

Основные результаты, представленные в сборнике, посвящены решению фундаментальных проблем и прикладных задач: изучению и применению новых физических методов контроля сложных техногенных объектов, включая элементы подвижного состава и объекты промышленности. Отдельные материалы, посвященные применению лазерных технологий, исследованию эффекта акустоупругости в системах акустического контроля, исследованию полевых зависимостей магнитной проницаемости деформированных углеродистых сталей, исследованиям режимов совместной работы накопителей электроэнергии и системы тягового электроснабжения, диагностированию электромагнитной совместимости тягового электроснабжения и транспортной инфраструктуры, идентификации состояния электрических машин, исследованию систем автоматического управления скоростью движения поездов являются развитием проектов, ранее поддержанных фондом РФФИ.

Рассмотрены вопросы приборного и методического обеспечения контроля окружающей среды, а так же вопросы метрологии, стандартизации и сертификации.

Сборник может быть полезен для научных сотрудников и специалистов, работающих в области железнодорожного подвижного состава, промышленности, приборостроения и энергетики.

Библиогр.: 302 назв. Табл. 21. Рис. 131.

Редакционная коллегия:

доктор техн. наук, доцент С. Г. Шантаренко (отв. редактора);

доктор техн. наук, профессор В. Т. Черемисин;

доктор техн. наук, профессор А. А. Кузнецов.

Рецензенты: доктор техн. наук, профессор В. И. Глухов;

доктор техн. наук, профессор А. В. Бубнов.

ISBN 978-5-949-41267-1

© Омский гос. университет
путей сообщения, 2020

Содержание

Исачкин С. П. Выдающийся ученый и гражданин (К 100-летию со дня рождения академика А. Д. Сахарова).....	7

Секция 1 «Методы и средства измерений, неразрушающего и аналитического контроля, диагностирования подвижного состава, транспортной инфраструктуры и промышленных объектов»

Кузнецов А. А., Брюхова А. С., Лабутин Т. А. Исследование распределения продуктов коррозии в железобетонных конструкциях при изменении сечения арматурных стержней	14
Лабутин Т. А., Брюхова А. С. Экспериментальные исследования продуктов коррозии на поверхности железобетонных изделий	22
Кузнецов А. А., Фомиченко К. И., Шныптев И. А. Моделирование прочностных характеристик железобетонных конструкций подверженных коррозии.....	28
Пашкова Н. В., Хмырова Н. А. Разработка измерительного комплекса для контроля характеристик закалочных сред.....	35
Кутень М. М., Бобров А. Л. Исследование критериев идентификации различных типов источников акустической эмиссии.....	41
Стихановский Б. Н., Черемисина С. А. Перегрузки, действующие на испытуемые изделия в процессе удара	48
Стихановский Б. Н. Конструктивные особенности проектирования токоведущих деталей и измерение их скоростей при ударах.....	54
Denis V. Konishevskiy, Nazim S. Kodirov Analysis of data on defects and malfunctions of bearing unitsof locomotives	58
Рыжова А. О., Бехер С. А. Исследование зависимостей параметров акустических сигналов, отраженных от границы с объектом контроля, со свойствами материала объекта контроля.....	64
Школина Д. И., Бехер С. А., Коломеец А. О. Разработка методов информационной поддержки для постоянного мониторинга процессов неразрушающего контроля.....	71
Матяш Ю. И., Сосновский Ю. М., Кондриков Е. М., Муравьев Д. В. Экспериментальное исследование связи остаточной деформации в тяжелонагруженных узлах и деталях подвижного состава с модулем Юнга и удельным коэффициентом ТЭДС	78
Степанова Л. Н., Курбатов А. Н., Тенитилов Е. С. Определение продольных напряжений, возникающих при сжатии рельсов бесстыкового пути, ультразвуковым методом.....	90

Сташков А. Н., Шапова Е. А., Ничипурук А. П. Особенности поведения полевых зависимостей обратимой магнитной проницаемости упруго- и пластически деформированной малоуглеродистой феррито-перлитной стали	99
Байсадыков М. Ф., Петров П. Г., Супоня Д. В. Прогнозирование износа электрических щеток тяговых двигателей с учетом условий эксплуатации подвижного состава.....	108
Овчаренко С. М., Ринг И. С. Вопросы эффективности работы систем прогрева тепловозов.....	115
Волчанин Г. В., Кузнецов А. А., Кандаев В. А. Моделирование режимов работы генератора импульсов электрохимического устройства диагностирования коррозионного состояния железобетонных конструкций	121
Матяш Ю. И., Кондратенко Е. В., Брылова Т. Б. Повышение достоверности диагностирования цельнокатаного колеса на ходу поезда	128
Салихов Р. Ф., Савельев С. В., Шутанов И. А. Тепловой метод контроля моторных масел в процессе эксплуатации транспортных, транспортно-технологических машин	135

Секция 2 «Измерения, контроль и диагностирование в системах электроснабжения, энергетике и электротехнических комплексах»

Кузнецов А. А., Волчанина М. А., Горлов А. В. Мобильное устройство имитации дефектов электрической изоляции	143
Ковалева Т. В., Комякова О. О., Пашкова Н. В. Исследование электромагнитных процессов в тяговой сети переменного тока с учетом резонансных явлений.....	148
Чижма С. Н., Молчанов С. В., Стригин И. В. Определение параметров линии электропередачи с использованием синхронно-векторных измерений.....	155
Бадёр М. П., Лобынцев В. В. Диагностирование электромагнитной совместимости системы тягового электроснабжения и транспортной инфраструктуры	163
Незевак В. Л. Влияние режимов работы накопителей электроэнергии на показатели работы системы тягового электроснабжения.....	175
Незевак В. Л., Самолинов С. С. Аспекты применения энергетических установок и систем накопления электроэнергии для тягового электроснабжения	183
Салита Е. Ю., Самолинов С. С., Прищепа Е. Ю. Оценка состояния и средства диагностики силовых полупроводниковых приборов преобразователей на Западно-Сибирской железной дороге	190
Колпахчян П. Г. Идентификатор состояния синхронного тягового двигателя с постоянными магнитами на роторе	198
Петровнин В. С., Горобей С. С., Кузнецов А. А. Способы регулирования электрической мощности на отопление пассажирских вагонов	205

Шкодун П. К., Долгова А. В. Совершенствование методики анализа профилограмм коллектора тяговых электродвигателей подвижного состава.....	212
Ходкевич А. Г., Ключников М. В. Исследование влияния тяговой сети на линейные цепи автоблокировки	219
Литвинова О. В. Электрические параметры кабеля в шланговом изолирующем покрытии с повреждениями.....	227
Васькин А. А., Лысый С. П. Электрические методы неразрушающего контроля	233
Ахмеджанов Р. А., Макарович В. В., Макаровича Н. В. Математическая модель трехфазного вихретокового преобразователя	238
Кузьменко А. Ю., Лаврухин А. А. Разработка информационной системы хранения и обработки данных диагностирования высоковольтного оборудования	245
Черемисин В. Т., Перестенко А. Е., Истомин С. Г. Проблема отбора ключевых параметров эксплуатации электроподвижного состава и системы тягового электроснабжения для классификации поездок с позиции энергоэффективности.....	251
Каштанов А. Л., Комяков А. А., Никифоров М. М. Применение многокритериальной оптимизации для отбора математических моделей энергопотребления в производственных процессах	258

Секция 3 «Приборы и методы контроля окружающей среды и экология»

Авдеева К. В., Демух Е. В. Оценка электромагнитной совместимости телекоммуникационного оборудования и систем беспроводной связи.....	264
Кабанов А. А., Никонова Г. В., Щапова Л. В. Исследования по определению сигналов управления антропоморфными протезами	270
Смердин С. Н., Тодер Г. Б. Анализ распределения интенсивности в спектре света, рассеянного в глицерине.....	279
Пономарев А. В., Горчаков И. А., Богунов К. В. Исследование режимов работы маломощных солнечных панелей	287
Маркелова К. С., Мусаткина Б. В. Исследование экологических характеристик устройств токосъема электрического транспорта.....	295
Мусаткина Б. В., Кообар А. А. Картирование шума как инструмент контроля и оценки качества окружающей среды	300

Секция 4 «Метрологическое обеспечение, аттестация лабораторий и подтверждение соответствия»

Кирилук О. М., Легчилина Е. Ю., Цалко Т. В. Использование цифровых технологий для диагностики результатов пенсионного реформирования.....	308
Стариков А. П., Москвина Е. В. Тарировка форсунок газомазутных горелок.....	315

Секция 5 «Цифровые технологии, алгоритмы и программное обеспечение автоматизированных систем измерений, контроля и диагностики»

Меркулов П. М., Кузьмин В. С. К вопросу о диагностике локомотивных устройств АЛСН.....	323
Гордеев О. И., Захаренко В. А. Программное обеспечение обработки параметров потребляемой мощности для диагностики электромеханических агрегатов	329
Пудовиков О. Е., Киселев М. Д. Применение адаптации в системах автоматического управления скоростью движения грузовых поездов.....	337
Найден С. Н., Москалев Ю. В. Использование автоматизированного видеоизмерительного комплекса оценки коммутации для настройки системы управления тяговыми электродвигателями	344
Люханова С. В. Методические аспекты оценки качества функционирования транспортно-логистической системы.....	352
Кобенко, В. Ю. Чувочина И. В., Зольников А. Е. Метод измерения и классификации трендов сигналов.....	358
Тэттэр В. Ю., Тэттэр А. Ю., Денисова И. В., Корнейчук И. Л. Применение нечеткой логики для задач вибродиагностики.....	366
Аблялимов О. С. К изменению ограничений скорости движения поезда на участке железной дороги.....	376
Аблялимов О. С. К вопросу нормирования денежных средств на перевозочную работу локомотивов	380
Буровцев В. В., Жерनावков П. С. Цифровая трансформация алгоритма процесса сертификации на железнодорожном транспорте	384

ВЫДАЮЩИЙСЯ УЧЕНЫЙ И ГРАЖДАНИН **(К 100-летию со дня рождения академика А. Д. Сахарова)**

Андрей Дмитриевич Сахаров родился в Москве 21 мая 1921 г. Его отец, Дмитрий Иванович, был сыном известного столичного адвоката, однако решил посвятить себя сфере образования. Он преподавал физику в Московском педагогическом институте. За разработку задачника по своему предмету и выпуск ряда научно-популярных книг ему была присвоена степень кандидата педагогических наук без защиты диссертации, что позволило в дальнейшем занять профессорскую должность. Мать, Екатерина Софиано, имела дворянское происхождение и была дочерью генерала из рода обрусевших греков. Она также занималась педагогической деятельностью, преподавая гимнастику.

Неудивительно, что родители-педагоги выбрали для сына домашнее образование, в ходе которого влияние отца было определяющим. Впоследствии

будущий академик вспоминал о своем обучении: «Меня очень волновала возможность свести все разнообразие явлений природы к сравнительно простым законам взаимодействия атомов, описываемых математическими формулами. Я еще не вполне понимал, что такое дифференциальные уравнения, но что-то уже угадывал и испытывал восторг перед их всесилием» [Сахаров Андрей Дмитриевич. <https://www.culture.ru/persons/3281/andrei-sakharov>]. Учеба на дому оказалась эффективной. Сдав экзамены за шестой класс, Андрей Сахаров перешел в обычную школу, а в 1938 г. его, как отличника, без экзаменов зачислили на физический факультет МГУ.

Когда началась война, студентов-физиков направили для поступления в летное училище. Однако А. Д. Сахаров не прошел медкомиссию, после чего не стал проситься на фронт, решив, что, доучившись, принесет больше пользы в это трудное время. Так и получилось. В 1942 г. он получил диплом с отличием по специальности «оборонное металловедение». Это произошло в Ашхабаде, куда был эвакуирован университет. Через какое-то время Андрей Сахаров был направлен на патронный завод в Ульяновск, где изобрел прибор, контролирующий закалку сердечника пуль для противотанковых ружей.

В 1945 г. молодой изобретатель поступил в аспирантуру Физического института Академии наук СССР им. Лебедева (ФИАН). Его научным руководителем стал известный физик Игорь Евгеньевич Тамм, который после первой беседы с А. Д. Сахаровым признался коллегам: «Этот молодой человек

самостоятельно додумался до того, что пока смогли придумать только самые крупные светила атомной физики и что еще нигде не опубликовано» [Пименов Р. И. Каким был Андрей Дмитриевич Сахаров // Книжное обозрение. 1990. № 22].

В конце 1946 г. А. Д. Сахарову предложили участвовать в некой секретной «системе для выполнения важных правительственных заданий». Ученый отказался, так как хотел продолжить работу, начатую со своим научным руководителем.

В 1949 г. в СССР прошли первые испытания атомной бомбы, и создание водородной было следующим шагом в гонке вооружений. Л. П. Берия распорядился немедленно развернуть соответствующую работу. Неслучайно в Физическом институте сформировали особую исследовательскую группу для проверки расчетов по разработке этого сверхмощного оружия. В состав группы под руководством И. Е. Тамма вошел и Андрей Сахаров, на которого вскоре поступил компромат с политическими обвинениями. В ответ Л. П. Берия распорядился не отстранять от работы талантливого специалиста, усилив слежку за ним. Интуиция ближайшего соратника И. В. Сталина не подвела. Именно А. Д. Сахаров предложил принципиально новый проект термоядерного заряда. В результате первое испытание водородной бомбы прошло 12 августа 1953 г., после чего Андрей Дмитриевич единогласно был избран академиком АН СССР, а затем удостоен звания Героя Социалистического Труда. Вместе с тем ученый стал задумываться о гуманитарных последствиях ядерных испытаний, которые неуклонно продолжались.

Самое значительное испытание водородной бомбы произошло 30 октября 1961 г. в атмосфере над Новой Землей. Мощность ядерного заряда составила 50 млн. тонн в тротиловом эквиваленте, что превосходило бомбу, сброшенную на Хиросиму, в 2500 раз. [Тимофеев В. А. Сильнее нашей бомбы не было // Аргументы и факты. 1996. № 5]. При этом наблюдатели и специалисты, находившиеся в 270 км от эпицентра взрыва, зафиксировали очень сильное продолжительное свечение над густой облачностью, почувствовав колоссальное давление на барабанные перепонки. После огибания взрывной волной Земного шара это давление повторилась. На дистанции 100 км от места взрыва ударной волной был снесен с курса самолет ИЛ-14 с маршалом Советского Союза К. С. Москаленко. Пилот чудом справился с управлением.

Следили за ходом данного события и в ЦРУ, где на основе рапорта командира американской подводной лодки пришли к выводу о реальности

затопления значительной части побережья США при использовании нескольких аналогичных зарядов, так как ударная волна от взрыва в воздухе преломляется в воде и имеет сильный поражающий эффект. В свою очередь Н. С. Хрущев распорядился начать изучение поражающего действия поверхностной волны, вызываемой подводным взрывом, который мог привести к разрушениям глобального характера.

Среди незапланированных последствий испытания водородной бомбы оказалось разрушение жилого городка геофизической станции в районе пролива Маточкин Шар, правда, ее сотрудники с семьями на всякий случай были эвакуированы. Однако на восстановление городка понадобилась 20 млн. рублей, что по тем временам считалось колоссальным ущербом. Еще больший урон был нанесен природе. В частности, у волков, попавших в зону радиационного заражения, выпала шерсть, а потом стало появляться облысевшее потомство. После этого Андрей Дмитриевич пришел к выводу, что его детище способно не только разрушать мир, но и исказить его. «Моя самая страстная мечта, – заявлял он, – чтобы термоядерное оружие сдерживало войну, но никогда не применялось»[<https://www.culture.ru/persons/3281/andrei-sakharov>].

В своих многочисленных статьях и выступлениях А. Д. Сахаров неустанно призывал остановить ядерные испытания. К счастью, это понимало и руководство ядерных держав. В 1963 г. СССР, США и Великобритания подписали исторический договор о запрещении испытаний ядерного оружия в атмосфере, воде и космосе. Так Сахаров стал инициатором одного из важнейших шагов к спасению планеты, хотя в Международном отделе ЦК КПСС ему рекомендовали заниматься наукой и не вникать «не в свои дела». Однако как член партии и гражданин СССР Андрей Дмитриевич считал вправе вмешиваться во все происходящее в стране.

На страницах «Известий» он критиковал существующую систему образования за оторванность от потребностей реальной жизни. Путь к ее усовершенствованию академик видел в расширении школ и интернатов с физико-математическим уклоном. В письмах к правительству он обращал внимание на катастрофическое отставание советской биологии в результате деятельности Т. Д. Лысенко на посту президента ВАСХНИЛ, требовал дать возможность развиваться отечественной генетике. В 1964 г. лысенковцы для укрепления своих позиций рассчитывали избрать в Академию наук СССР профессора Н.И. Нуждина, которого поддерживал сам Н. С. Хрущев. Однако

А. Д. Сахаров с другими известными физиками способствовали провалу этой кандидатуры. Первый секретарь ЦК партии был взбешен, намеревался даже разогнать Академию, но вскоре сам лишился власти в результате заговора своих бывших соратников.

Почему физики брали на себя инициативу спасения биологии? По убеждению А. Д. Сахарова отставание и невежество в одной области науки неизбежно ведет к застою и некомпетентности в других. «Наука, как и вся культура, – считал он, – живет переливанием жизненных соков из одной сферы в другую, все ее сосуды сообщаются» [Пименов Р. И. Указ. соч.].

Понимание недостатков организации образования и науки привели ученого к мысли о несовершенстве всей государственной системы управления. Вызов системе был уже очень опасным делом, но это не остановило А. Д. Сахарова. Летом 1970 г. он развернул деятельность за освобождение Жореса Медведева из психиатрической больницы, куда тот был насильно помещен за изданную за границей книгу о «лысенковщине». Андрей Дмитриевич пришел на заседание Международного конгресса биологов, проходившего в Москве, и написал на доске обращение по-русски и по-английски: «Ваш коллега по политическим мотивам помещен в психиатрическую больницу. Помогите!». Опасаясь международного скандала, власти распорядились выпустить Жореса Медведева на свободу.

Когда для помощи притесняемым властями не хватало международного авторитета, академик помогал личными средствами. Например, им была сорвана провокация КГБ против опального украинского поэта Михаила Осадчего, отбывавшего ссылку в Коми АССР в поселке Троицко-Печорское, где тот устроился на работу сторожем. Во время одного из дежурств сгорела сторожевая будка. Власти оценили ущерб в тысячу рублей, что в десятки раз превышало ее реальную стоимость. М. Осадчему грозил тюремный срок, но А. Д. Сахаров выслал деньги для возмещения ущерба. Суд не состоялся. Оказалось, что этот человек может не только противостоять власти, но и побеждать ее. Впрочем, система была еще очень сильна. Побеждать ее удавалось только в редких случаях. Так, например, ничем не смог помочь правозащитник Мустафе Джемилову, который боролся за возвращение на родину крымских татар, сосланных в Сибирь. За распространение «заведомо ложных измышлений, порочащих государственный и общественный строй», ему полагалось лишение свободы до трех лет. Суд проходил весной 1976 г. в

Омске. На его заседание специально прибыл А. Д. Сахаров, которого даже не пустили в зал «из-за нехватки свободных мест» [Дитковский В. Сахарова не пустили в Омский облсуд // Неделя. 2000. № 43]. По крайней мере такой была официальная причина отказа.

Кроме трудов в области ядерной физики А. Д. Сахаров оставил после себя теоретическое наследие в области социальных и гуманитарных наук, где он, естественно, не был специалистом. В частности, им был разработан проект Конституции Союза Советских Республик Европы и Азии, во второй статье которого провозглашались цели народа и государства: «Счастливая, полная смысла жизнь, свобода материальная и духовная, благосостояние, мир и безопасность для граждан страны, для всех людей на Земле, независимо от их расы, национальности, пола, возраста и социального положения». В третьей статье проекта закреплялся приоритет «глобальных целей выживания человечества перед любыми региональными, государственными, национальными, классовыми, партийными, групповыми и личными интересами» [Собчак А. Идеи Сахарова // Известия. 1990. 14 января].

Очевидно, что в названии и главных разделах предлагаемой Конституции фигурировали идеи глобализации и конвергенции. В ней автором упоминаются народы не только своей страны, но и всего мира, которые должны объединиться и поступиться своими интересами ради выживания всей планеты. Конечно, здесь не обошлось без социального романтизма и политической наивности. Как показывает современная практика, идея глобализма реализуема в эпоху прогрессирующего развития мировой экономики, а в периоды ее кризисов оказывается не только несостоятельной, но и вредной. В свою очередь идея конвергенции, т. е. слияния капитализма и социализма в единую систему, проявляется даже в названии документа, где из названия Союза ССР удалено само слово «социалистический». Еще в 1968 г. в манифесте «Размышления о прогрессе, мирном сосуществовании и интеллектуальной свободе» А. Д. Сахаров утверждал, что нет никаких оснований говорить о преимуществе советской экономики над западной. Согласно теории марксизма экономический базис определяет сущность всякого общества. Следовательно, преимущества социалистической системы автором отрицались, а значит конвергенции не следует избегать. Идея конвергенции, выдвинутая Д. Гэлбрейтом (США), на деле имела целью не гармоничное сочетание двух антагонистических систем, а поглощение социализма капитализмом, что и произошло, как только в

советскую экономику стали внедряться капиталистические отношения. А. Д. Сахарову при всей его гениальности предвидеть это не удалось.

Вместе с тем Андрея Дмитриевича нередко называют буревестником перестройки. Действительно, задолго до ее начала в своих правозащитных и социологических трудах, в письмах к советскому руководству и лично Л. И. Брежневу он предлагал: прекратить гонку вооружений, разработать научные методы и принципы международной политики; принять закон «О печати и информации», ликвидировать идеологическую цензуру; обеспечить гласность и общественный контроль в процессе принятия важнейших правительственных постановлений; довести до конца разоблачение сталинизма, добиться фактического равноправия всех граждан, отменить партийные и служебные привилегии, осуществить экономическую реформу, предоставить полную хозяйственную самостоятельность предприятиям; принять закон о «гигиене», который должен слиться с мировыми усилиями в области защиты экологической среды [Исачкин С. П. Политическое и социально-экономическое развитие СССР во второй половине 60-х – первой половине 80-х гг. Омск, 1992. С. 19, 20]. Неслучайно лидер эпохи перестройки С. М. Горбачев отменил ссылку академика в Горький, куда он был отправлен в 1980 г. по сути дела за диссидентскую деятельность. Однако данные преобразования возможны были только в рамках социализма, а это в свою очередь противоречило идее конвергенции.

Таким образом, личность Андрея Дмитриевича Сахарова следует оценивать в трех измерениях: как ученого-ядерщика, исследователя в области социально-гуманитарных наук и общественного деятеля, правозащитника. Его вклад в развитие мировой физики трудно переоценить. Это признано во всем мире. Именно за научную деятельность в данной области он получил звание академика и трижды Героя Социалистического Труда, стал лауреатом Ленинской и Государственной премий. А. Д. Сахаров был членом многих научных ассоциаций: Национальной академии наук (США), Американского физического общества, Французской, Венецианской, Голландской и других академий, лауреатом премий Томалла и Альберта Эйнштейна. В сфере социально-гуманитарных наук Андрей Дмитриевич не был профессионалом, его труды следует рассматривать как предложения по совершенствованию общества в СССР и во всем мире. В них западные идеи глобализации и конвергенции нередко переплетались с убеждением возможности

реформирования существующей государственной системы в Советском Союзе. Все это приводило к явным противоречиям в его работах. Насколько он был рационален и расчетлив в ядерной физике, настолько романтичен и наивен в общественном знании. Однако нет никаких сомнений в искренности выдвигаемых автором идей и вере в их справедливость.

К правозащитной деятельности А. Д. Сахарова следует относиться осторожно. С одной стороны, он помогал многим людям от простого рабочего до академика, когда ущемлялись их права, с другой, – вольно или невольно расшатывал государственные устои, что в условиях России очень опасно. В 1975 г. ему была присуждена Нобелевская премия за «бесстрашную поддержку фундаментальных принципов мира между людьми» и «мужественную борьбу со злоупотреблением властью и любыми формами подавления человеческого достоинства» [<https://www.culture.ru/persons/3281/andrei-sakharov>]. Нетрудно догадаться, какая из этих формулировок являлась определяющей при выборе лауреата. Впоследствии сам А. Д. Сахаров признавал, что вручение ему Нобелевской премии явилось признанием заслуг всего правозащитного движения в СССР. Однако и в этом случае им двигали исключительно нравственные принципы, видимо, по-другому он поступать не мог. В этом Андрей Дмитриевич Сахаров видел свой гражданский долг.

С. П. Исачкин, профессор ОмГУПС, доктор исторических наук

**Секция 1 «Методы и средства измерений, неразрушающего
и аналитического контроля, диагностирования подвижного состава,
транспортной инфраструктуры и промышленных объектов»**

УДК 620.193

А. А. Кузнецов¹, А. С. Брюхова¹, Т. А. Лабути²

¹Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС), г. Омск, Российская Федерация,

²Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова (МГУ),
г. Москва, Российская Федерация

**ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПРОДУКТОВ КОРРОЗИИ В
ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЯХ ПРИ ИЗМЕНЕНИИ СЕЧЕНИЯ
АРМАТУРНЫХ СТЕРЖНЕЙ**

В работе представлены результаты экспериментальных исследований по образованию продуктов коррозии в результате воздействия на железобетонные конструкции агрессивной среды и электрического тока. Обсуждаются результаты определения продуктов коррозии при помощи лазерно-искровой эмиссионной спектрометрии. Приведены результаты испытаний образцов с использованием рентгенографического метода.

Ключевые слова: железобетонные конструкции, дефекты коррозии, спектральный анализ, рентгенографический метод.

Andrey A. Kuznetsov¹, Anna S Bryukova¹, Timur A. Labutin²

¹Omsk State Transport University (OSTU), Omsk, the Russian Federation,

²M. V. Lomonosov Moscow State University (MSU), Moscow, the Russian Federation

**RESEARCH OF CORROSION PRODUCTS DISTRIBUTION IN
REINFORCED CONCRETE CONSTRUCTIONS WHEN CHANGING
SECTION OF REINFORCEMENT RODS**

The paper presents the results of experimental studies on the formation of corrosion products as a result of exposure to an aggressive environment and electric current on reinforced concrete structures. The results of the determination of corrosion products using laser-spark emission spectrometry are discussed. The results of testing samples using the X-ray method are presented.

Keywords: reinforced concrete structures, corrosion defects, spectral analysis, X-ray method.

Важной задачей при эксплуатации опор контактной сети железных дорог постоянного тока является диагностирование их коррозионного состояния. В эксплуатации находится большое количество железобетонных опор, многие из которых могут находиться в аварийном состоянии. Большое значение имеют методы диагностирования, выявляющие дефекты, в первую очередь потерю прочности, обусловленные коррозией арматурных стержней и бетонного камня.

Большинство методов диагностирования железобетонных конструкций относятся к неразрушающему контролю, основанными из которых являются ультразвуковой, электрохимический и визуальный методы. Их достоинства и недостатки описаны в работах [1–3]. В предлагаемой статье обсуждается использование рентгенографического метода по определению потерь металла арматурных стержней, последующего использования приборов лазерно-искровой эмиссионной спектрометрии (ЛИЭС) для обнаружения продуктов коррозии на поверхности железобетонных конструкций [4–6]. Так же обсуждаются вопросы создания лабораторных образцов с различной степенью коррозии, аналогичной для реальных конструкций.

Лабораторные образцы, исследуемые в работе, представляют собой бетонные блоки размером 200×60×60 мм с металлической арматурой в центре диаметром 10 мм и длиной так же 200 мм. Арматура выходит от верхней поверхности бетонного образца на 30 мм.

Для проведения эксперимента были подготовлены образцы: без отверстий, а также образцы, в которых были выполнены отверстия диаметром 2 мм перпендикулярно оси от поверхности до арматуры, моделирующие трещины в бетоне, обозначения которых: без отверстий (БО); одно отверстие (1О); два отверстия (2О); четыре отверстия (4О, см. рисунок 1).

Образцы подключались к внешнему источнику напряжения, что соответствует реальным условиям эксплуатации опор контактной сети. В трех ваннах, заполненных 3% раствором NaCl, находилось по четыре образца, арматура которых соединялась электрическим проводником. Время воздействия электрического тока и параметры источника питания приведены в таблице 1.

Подключение внешнего источника питания позволяет имитировать воздействие токов утечки и блуждающих токов от электрифицированного рельсового транспорта. Место стекания электрического тока с арматуры является анодом – на нем происходит окисление железа. Слой бетона будет выступать в качестве электролита, насыщенного различными ионами, где будет проходить процесс электролиза. В качестве катода выступает медная пластина.

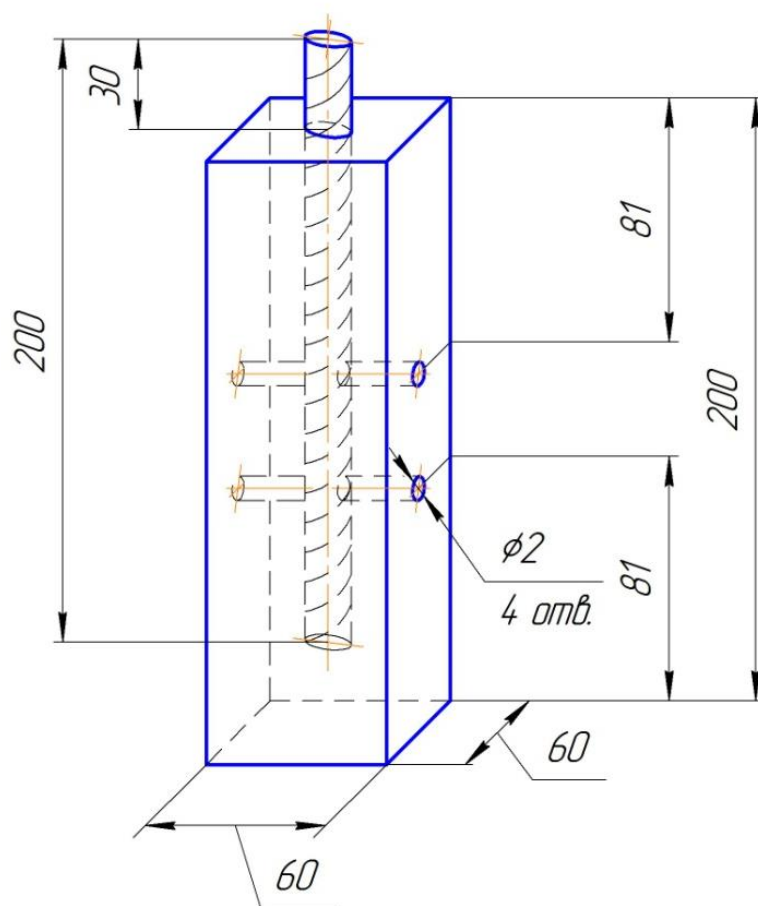


Рисунок 1 – Схематичное изображение лабораторного образца с четырьмя отверстиями (4О)

Таблица 1

Сводная таблица данных по эксперименту

№ ванны	Обозначение образцов	Кол-во образцов	Напряжение источника, В	Среднее значение тока, А	Время включения тока, час
1	1В2О	2	5	0,40	102
	1В4О	2			
2	2В1О	2		0,45	102
	2В2О	2			
3	3ВБО	4		0,30	78

Параметры прочности во многом определяются состоянием арматурных стержней, степенью их сцепления с бетонным камнем. Фотографии

визуального состояния образцов после электролиза представлены на рисунке 2(а), и рисунке 3(а). Рентгеновские снимки тех же образцов во взаимно перпендикулярных положениях показаны на рисунке 3(б), в и рисунке 3(б).

Как видно из рисунков, наибольшей коррозии при использованной схеме электролиза подверглись верхние участки арматурных стержней рисунок 2(б, в), что обусловлено контактом с атмосферным воздухом, наличием агрессивной среды и протеканию электрического тока. Потеря металла по площади поперечного сечения для испытываемых образцов составляла до 43%.

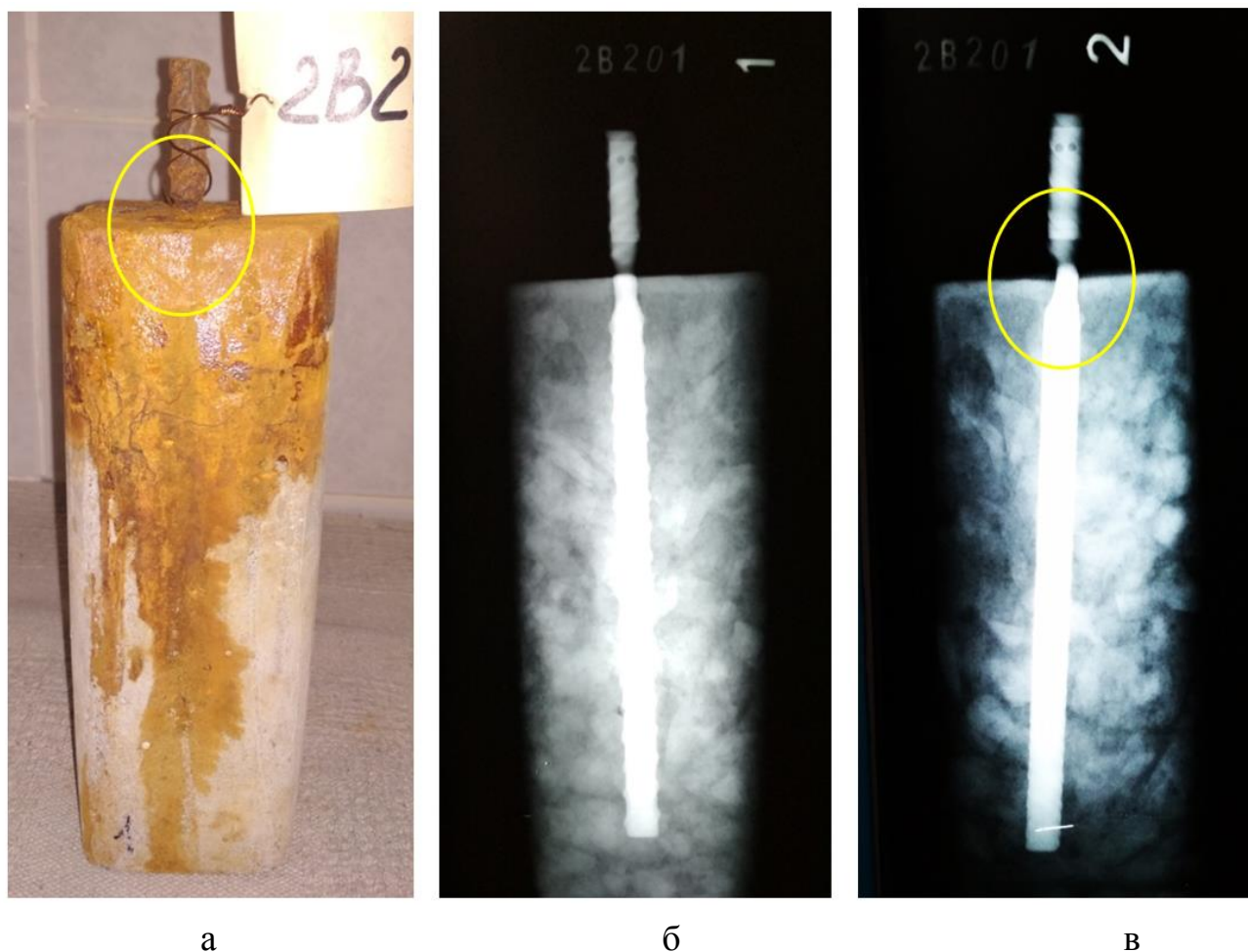


Рисунок 2 – Внешний вид (а) и рентгеновские снимки (б, в) образца 2B2O

Другой случай потери металла арматурных стержней наблюдался для дефектов сплошности железобетонного образца. Через отверстие, имитирующее трещину, в электролит переносились продукты коррозии, состоящие из оксидов железа. На рисунке 3(а) показан след от оксидов железа перенесенных от поверхности арматурного стержня через отверстие, имитирующее трещину на поверхность бетона. В нижней части арматурного стержня на рисунке 3(б) показан выход металла напротив сквозного отверстия

от поверхности бетона до арматурного стержня. Потеря металла по площади поперечного сечения для образца 1В2О составила 15,9%.

Для исследования распространения коррозии в железобетонных образцах использовались приборы спектрального анализа, в основу которых положен метод лазерно-искровой эмиссионной спектроскопии (ЛИЭС) [4].

Измерения с временной селекцией проведены на экспериментальной установке, описанной в [4]. Излучение второй гармоники АИГ:Nd-лазера с ламповой накачкой LOTIS LS-2134UTF (532 нм, энергия импульса 80 ± 1 мДж, длительность 6 нс, частота 5 Гц) фокусировали на поверхность образца с помощью ахроматического дублета с $f = 150$ мм. Излучение плазмы зарегистрировано с помощью спектрографа, оснащенного стробируемым высокоскоростным детектором «Наноскан-2В».

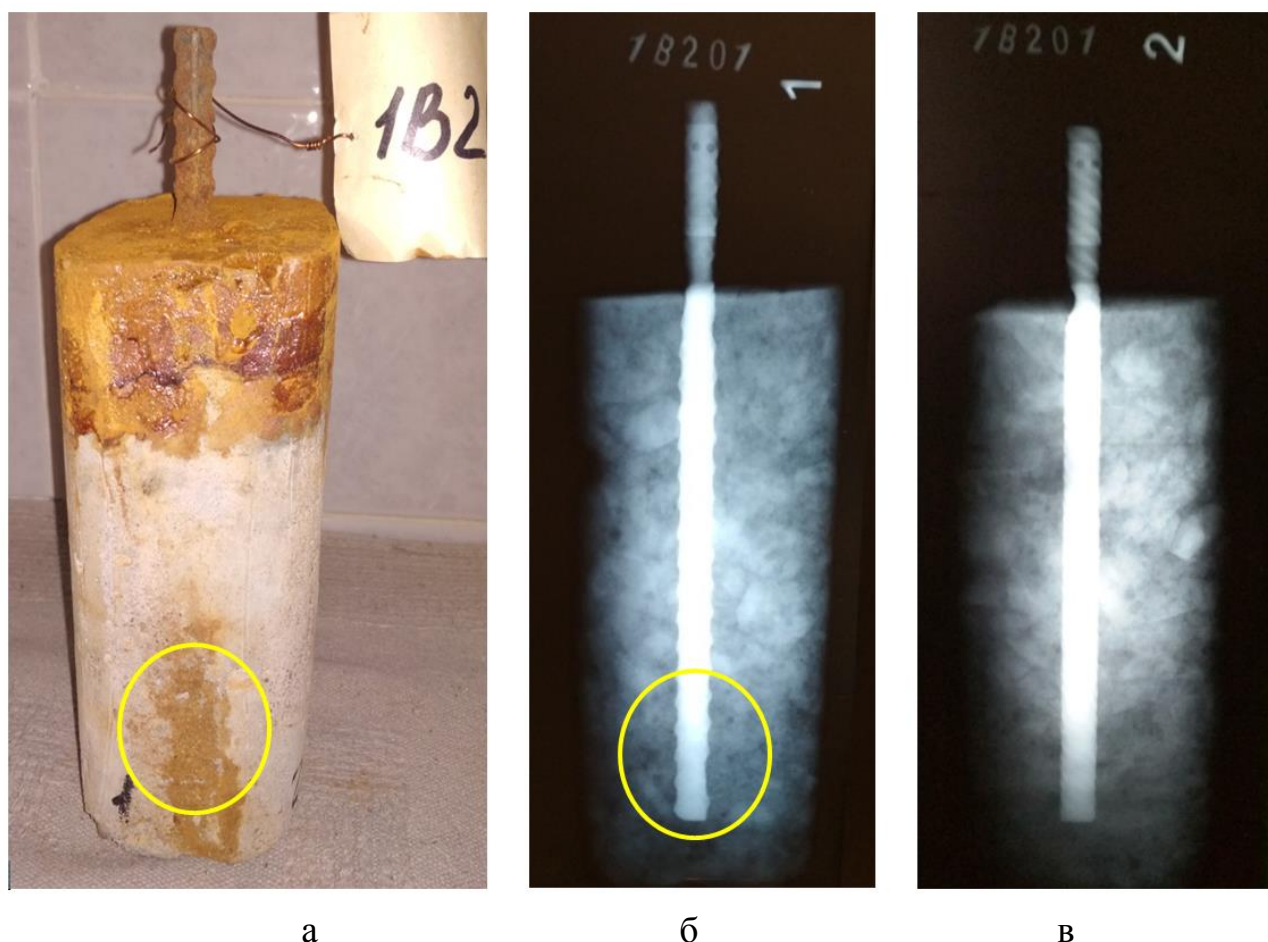


Рисунок 3 – Внешний вид (а) и рентгеновские снимки (б, в) образца 1В2О

В качестве нестробируемой ЛИЭС-системы использован портативный комплекс LIBZ-200 (SciAps, США). Образцы размещались на однокоординатном столике, лазерное излучение фокусировалось на 3 мм ниже

поверхности для улучшения воспроизводимости измерений (диаметр образующегося кратера около 0,2 мм).

Образец 3ВБО (таблица 1) имеет минимальное количество следов коррозии на поверхности бетона, а образец 1В2О – максимальное. Для сравнения образец ЧБ не подвергался электрокоррозии (чистый бетон). При подаваемом напряжении 5 В, ток различался, так как увеличение концентрации NaCl усиливает протекание электрокоррозии. После искусственного старения проведен рентгенографический контроль толщины стальной арматуры образцов 3ВБО и 1В2О (рисунок 2). Полученные изображения арматуры позволили установить, что толщина арматур при электролизе уменьшилась, т. е. эта часть стальной арматуры проникает в цементный камень и за счет соединений железа окрашивает его.

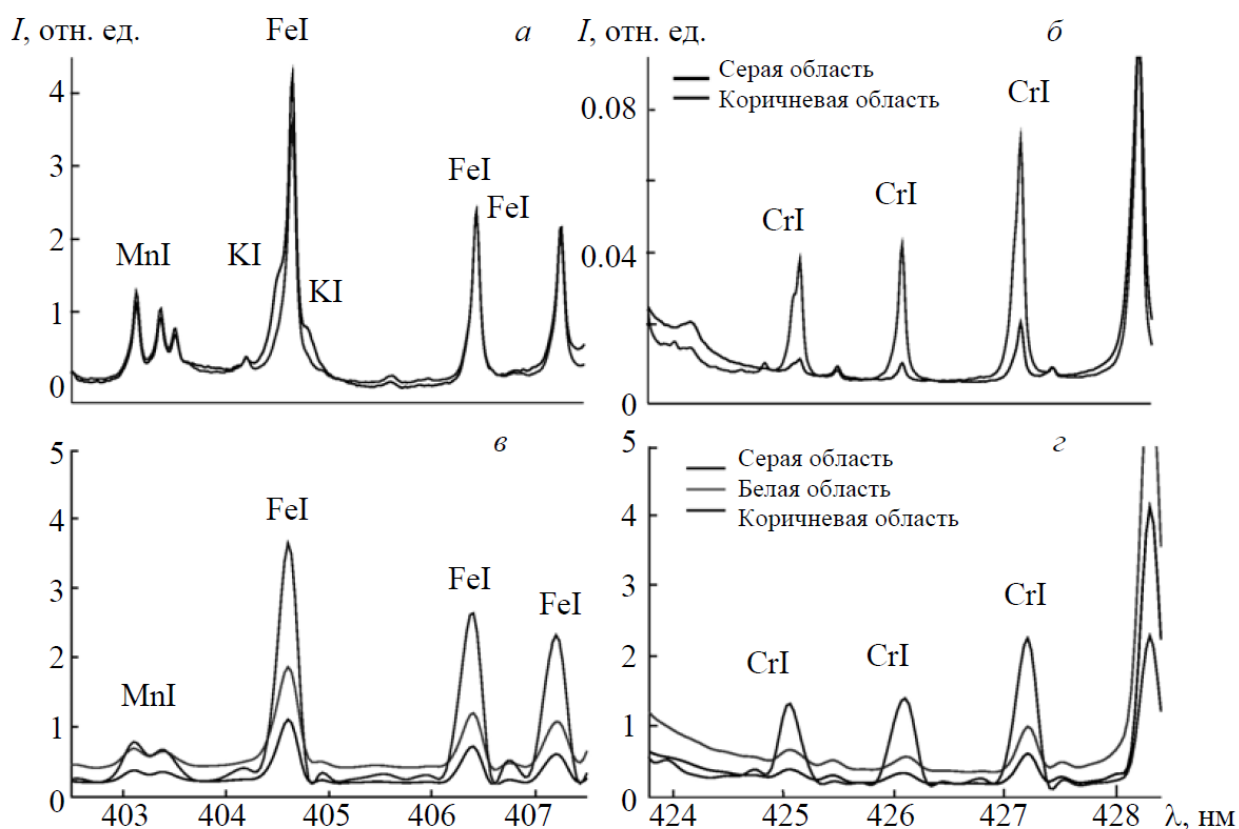


Рисунок 4 – Сравнение ЛИЭС спектров бетона для стробируемого (а, б) и нестробируемого (в, г) ПЗС вблизи $\lambda = 404$ (а, в) и $\lambda = 426$ нм (б, г).

Спектры получены при использовании нестробируемого детектора, то есть без возможности выбора времени наблюдения. Представлены типичные спектры трех частей лабораторных образцов железобетонных конструкций в разных местах белой, серой и коричневой.

На рисунке 4, в представлен спектр, полученный с помощью LIBZ-200, вблизи выбранных линий марганца. В данном случае наблюдается плазма за весь период своего существования, когда значительно изменяются температура и электронная плотность, поэтому штарковский сдвиг и ширина линий также изменяются. Это приводит к асимметрии контуров линий. Также в этом случае аппаратная функция не позволяет полностью разрешить резонансные линии марганца вблизи 403 нм. При таком варианте значимые различия наблюдаются только между точками поверхности с заметными следами коррозии. Совершенно иная картина при использовании стробирования (рисунок 4, а): сигналы железа и марганца существенно выше в образце, подвергавшемся электролитической коррозии. Причиной такого различия для разных типов детекторов могут быть изменения свойств бетона при старении, что сказывается на процессе абляции и времени свечения лазерно-индуцированной плазмы. Схожая ситуация наблюдается с линиями хрома (рисунок 4, б, г), при этом линии достаточно интенсивны в случае как стробируемого, так и нестробируемого детектора.

Заключение.

На основании рентгеновского исследования образцов бетона установлено значимое растворение арматуры при старении железобетонных изделий в электролитической ванне. Сравнение стробируемого и нестробируемого детекторов в методе лазерно-искровой эмиссионной спектрометрии для определения продуктов коррозии на поверхности бетона показывает значительные различия в сигналах железа, хрома и марганца на всех участках поверхности только при выборе подходящего времени наблюдения спектров. В случае нестробируемого детектора различия проявляются только при попадании на окрашенные участки поверхности, т. е. в местах наибольшего накопления продуктов коррозии. Это, по-видимому, связано с влиянием матричных эффектов на время свечения лазерной плазмы. Продемонстрирована перспективность лазерно-искровой эмиссионной спектрометрии для определения продуктов коррозии на поверхности железобетонных изделий при использовании стробируемого детектора.

Исследования выполнены при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 19-03-00858-а).

Список литературы

1. Кузнецов, А. А. Определение количественного содержания продуктов коррозии на поверхности железобетонных изделий / А. А. Кузнецов, А. С. Брюхова. – Текст : непосредственный. // Омский научный вестник – 2018. – № 6 (162). – С. 160–164.
2. Метод определения коррозионного состояния подземной части железобетонных опор контактной сети / В. А. Кандаев, К. В. Авдеева, А. В. Колесник, А. В. Пономарев. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2016. – № 1 (25). – С. 54–60.
3. Кандаев, В. А. Программный модуль формирования панорамного изображения внутренней поверхности подземной части пустотелых железобетонных опор контактной сети и анализа распознанных неоднородностей / В. А. Кандаев, М. А. Леденёв, А. В. Пономарев. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2017. – № 1 (29). – С. 99–105.
4. Determination of chlorine, sulfur and carbon in reinforced concrete structures by double-pulse laser-induced breakdown spectroscopy / T. A. Labutin, A. M. Popov, S. M. Zaytsev [et al.]. – Text: direct // Spectrochimica Acta Part B-Atomic Spectroscopy. – 2014. – №99. – PP. 94–100.
5. Simulation of the Behavior of Corrosion Damaged Reinforced Concrete Beams with/without CFRP Retrofit / Masoud Zabihi-Samani, Mohsenali Shayanfar, Amir Safiey, Amir Najari. – Text: direct // Civil Engineering Journal. – 2018. – Vol. 4. – №5.
6. Zeynalian, M. Structural performance of concrete poles used in electric power distribution network / Mehran Zeynalian, Mehrdad Zamani Khorasgani. – Text: direct // Civil and Mechanical Engineering. – 2018. – Vol. 18. – PP. 863–876.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Кузнецов Андрей Альбертович

Омский государственный университет
путей сообщения (ОмГУПС).

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

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

Тел.: 8-904-321-50-90.

kuznetsovaa.omgups@gmail.com.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Kuznetsov Andrey Albertovich

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx av.m, Omsk, 644046,
the Russian Federation.

Dr. Tech. Sci., professor, head of the
department “Theoretical the electrical
engineer” OSTU.

Phone: 8-904-321-50-90.

kuznetsovaa.omgups@gmail.com.

Брюхова Анна Сергеевна

Омский государственный университет
путей сообщения (ОмГУПС).
Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046,
Российская Федерация.
Инженер кафедры «Теоретическая
электротехника» ОмГУПС.
Тел.: +7 (3812) 31-06-33.
E-mail: annaivan29@gmail.com.

Bryukhova Anna Sergeevna

Omsk State Transport University (OSTU).
35, Marx av.m, Omsk, 644046,
the Russian Federation.
Engineer of the department of “Theoretical
electrical engineering” OSTU.
Phone: +7 (3812) 31-06-33.
E-mail: annaivan29@gmail.com.

Лабутин Тимур Александрович

Московский государственный университет
имени М. В. Ломоносова (МГУ им.
М. В. Ломоносова).
Ленинские горы, д. 1, Москва, 119991,
Российская Федерация.
Кандидат химических наук, старший научный
сотрудник МГУ им. М. В. Ломоносова.
E-mail: timurla@mail.ru.

Labutin Timur Alexandrovich

M. V. Lomonosov Moscow State
University (MSU).
Leninskie Gory, GSP-1, Moscow, 119991,
the Russian Federation.
Candidate of Chemical Sciences,
Senior Researcher MSU.
E-mail: timurla@mail.ru.

УДК 543.423

Т. А. Лабутин¹, А. С. Брюхова²

¹Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова (МГУ),
Москва, Российская Федерация,

²Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС), г. Омск, Российская Федерация

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОДУКТОВ КОРРОЗИИ
НА ПОВЕРХНОСТИ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ИЗДЕЛИЙ**

В статье рассматривается возможность реализации спектрального анализа железобетонных конструкций с целью обнаружения коррозии стальной арматуры. Спектральный анализ выполнялся на двух различных приборах, установке ЛИЭС и портативном лазерном анализаторе американского производства LIBZ-300pe. Обсуждается способ создания образцов с искусственной электрокоррозией, в условиях приближенных к реальной эксплуатации.

Ключевые слова: железобетон, арматура, спектральный анализ, лазерный анализатор, коррозия.

EXPERIMENTAL STUDIES OF CORROSION PRODUCTS ON THE SURFACE OF REINFORCED CONCRETE PRODUCTS

The article discusses the possibility of implementing spectral analysis of reinforced concrete structures in order to detect corrosion of steel reinforcement. Spectral analysis was performed on two different instruments, a LIBS setup and an American-made LIBZ-300pe portable laser analyzer. A method for creating samples with artificial electrocorrosion under conditions close to real operation is discussed.

Keywords: reinforced concrete, reinforcement, spectral analysis, laser analyzer, corrosion.

Железобетон широко известен как долговечный материал, в большинстве случаев не нуждающийся в какой-либо защите от воздействий внешней среды. Бетон, представляющий собой искусственный каменный материал, может быть изготовлен достаточно прочным и стойким против агрессивных воздействий, а стальная арматура обычно находится под надежной защитой слоя этого бетона.

Существенный недостаток железобетона – коррозия арматурной стали, которая является одним из наиболее значимых факторов, определяющих фактическое техническое состояние железобетонных конструкций, их надежность и долговечность. Коррозия арматуры вызвана, как правило, воздействием на железобетон атмосферно-химических факторов, обусловленных как агрессивными компонентами атмосферы (сульфаты, карбонаты, хлориды), так и частыми циклами мороз–оттепель. Именно коррозия арматуры может значительно сократить срок службы строительных конструкций, поэтому методы определения степени коррозионного состояния особенно актуальны.

В настоящей статье рассматривается спектральный метод анализа материалов, применяемый в задачах определения химического состава бетона на наличие продуктов коррозии. Возможность реализации определения степени коррозионного состояния железобетона подтверждена на двух различных приборах спектрального анализа, установке ЛИЭС и портативном лазерном анализаторе LIBZ-300pe.

Спектральный анализ широко используется в различных отраслях

промышленности и науки, и служит универсальным инструментом, который позволяет точно и оперативно исследовать элементный состав вещества. Эта информация необходима для правильного ведения технологических процессов, контроля качества исходных материалов, промежуточного и готового продуктов, а также позволяет создавать новые материалы с заданными качествами [1].

Экспериментальные исследования проводились на заранее подготовленных образцах железобетона с различным содержанием коррозии.

Измерения с временной селекцией проведены на экспериментальной установке ЛИЭС, описанной в [2]. Схема экспериментальной установки ЛИЭС представлена на рисунке 1. Излучение второй гармоники АИГ: Nd-лазера с ламповой накачкой LOTIS LS-2134UTF (532 нм, энергия импульса 80 ± 1 мДж, длительность 6 нс, частота 5 Гц) фокусировали на поверхность образца с помощью ахроматического дублета с $f = 150$ мм. Излучение плазмы зарегистрировано с помощью спектрографа, оснащенного стробируемым высокоскоростным детектором «Наноскан-2В».

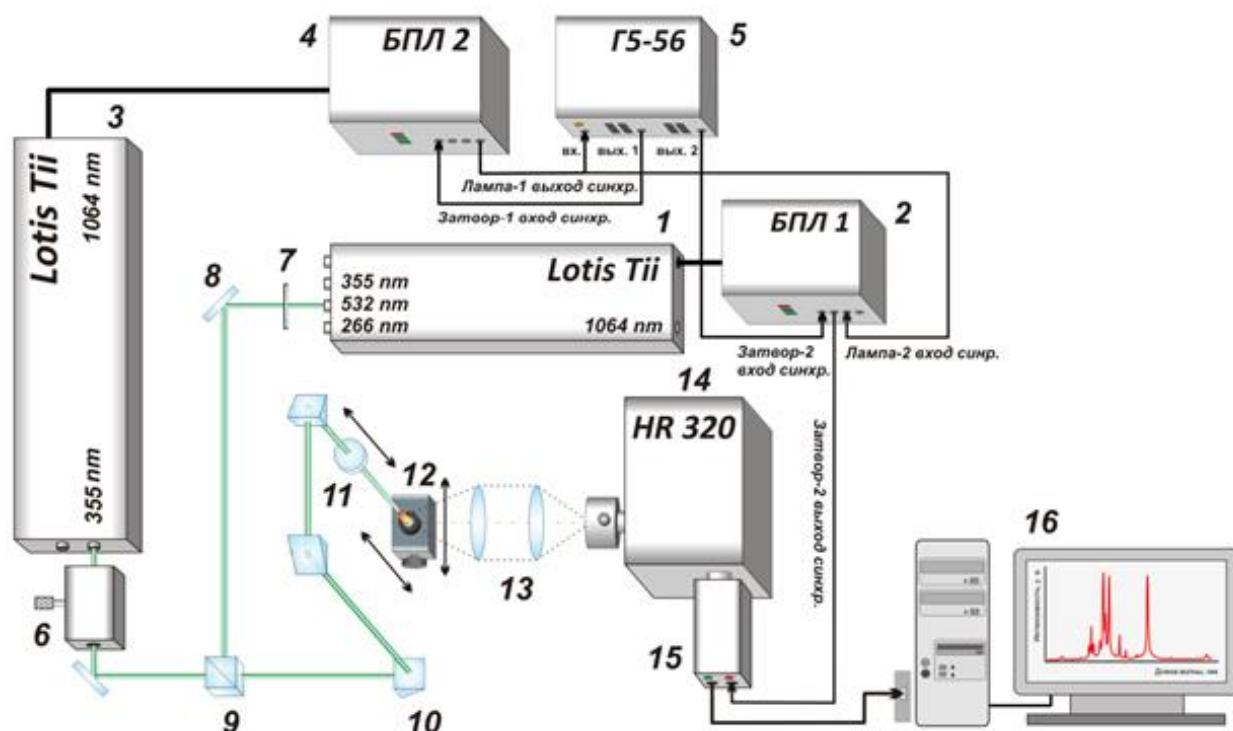


Рисунок 1 – Схема экспериментальной установки ЛИЭС:

- 1, 3 – лазер; 2, 4 – блок питания лазера; 5 – двухканальный генератор импульсов;
- 6 – аттенюатор; 7 – полуволновая пластинка; 8 – зеркало; 9 – поляризационный куб;
- 10 – призма; 11 – ахроматический объектив; 12 – двухкоординатный столик;
- 13 – кварцевый двухлинзовый конденсор; 14 – спектрограф;
- 15 – стробируемая электронно-оптическая камера; 16 – персональный компьютер

Спектры, полученные на экспериментальной установке ЛИЭС, представлены на рисунках 2 – 4.

На рисунке 2 изображены спектры двух образцов О2 (grey) (бетон с малым содержанием следов коррозии) и О4 (ochre) (бетон с большим содержанием коррозии) в диапазоне 290-310 нм. На длинах волн 308,374 нм и 309,157 нм зарегистрированы спектральные линии железа. По полученным значениям интенсивности можно сделать вывод о том, что образец с большим содержанием продуктов коррозии имеет наибольшее значение интенсивности спектральных линий железа.

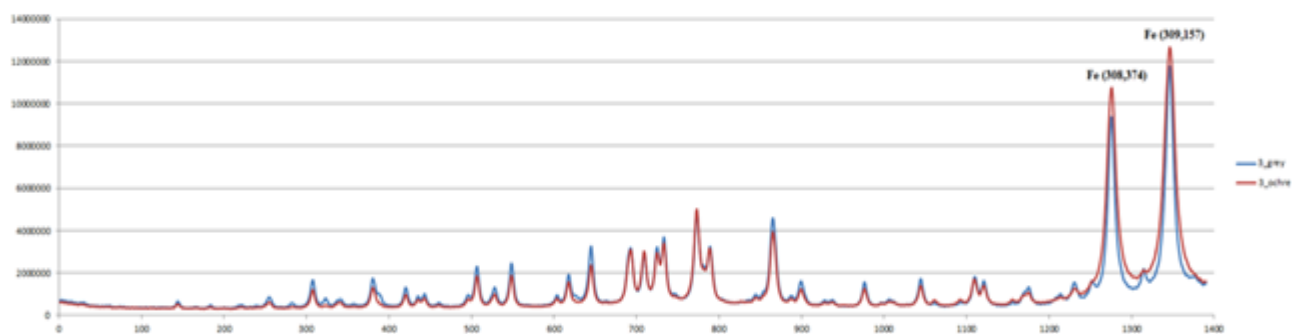


Рисунок 2 – Спектры образцов с различной степенью коррозии (290-310нм)

На рисунке 3 представлены значения интенсивностей тех же образцов в диапазоне 316-336 нм. Образец О4 (ochre) имеет большие пики на линиях железа (330,78 нм, 336,67 нм, 337,86 нм) по сравнению с образцом О2 (grey).

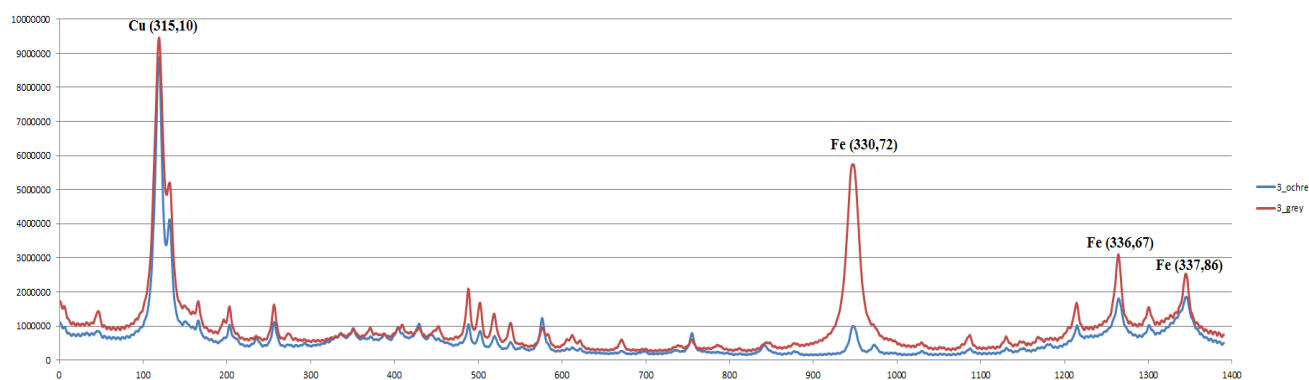


Рисунок 3 – Спектры образцов с различной степенью коррозии (316 нм-336нм)

Аналогичную картину можно наблюдать на рисунке 4 на диапазоне 392 нм-412 нм.

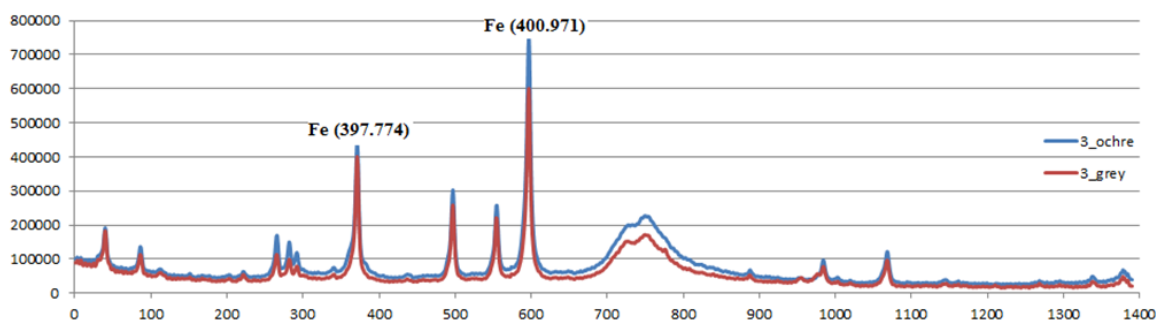


Рисунок 4 – Спектры образцов с различной степенью коррозии (392-412).

В качестве нестробируемой ЛИЭС-системы использован портативный комплекс LIBZ-300 (SciAps, США). Образцы размещались на однокоординатном столике, лазерное излучение фокусировалось на 3 мм ниже поверхности для улучшения воспроизводимости измерений (диаметр кратера ~0.2 мм). Внешний вид прибора представлен на рисунке 5.



Рисунок 5 – Портативный лазерный анализатор LIBZ-300

При помощи прибора LIBZ-300 были проанализированы те же три образца с различным содержанием продуктов коррозии. Аналогично, как и для установки ЛИЭС образцы О4 (ochre) и О2 (grey), а также ОО – чистый бетон. Спектры, полученные на LIBZ-300, представлены на рисунках 6, 7.

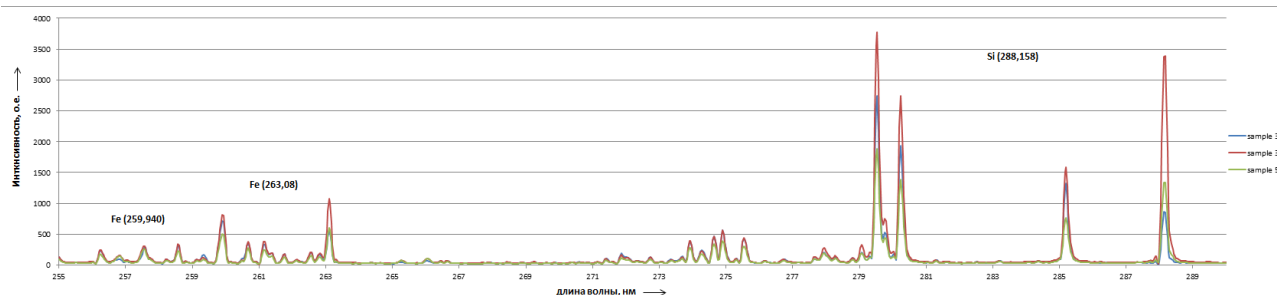


Рисунок 6 – Спектры трех образцов с различным содержанием продуктов коррозии в диапазоне 255-289 нм

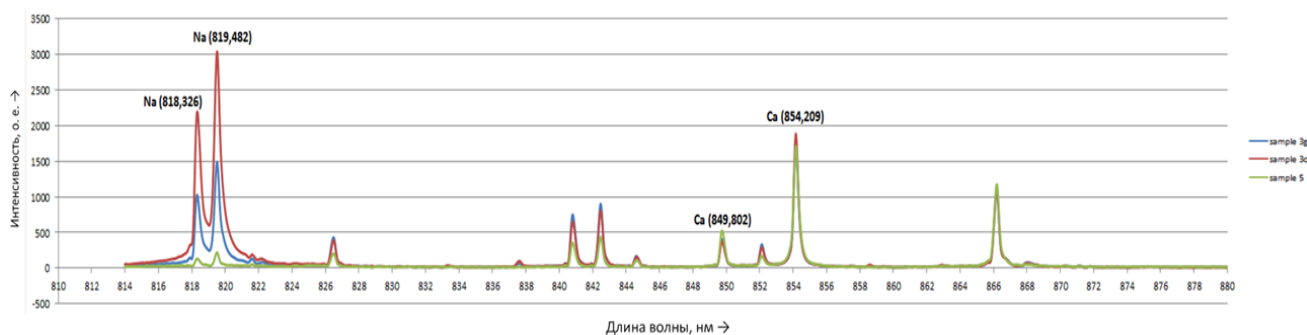


Рисунок 7 – Спектры трех образцов с различным содержанием продуктов коррозии в диапазоне 810-880 нм

Таким образом, по результатам измерений и анализа образцов с различной степенью коррозии, выполненных на двух приборах спектрального анализа, можно подтвердить возможность и эффективность использования спектрального анализа в задачах диагностирования и определения коррозионного состояния железобетонных конструкций. Продемонстрирована перспективность лазерно-искровой эмиссионной спектрометрии для определения продуктов коррозии на поверхности железобетонных изделий при использовании стробируемого детектора.

Номер проекта РФФИ, по результатам которого подготовлен доклад: 19-38-50047 мол-нр.

Список литературы

1. Практическое применение спектрального анализа // ИСКРОЛАЙН : сайт. – URL: <https://www.iskroline.ru/analysis/primenenie-spektralnogo-analiza/> (дата обращения: 29.09.20). – Текст: электронный.
2. Measurement system for high-sensitivity LIBS analysis using ICCD camera in LabVIEW environment / S. M. Zaytsev, A. M. Popov, N. B. Zorov, T. A. Labutin. – Text: electronic // Journal of Instrumentation. – 2014. – Vol. 9. – P.P 06010-P06010-18. – DOI: <http://iopscience.iop.org/1748-0221/9/06/P06010>.
3. Брюхова, А. С. Определение количественного содержания продуктов коррозии на поверхности железобетонных изделий / А. А. Кузнецов, А. С. Брюхова. – Текст : непосредственный // Омский научный вестник. – 2018. – № 6 (162). – С. 160–164. – DOI: 10.25206/1813-8225-2018-162-160-164.

4. Kuznetsov, A. A. Computer simulation of the process of electro corrosion of reinforced concrete structures in aggressive media / A. A. Kuznetsov, A. S. Bryukhova, N. V. Volkova. – Text: direct // Topical areas of fundamental and applied research XXII: Proceedings of the Conference. North Charleston, 22-23.06.2020 // Morrisville, NC. – USA: Lulu Press, 2020. – PP. 71–76.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Лабу́тин Тиму́р Алекса́ндрович

Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова (МГУ им. М. В. Ломоносова).
Ленинские горы, д. 1, Москва, 119991, Российская Федерация.
Кандидат химических наук, старший научный сотрудник МГУ им. М. В. Ломоносова.
E-mail: timurla@mail.ru

Брю́хова Анна Серге́евна

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).
Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046, Российская Федерация.
Инженер кафедры «Теоретическая электротехника» ОмГУПС.
Тел.: +7 (3812) 31-06-33.
E-mail: annaivan29@gmail.com.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Labutin Timur Alexandrovich

M. V. Lomonosov Moscow State University (MSU).
Leninskie Gory, GSP-1, Moscow, 119991, the Russian Federation.
Candidate of Chemical Sciences, Senior Researcher MSU.
E-mail: timurla@mail.ru.

Bryukhova Anna Sergeevna

Omsk State Transport University (OSTU).
35, Marx av.m, Omsk, 644046, the Russian Federation.
Engineer of the department of “Theoretical electrical engineering” OSTU.
Phone: +7 (3812) 31-06-33.
E-mail: annaivan29@gmail.com.

УДК 620.193

А. А. Кузнецов, К. И. Фомиченко, И. А. Шныптев

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

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЧНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ ПОДВЕРЖЕННЫХ КОРРОЗИИ

В работе представлены результаты экспериментальных исследований по образованию продуктов коррозии в результате воздействия на железобетонные

конструкции агрессивной среды и электрического тока. Приведены результаты испытаний образцов с использованием рентгенографического метода и моделирования их прочностных характеристик.

Ключевые слова: железобетонные конструкции, дефекты коррозии, рентгенографический метод, моделирование прочности.

Andrey A. Kuznetsov, Kirill I. Fomichenko, Ivan A. Shnyptev

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

MODELING OF STRENGTH CHARACTERISTICS OF REINFORCED CONCRETE STRUCTURES SUBJECT TO CORROSION

This article contains results of experimental studies on the formation of corrosion products as a result of aggressive environment and electric currents action on the reinforced concrete structures.

Keywords: reinforced concrete structures, corrosion defects, X-ray method, strength characteristics modeling.

Основной причиной снижения прочности железобетонных конструкций является коррозия стальной арматуры, находящейся в бетоне. Попадание внешних агрессивных сред (хлориды, сульфаты), приводит к коррозии арматуры и, как следствие разрушению бетона.

В данной статье обсуждается использование рентгенографического метода по определению потери металла арматурных стержней. Так же обсуждаются вопросы создания лабораторных образцов с различной степенью коррозии, аналогичной для реальных конструкций. Приведены результаты моделирования прочности элементов железобетонных конструкций с разным диаметром арматурных стержней.

Для проведения эксперимента по коррозии арматуры в бетоне были подготовлены образцы, которые представляют собой бетонные блоки размером 200X60X60 мм с металлической арматурой в центре диаметром 10 мм и длиной так же 200 мм. Арматура выходит от верхней поверхности бетонного образца на 30 мм.

Технология изготовления соответствует технологии изготовления реальных железобетонных опор контактной сети. Цемент соответствует марке М350, а класс бетона по прочности – В30. Бетон состоит из цемента, песка, щебня (керамзит) и воды. Щебень и песок являются заполнителями бетонной смеси, а цемент – связующим веществом. Марка стальной арматуры 25Г2С.

Образцы были подвергнуты электролизу, для этого они были подключены к внешнему источнику напряжения, и помещены в ванны с 3% раствором NaCl. Электролиз выполнялся на протяжении 102 часов.

Подключение внешнего источника питания позволяет имитировать воздействие токов утечки и блуждающих токов от электрифицированного рельсового транспорта. Место стекания электрического тока с арматуры является анодом – на нем происходит окисление железа. Слой бетона будет выступать в качестве электролита, насыщенного различными ионами, где будет проходить процесс электролиза. В качестве катода выступает медная пластина.

В результате электролиза произошел выход продуктов коррозии на поверхность образцов рисунок 1, а. Для оценки утонения арматурных стержней был произведен рентгенографический анализ. Рентгеновский снимок представлен на рисунке 1, б.

Как видно из рисунков, наибольшей коррозии при использованной схеме электролиза подверглись верхние участки арматурных стержней, что обусловлено контактом с атмосферным воздухом, наличием агрессивной среды и протеканию электрического тока. Потеря металла по площади поперечного сечения для испытуемых образцов составляла до 43%.

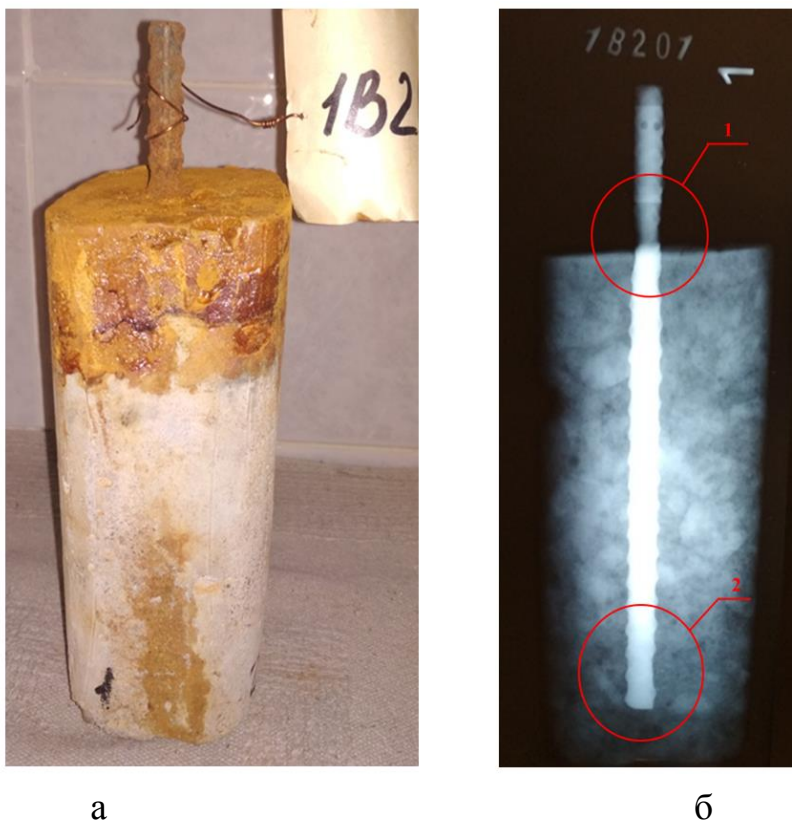


Рисунок 1 – Внешний вид (а) и рентгеновский снимок (б) образца:
1, 2 – зоны наибольшей коррозии

Для оценки прочности при различном сечении арматуры, в программном комплексе была смоделирована бетонная балка с размерами 60x60x1500 мм (рисунок 2). Для неё были заданы характеристики модели Concrete Damage Plasticity в соответствии с исследуемой маркой бетона.

Металлическая арматура с заданными свойствами соответствует приведенной выше марке стали. Арматура внедрена в бетон с помощью инструмента Embedded region. Использование данного инструмента позволяет внедрять внутрь объекта элементы с другими свойствами. За счёт чего поступательные степени свободы внедренного элемента (арматуры) рассчитываются в соответствии со значениями степеней свободы основного объекта (бетонного камня).

Балка была закреплена с отступом от края с возможностью вращательного движения вокруг оси закрепления, схема закрепления и приложения силы приведена на рисунке 3. К средней части была приложена концентрированная нагрузка от 2000 до 5000 Н (рисунок 4, 5).

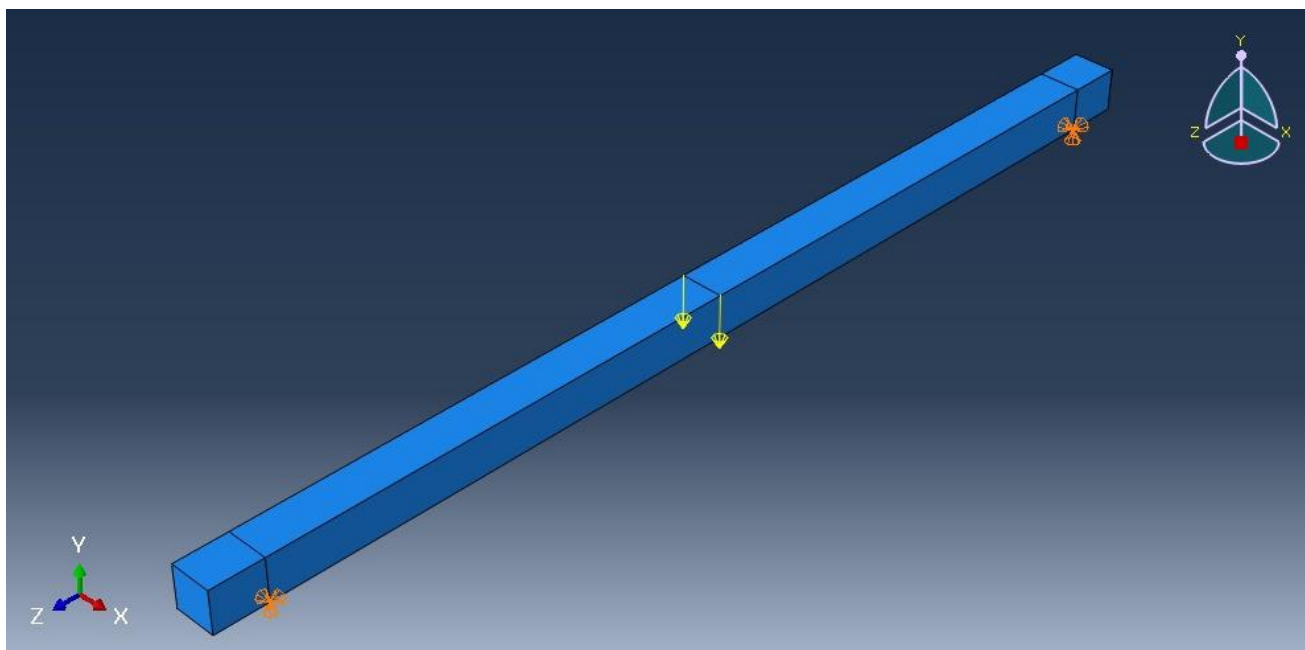


Рисунок 2 – Схема испытания бетонной балки с арматурным стержнем

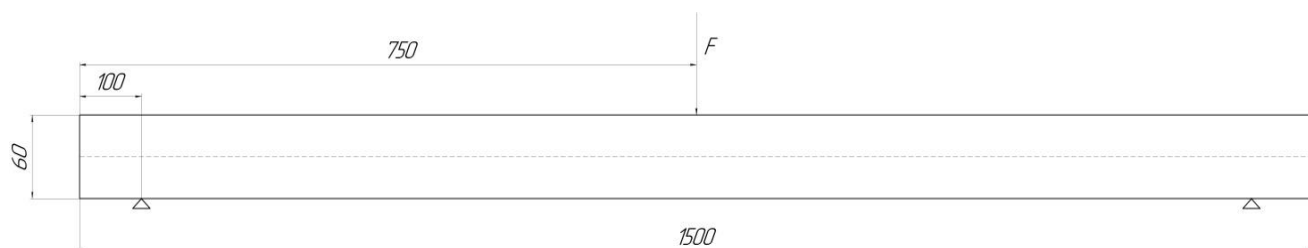


Рисунок 3 – Схема закрепления и приложения силы к балке

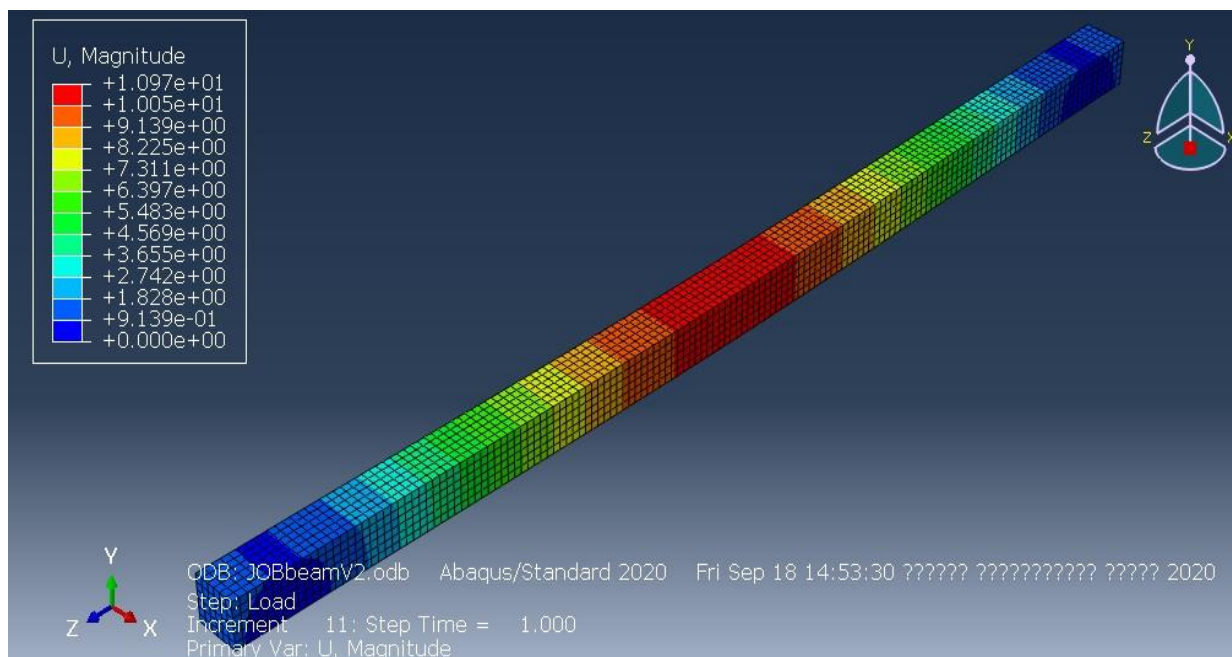


Рисунок 4 – Результат моделирования прогиба балки с арматурой 8 мм и нагрузке 5000 Н

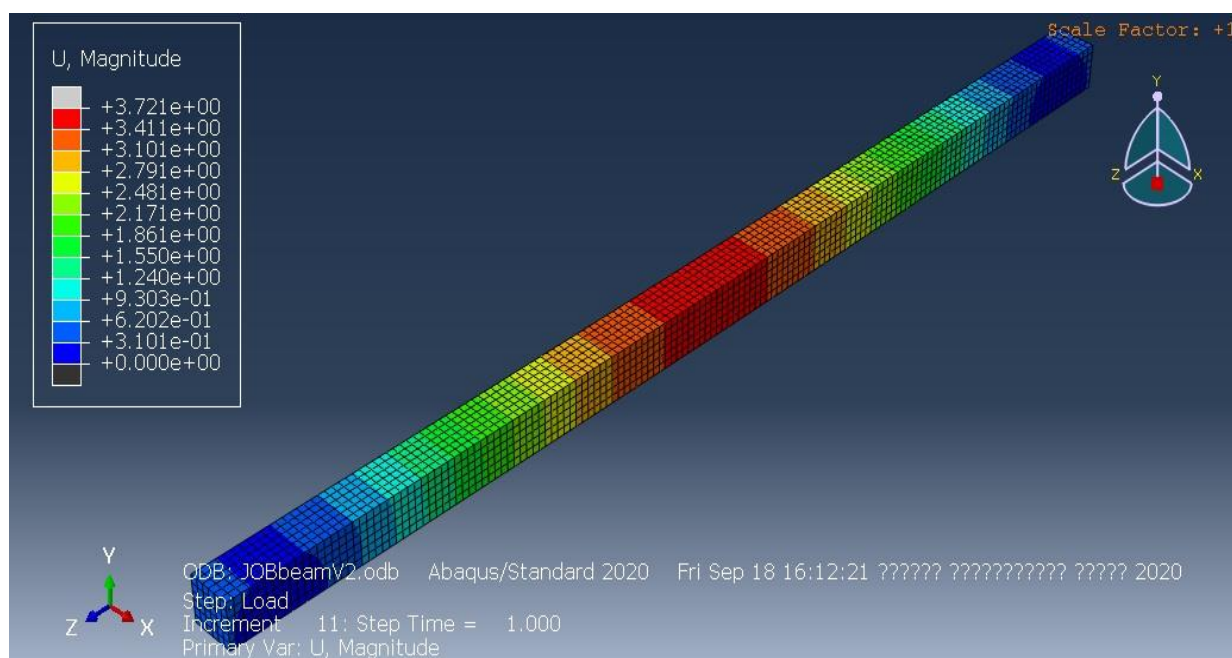


Рисунок 5 – Результат моделирования прогиба балки с арматурой 12 мм и нагрузке 2000 Н

Численные значения максимального прогиба железобетонной балки с различными сечениями арматурного стержня с различным значением приложенной нагрузки показано в таблице 1. Графическое представление прогиба балки показано на рисунке 6.

Таблица 1

Прогиб балки в зависимости от сечения арматуры и нагрузки

Диаметр арматуры, мм	Величина максимального прогиба, мм при нагрузке	
	2000, Н	5000, Н
12	3,538	10,67
10	3,773	10,83
8	3,821	10,97

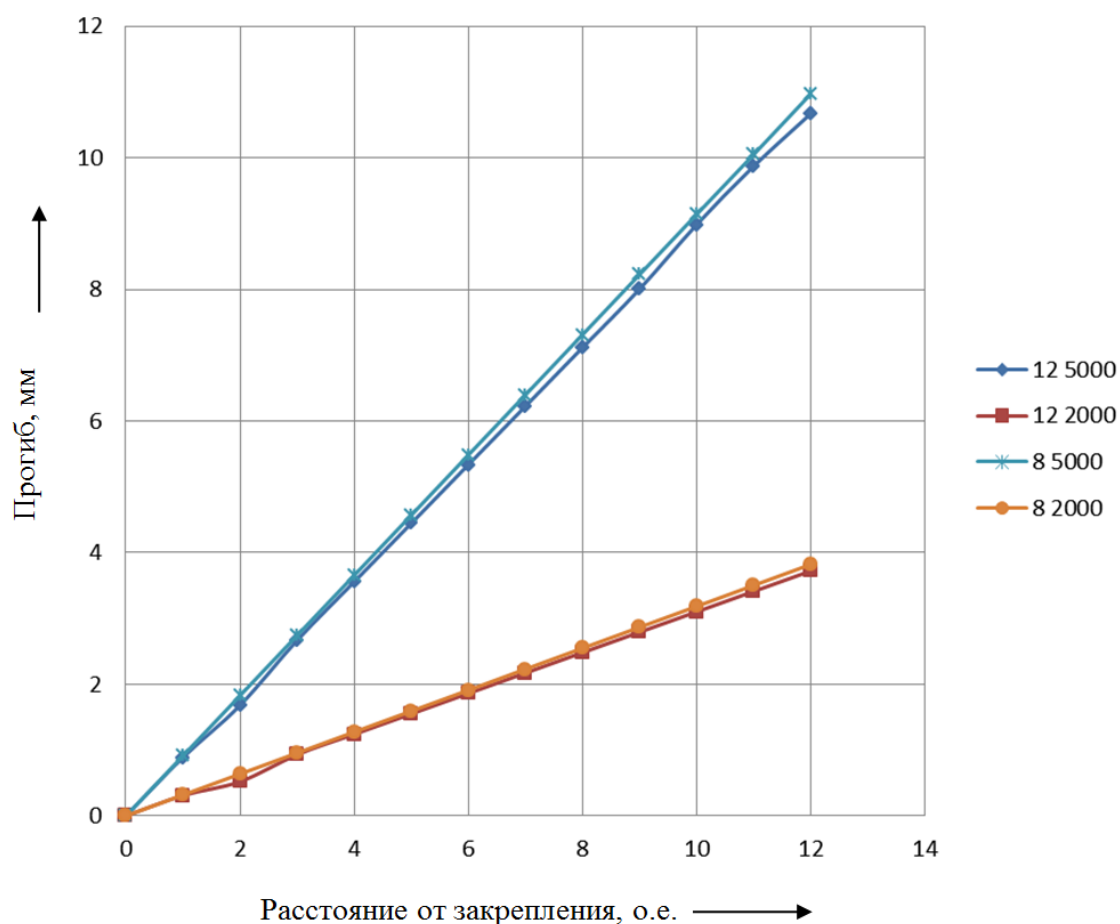


Рисунок 6 – Изменение прогиба от сечения арматуры и приложенной нагрузки

В статье рассмотрено изменение прочностных характеристик железобетонных конструкций при возникновении процесса коррозии с изменением диаметра арматурных стержней. Представлен способ получения прочностных характеристик железобетонной конструкции, с помощью метода конечно-элементного моделирования. Дальнейшие исследования будут направлены на моделирование работы конструкций под нагрузкой с локальными очагами коррозии, и прогнозирование распространения трещин.

Список литературы

1. Кузнецов, А. А. Определение количественного содержания продуктов коррозии на поверхности железобетонных изделий / А. А. Кузнецов, А. С. Брюхова // Омский научный вестник – 2018. – № 6 (162). – С. 160–164.
2. Метод определения коррозионного состояния подземной части железобетонных опор контактной сети / В. А. Кандаев, К. В. Авдеева, А. В. Колесник, А. В. Пономарев // Известия Транссиба. – 2016. – № 1 (25). – С. 54–60.
3. Zabihi-Samani, M. Simulation of the Behavior of Corrosion Damaged Reinforced Concrete Beams with/without CFRP Retrofit / Masoud Zabihi-Samani, Mohsenali Shayanfar, Amir Safiey, Amir Najari // Civil Engineering Journal. – 2018. – Vol. 4. – №5.
4. Zabihi-Samani, M. Structural performance of concrete poles used in electric power distribution network / Mehran Zeynalian, Mehrdad Zamani Khorasgani // Civil and Mechanical Engineering. – 2018. – PP. 863–876.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Кузнецов Андрей Альбертович

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046,

Российская Федерация.

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

Тел.: 8-904-321-50-90.

E-mail: kuznetsovaa.omgups@gmail.com.

Фомиченко Кирилл Игоревич

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046,

Российская Федерация.

Магистрант ОмГУПС.

E-mail: fomichenko.kiril@gmail.com.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Kuznetsov Andrey Albertovich

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx av.m, Omsk, 644046,

the Russian Federation.

Dr. Tech. Sci., professor, head of the department “Theoretical the electrical engineer” OSTU.

Phone: 8-904-321-50-90.

E-mail: kuznetsovaa.omgups@gmail.com.

Fomichenko Kirill Igorevich

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx av.m, Omsk, 644046,

the Russian Federation.

Student OSTU.

E-mail: fomichenko.kiril@gmail.com.

Шныптев Иван Алексеевич

Омский государственный университет путей
сообщения (ОмГУПС).

Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046,

Российская Федерация.

Аспирант кафедры «Теоретическая
электротехника» ОмГУПС.

Тел.: 8-960-989-29-32.

E-mail: shnivan@rambler.ru.

Shnyptev Ivan Alexeevich

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx av.m, Omsk, 644046,

the Russian Federation.

Post graduate student of chair “Theoretical the
electrical engineer” OSTU.

Phone: 8-960-989-29-32.

E-mail: shnivan@rambler.ru.

УДК 621.785.01: 629.7: 004.3

Н. В. Пашкова, Н. А. Хмырова

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС),

г. Омск, Российская Федерация

РАЗРАБОТКА ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ КОНТРОЛЯ ХАРАКТЕРИСТИК ЗАКАЛОЧНЫХ СРЕД

Наиболее распространенный вид термической обработки металлов и сплавов – закалка, при которой существенное значение имеют температура нагрева и закалочная среда. К важным характеристикам закалочных сред относятся скорость охлаждения и вязкость. В статье представлена структурная схема измерительного комплекса для контроля этих характеристик. Описан принцип работы комплекса.

Ключевые слова: закалочные среды, скорость охлаждения, охлаждающая способность, датчик температуры, термонара, вязкость.

Natalia V. Pashkova, Natalia A. Khmyrova

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

DEVELOPMENT OF A MEASURING COMPLEX FOR CONTROL OF CHARACTERISTICS OF HARDENING MEDIUMS

The most common type of heat treatment of metals and alloys is quenching, in which the heating temperature and quenching medium are essential. Cooling rate and viscosity are important characteristics of quench media. The article presents a block diagram of a measuring complex for monitoring these characteristics. The operating principle of the complex is described.

Keywords: hardening medium, cooling rate, cooling capacity, temperature sensor, thermocouple, viscosity.

Для улучшения эксплуатационных качеств металлов проводится термическая обработка, которая позволяет повысить их твердость и прочность для возможности более широкого использования в различных отраслях народного хозяйства для разнообразных целей.

Одним из видов термической обработки металлов является закалка. Закалка – это процессы нагревания металла до критической температуры, при которой происходит изменение кристаллической решетки, и охлаждения с определенной скоростью.

Важнейшими параметрами закалки являются температура нагрева и скорость охлаждения металла, которые обеспечивают свойства конечного изделия [1].

Процесс охлаждения изделий, нагретых до температуры, превышающей температуру кипения закалочных сред, имеет несколько этапов. В момент погружения изделия закалочная среда вблизи детали начинает кипеть, и вокруг детали образуется пленка перегретого пара. Эта паровая рубашка мешает интенсивному охлаждению изделия, при определенном значении (определяемым составом закалывающей жидкости) паровая оболочка разрывается, и жидкость начинает кипеть на поверхности детали, и охлаждение происходит быстро.

Первый этап медленного охлаждения называется стадией пленочного кипения, второй этап быстрого охлаждения – стадией пузырьчатого кипения. Когда температура поверхности металла становится ниже температуры закалочной среды, жидкость перестает кипеть, и охлаждение замедляется. Этот третий этап охлаждения называется стадией конвективного теплообмена [2].

Закалочная жидкость охлаждает тем интенсивнее, чем шире интервал стадии пузырьчатого кипения, т.е. чем выше температура перехода от первой стадии охлаждения ко второй, и чем ниже температура перехода от второй стадии к третьей.

Необходимую скорость охлаждения металла обеспечивают различные закалочные среды: вода, масла, эмульсии, расплавленные соли. В настоящее время предпочтение отдается синтетическим охлаждающим средам.

По мере эксплуатации закалочных сред их характеристики могут меняться из-за многократного нагревания, загрязнения, испарения и т.д. Поэтому определение и контроль охлаждающей способности закалочных сред

является важной задачей многих видов промышленности: автомобильной, авиационной, металлургической, нефтяной, газовой, химической.

На сегодняшний день разработано большое количество методов для определения охлаждающих характеристик закалочных сред. Широкое применение нашел метод, в котором датчик с термопарой нагревается и закаливается в испытываемой закалочной среде [3]. Этот метод соответствует международному стандарту ISO 9950 «Масла промышленные закалочные. Определение характеристик охлаждения. Метод испытания зондом из никелевого сплава» [4].

Для анализа свойств закалочной среды [5] используются зависимости температуры от времени и от скорости охлаждения, полученные по данным термодатчика. Эти зависимости позволяют определить температурные интервалы с максимальной и минимальной скоростью охлаждения.

Охлаждающая способность закалочных сред зависит также от их вязкости, численно характеризующейся коэффициентом вязкости. Вязкость является одной из основных эксплуатационных характеристик закалочных сред и определяется их концентрацией.

Известно, что вязкость или внутреннее трение – это свойство жидкостей оказывать сопротивление сдвигу соседних слоев жидкости. Вследствие хаотического теплового движения между слоями жидкости происходит обмен молекулами, в результате чего импульс слоя, движущегося быстрее – уменьшается, а движущегося медленнее – увеличивается.

Вязкость (коэффициент вязкости) различных закалочных сред определяют с помощью вискозиметров (роторных или капиллярных), которые измеряют кинематическую, динамическую или относительную вязкость [1].

Существуют различные измерительные системы для определения и тестирования параметров охлаждающей способности закалочных сред, как российского, так и зарубежного производства. Эти системы с высокой точностью измеряют температуру и ее скорость изменения, затем измерительная информация передается в персональный компьютер для дальнейшей обработки.

Разработка комплекса для оперативного измерения вязкости и скорости охлаждения является актуальной задачей. Авторами разработана структура такого информационно-измерительного комплекса для контроля характеристик закалочных сред, представленная на рисунке 1.

Порядок измерения вязкости.

Для измерения коэффициента вязкости пользователь с персонального компьютера (блок 9 на рисунке 1) через блок управления установкой (7) опускает вискозиметр в исследуемую закалочную среду с помощью устройства для перемещения вискозиметра (3). Автоматическое перемещение позволяет сохранять положение (глубину погружение и угол наклона) прибора неизменным в закалочной среде. Показания численного значения коэффициента вязкости передаются с измерительного прибора (6) в блок управления установкой по штатному интерфейсу вискозиметра, а затем на ПК для использования данных по вязкости в протоколах испытаний закалочной среды.

Устройство для перемешивания жидкости – магнитная мешалка (2) не используется при измерении вязкости.

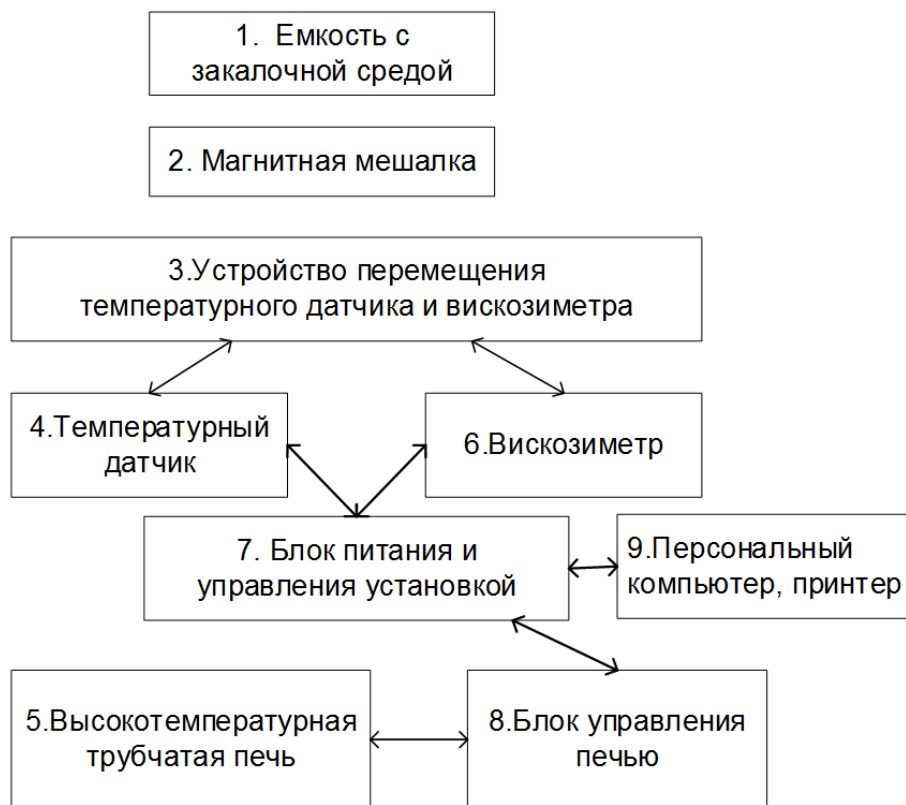


Рисунок 1 – Блок-схема измерительного комплекса для контроля характеристик закалочных сред

Порядок измерения скорости охлаждения.

Пользователем задается на ПК температура датчика (зонда) (4), который помещается для нагрева в высокотемпературную трубчатую печь (5) с

помощью устройства для перемещения температурного датчика (3). Включение печи и контроль за ее температурой осуществляется с помощью блока управления печью (8). Печь так же имеет аварийный датчик температуры. При достижении заданной температуры датчик опускается с помощью устройства перемещения (3) в закалочную среду (1). Датчик температуры, представляет собой шар, имеющий в своем геометрическом центре термопару. Для сокращения стадии пленочного кипения в процессе охлаждения температурного датчика используется магнитная мешалка (2).

После погружения температурного датчика производится запись измеренных значений температуры с заданным интервалом времени и их передача через блок управления установкой (7) на компьютер по штатному интерфейсу датчика. По этим данным с помощью программы формируется протокол, который включает в себя графики и таблицы, отражающие характеристики исследуемой закалочной среды.

Таким образом, предлагаемый измерительный комплекс представляет возможность контроля сразу двух важных характеристик закалочных сред в рамках одной установки – температуры и коэффициента вязкости, совместный анализ которых может дать полезную информацию о качестве среды.

Данная разработка ведется по заказу ООО «НПП «ИнТех»», планируется провести сборку и тестирование данного измерительного комплекса, а также произвести исследование закалочных сред.

Список литературы

1. Люте, В. Закалочные среды : справочное издание / В. Люте ; под ред. С. Б. Масленникова. – Челябинск : Металлургия, 1990. – 192 с. – Текст : непосредственный.
2. Гуляев, А. П. Металловедение : учебник для вузов / А. П. Гуляев. – Москва : Металлургия, 1986. – 544 с. – Текст : непосредственный.
3. Цаплин, С. В. Информационно-измерительная система для определения и тестирования параметров охлаждающей способности закалочных сред / С. В. Цаплин, С. В. Давыденко, Д. В. Тютюмин. – Текст : электронный // Pandia: платформа для публикаций. – URL:<https://pandia.ru/text/78/154/13689.php> (дата обращения: 05.10.2020).

4. ISO 9950:1995 Industrial quenching oils - Determination of cooling characteristics - Nickel-alloy probe test method = Масла индустриальные закалочные. Определение характеристик охлаждения. Метод испытания зондом из никелевого сплава : ST*N : разработан ТС 28 : дата введения 01.05.1995 // StandartGOST.ru : сайт. – URL: https://standartgost.ru/g/ISO_9950:1995.

5. Разработка, изготовление, поставка и внедрение системы для определения охлаждающей способности закалочных сред, применяемых для термообработки деталей автомобиля ВАЗ / С. В. Цаплин [и др.] // Отчёт по гранту «Межотраслевая программа сотрудничества Минобразования России и ОАО «АВТОВАЗ» по направлению «Научно-инновационное сотрудничество». – Самара, 2004. – 120 с.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Пашкова Наталья Викторовна

Омский государственный университет
путей сообщения (ОмГУПС).

Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046,

Российская Федерация.

Кандидат технических наук, доцент
кафедры «Теоретическая
электротехника» ОмГУПС.

Тел.: (3812) 31-06-88.

E-mail: nvp78@mail.ru.

Хмырова Наталья Анатольевна

Омский государственный университет
путей сообщения (ОмГУПС).

Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046,

Российская Федерация.

Кандидат физико-математических
наук, доцент кафедры «Физика
и химия» ОмГУПС.

Тел.: (3812) 31-53-68.

E-mail: nata_ruban@mail.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Pashkova Natalia Viktorovna

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx av.m, Omsk, 644046,

the Russian Federation.

Cand. Tech. Sci., the senior lecturer of the
department «Theoretical the electrical
engineer» OSTU.

Phone: (3812) 31-06-88.

E-mail: nvp78@mail.ru.

Khmyrova Natalia Anatolievna

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx av.m, Omsk, 644046,

the Russian Federation.

Cand. Phys-math. Sci., the senior lecturer
of the department «Physics
and chemistry» OSTU.

Phone: (3812) 31-53-68.

E-mail: nata_ruban@mail.ru.

М. М. Кутень, А. Л. Бобров

Сибирский государственный университет путей сообщения (СГУПС),
г. Новосибирск, Российская Федерация

ИССЛЕДОВАНИЕ КРИТЕРИЕВ ИДЕНТИФИКАЦИИ РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ ИСТОЧНИКОВ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ

Статья посвящена исследованию амплитуды сигналов акустической эмиссии (АЭ), полученных от различных типов источников. Основная задача исследования заключалась в анализе частоты распределения сигналов АЭ по амплитудам. Установлено, что развивающаяся трещина характеризуется степенным распределением сигналов по амплитудам. Результаты исследования позволяют применять эмпирическую зависимость, характеризующую связь параметров АЭ сигналов и дефекта, при определении критерия идентификации типа дефекта и стадии его развития.

Ключевые слова: акустическая эмиссия, источник, идентификация дефектов, критерий оценки, потоковые параметры, амплитудное распределение.

Mariya M. Kuten, Aleksey L. Bobrov

Siberian Transport University (STU), Novosibirsk, the Russian Federation

RESEARCH CRITERIA FOR IDENTIFICATION OF DIFFERENT TYPES OF ACOUSTIC EMISSION SOURCES

The article is devoted to the study of the amplitude of acoustic emission (AE) signals received from various types of sources. The main task of the study is to analyze the frequency of distribution of AE signals by amplitudes. It was found that a growing crack is characterized by a power-series distribution of signals over amplitudes. The results of the study make it possible to apply an empirical dependence characterizing the relationship between the AE parameters of signals and a defect in determining the criteria for identifying the type of defect and the stage of its growing.

Keywords: acoustic emission, source, defect identification, accept/reject criteria, flaw characteristics, amplitude distribution.

Введение

Повышение безопасности на промышленных предприятиях является основополагающей задачей. Поэтому постоянный мониторинг опасных производственных объектов, таких как сосуды, резервуары, трубопроводы и др., является неотъемлемой частью предупреждающих мероприятий в аварийных ситуациях. Акустико-эмиссионный (АЭ) контроль является одним из способов, обеспечивающих непрерывную оценку состояния объекта даже при значительном удалении оператора от него, в режиме реального времени с помощью систем АЭ-мониторинга [1].

Как известно, обнаружению и регистрации подвергаются только развивающиеся дефекты. Метод АЭ контроля так же обеспечивает последующую классификацию дефектов по степени их опасности, что дает возможность планирования ремонтных мероприятий и не допускает возникновения аварийных ситуаций. Следует заметить, что в настоящее время нет существующей документации, регламентирующей организацию и порядок выбора критериев оценки по измеряемым параметрам АЭ при контроле опасных производственных объектов. Следовательно, выбор и систематизация алгоритмов выбора критериев оценки, по которым выносится заключение об объекте контроля, является актуальной задачей.

Основная часть

Потоковые параметры, такие как амплитуда и энергия, являются наиболее часто используемыми при оценке технического состояния объекта контроля. Для оценки их применимости был произведен анализ частоты появления сигналов АЭ по амплитудам.

В ходе настоящей работы были использованы экспериментальные данные, полученные в результате статического нагружения образцов при вдавливании шарообразного индентора (рисунок 1, а), и образцов с концентратором напряжения (рисунок 1, б), на котором была искусственно выращена трещина на установках с равномерным растяжением. Испытания проводились на стальных образцах, изготовленных из сталей 20ГФЛ, СтЗпс, Сталь 20.

Кроме того, проанализированы были экспериментальные данные при гидравлическом испытании сосуда при повышенном давлении [2], который выполнен из стали Ст 20. Конструктивно сосуд состоит из обечайки, соединенной с днищами при помощи ручной дуговой сварки (рисунок 1, в).

Так же исследованию были подвержены экспериментальные данные, полученные со стальных контейнеров для жидкого хлора (рисунок 1, г), предназначенных для хранения, использования в производственных целях и перевозки жидкого хлора железнодорожным, автомобильным и морским (водным) транспортом. Объект представляет собой сварную конструкцию, выполненную из стали 09Г2С (ГОСТ 5520-79), рабочее давление составляет 1,47 МПа.

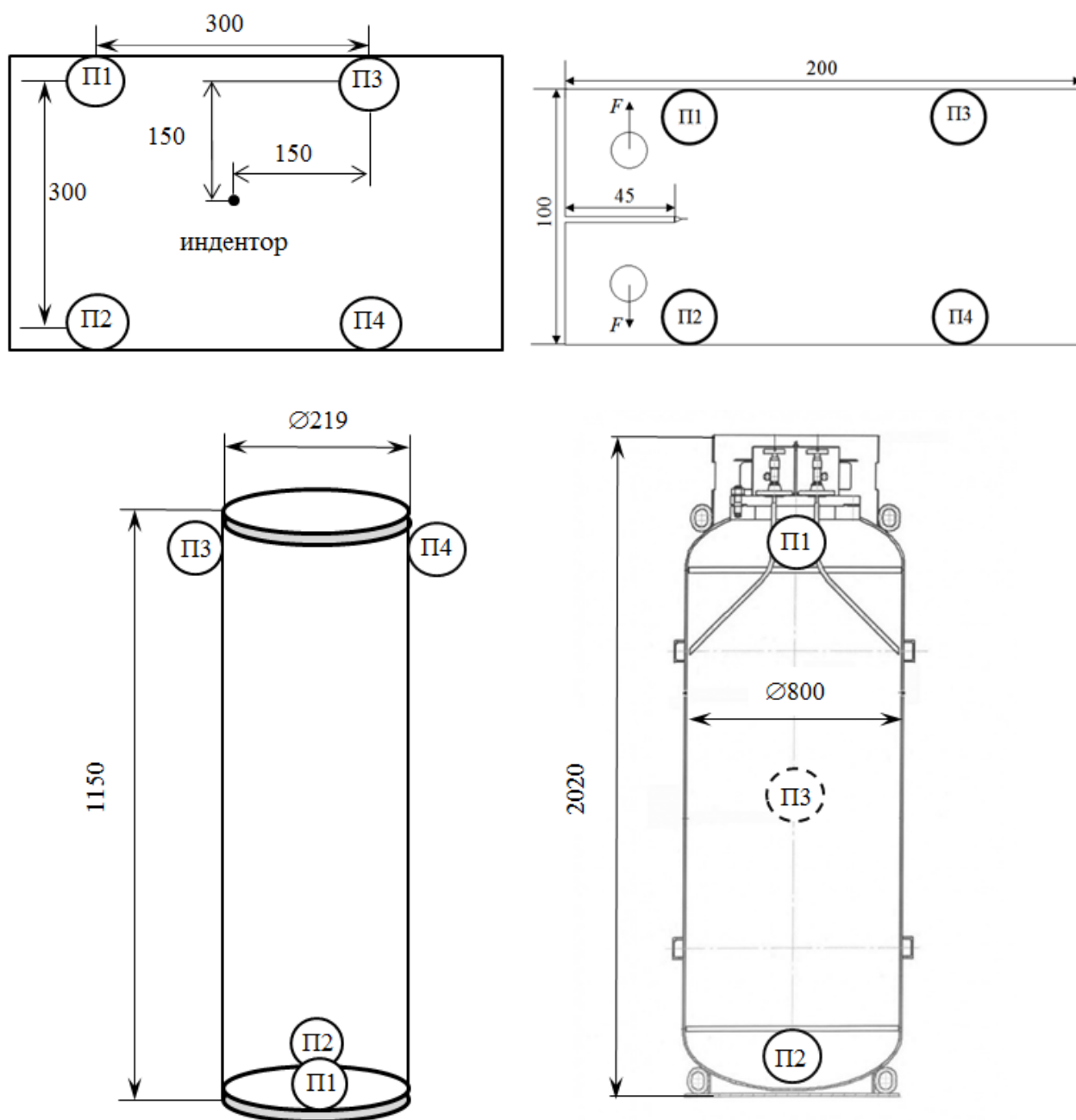


Рисунок 1 – Образец для статических испытаний:

- а) при вдавливании шарообразного индентора (П1-П4 – приемные преобразователи);
- б) с усталостной трещиной (F – точки приложения нагрузки); в) сосуд давления;
- г) стальной контейнер для сжиженного хлора

Для регистрации сигналов АЭ применялась шестнадцатиканальная система СЦАД 16.03 [3].

Критерии оценки, содержащие потоковые параметры акустической эмиссии, используются для нахождения дефекта и установления, в той или иной мере, степени его роста. Однако, определение точного местоположения и размеров дефекта или предсказание его развития, например, напрямую зависят от типа дефекта. Следует отметить, что даже незначительные локальные (усталостные трещины) или распределенные (коррозионные участки) дефекты могут быть ключевой причиной преждевременного разрушения конструкции. Более того, для различных типов дефектов характерна многостадийность этапов их развития, каждая из которых, в свою очередь, имеет разноплановую физическую природу.

При исследовании амплитуды АЭ сигналов [4] от различных типов источников, а именно, усталостная трещина, вдавливание индентора в образец из стали, сосуд повышенного давления, пластическая деформация в области концентратора напряжений, распределение сигналов имело степенную зависимость (рисунок 2).

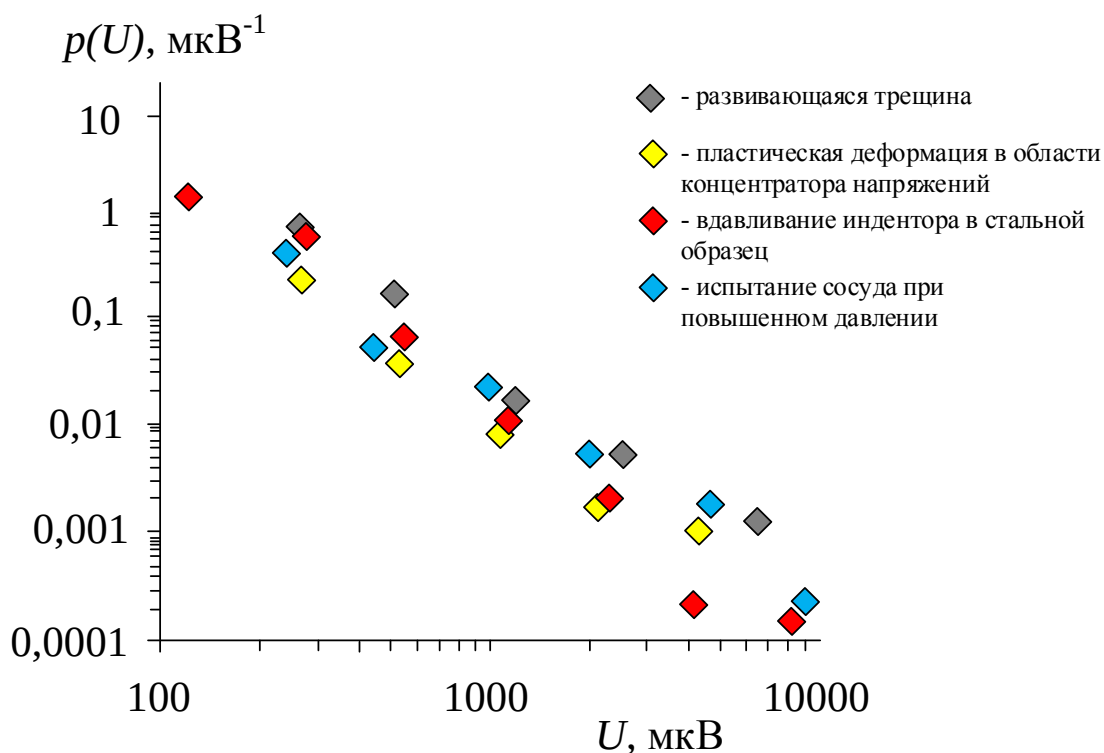


Рисунок 2 – Распределение частоты появления сигналов по амплитудам

Необходимо отметить, что при разных коэффициентах интенсивности напряжений, например при росте усталостной трещины, наблюдалась стабильность в характере распределения. Из этого следует, что такие параметры АЭ сигнала как амплитуда и энергия в данном случае являются неинформативными при оценке степени развитости дефекта.

Полученное распределение возможно описать следующей функцией:

$$p(U) = A \cdot U^n, \quad (1)$$

где A и n – множитель и показатель степенной зависимости.

Было отмечено, что характер распределения сохранялся для одного и того же источника на разных этапах его развития (например, усталостная трещина). Однако неоднозначно изменялись параметры распределения (A и n) для различных типов источника (рисунок 3).

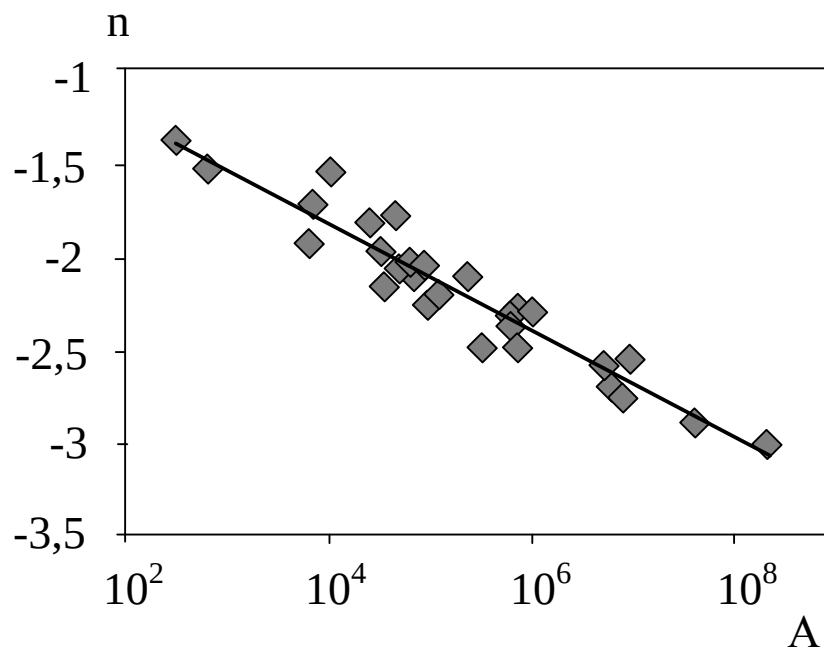


Рисунок 3 – Зависимость показателя степени от множителя в степенной зависимости

Как показывает анализ параметров степенной зависимости для разных объектов контроля между множителем и показателем прослеживается определенная корреляция. Вероятно, данные параметры степенного распределения по амплитудам зависят от одинаковых параметров источников, формирующих АЭ волны.

Анализ данных АЭ показал, что у всех исследуемых стальных контейнеров для жидкого хлора наблюдается значительный разброс параметров акустических сигналов по амплитуде от разных типов источников (области коррозии, сварные соединения), отличающихся энергией сигналов. Между тем и другие исследования [5-7] показали, что такие параметры как амплитуда сигналов и их энергия в наибольшей степени подвержены искажению и не используются для анализа состояния материала в области развивающихся источников.

Заключение

Таким образом, выбор критерия оценки технического состояния объекта зависит от типа источника (например, усталостная трещина, коррозия, пластическая деформация). По полученным АЭ данным с объектов контроля, в том числе по характеру распределения частоты появления сигналов по амплитудам, первоначально необходимо определить тип источника, затем применить соответствующий критерий оценки, зависящий от акустико-эмиссионных и механических свойств материала.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-38-90090.

Список литературы

1. Иванов, В. И. Акустико-эмиссионная диагностика : справочник / В. И. Иванов, В. А. Барат. – Москва : Спектр, 2017. – 368 с. – Текст : непосредственный.
2. ПБ 03-593-03. Правила организации и проведения акустико-эмиссионного контроля сосудов, аппаратов, котлов и технологических трубопроводов : утверждено постановлением от 9 июня 2003 г. № 77 : зарегистрировано в Минюсте РФ 19 июня 2003 г., № 4778. – Москва : ПИО ОБТ, 2003. – 55 с. – Текст : непосредственный.
3. Патент № 2 726 278 С1 Российская Федерация, МПК G01N 29/14 (2006.01), СПК G01N 29/14 (2020.02). Многоканальное акустико-эмиссионное устройство : № 2019142611 : заявлено 17.12.2019 : опубликовано 10.07.2020 / Степанова Л. Н., Кабанов С. И., Ельцов А. Е. ; патентообладатель Сибирский государственный университет путей сообщения. – 14 с. : ил. – Текст : непосредственный.

4. Ченцов, В. П. Акустическая эмиссия при упругопластическом деформировании конструкционных материалов и опыт её применения в неразрушающем контроле: монография / В. П. Ченцов ; Томский политехнический ун-т. – Томск: ТПУ, 2014. – 268 с. – Текст : непосредственный.

5. Investigation of Acoustic Emission in Low-Carbon Steels during Development of Fatigue Cracks / D. V. Chernov, V. M. Matyunin, V. A. Barat [et al.] // Russian Journal of Nondestructive Testing. – 2018. – V. 54. – №9. – P. 638–647.

6. Acoustic emission model of fatigue crack in low-carbon steel / V. A. Barat, A. Y. Marchenkov, S. V. Elizarov, V. V. Bardakov // International Journal of Mechanical and Production Engineering Research and Development. – 2019. – V. 9. – № 6. – P. 433–442.

7. Носов, В. В. Метод акустической эмиссии : учебное пособие / В. В. Носов, А. Р. Ямилова. – Санкт-Петербург : Лань, 2017. – 304 с. – Текст : непосредственный.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Кутень Мария Михайловна

Сибирский государственный университет
путей сообщения (СГУПС).
ул. Дуси Ковальчук, д. 191, г. Новосибирск,
630049, Российская Федерация.
Аспирант кафедры «Электротехника,
диагностика и сертификация» СГУПС.
Тел.: +7 (3833) 28-03-02.
E-mail: mariabychkova94@mail.ru.

Бобров Алексей Леонидович

Сибирский государственный университет
путей сообщения (СГУПС).
ул. Дуси Ковальчук, д. 191, г. Новосибирск,
630049, Российская Федерация.
Доктор технических наук, профессор
кафедры «Электротехника, диагностика и
сертификация» СГУПС.
Тел.: +7 (3833) 28-03-02.
E-mail: beaver@mail.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Kuten Mariya Mikhailovna

Siberian Transport University (STU).
191, Dusi Kovalchuk st., Novosibirsk, 630049,
the Russian Federation.
Post-graduate student of the department
«Electrical engineering, diagnostics and
certification» STU.
Phone: +7 (3833) 28-03-02.
E-mail: mariabychkova94@mail.ru.

Bobrov Aleksey Leonidovich

Siberian Transport University (STU).
191, Dusi Kovalchuk st., Novosibirsk, 630049,
the Russian Federation.
Doctor of Technical Science, Professor of the
department «Electrical engineering, diagnostics
and certification» STU.
Phone: +7 (3833) 28-03-02.
E-mail: beaver@mail.ru.

Б. Н. Стихановский¹, С. А. Черемисина²

¹Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС), г. Омск, Российская Федерация,

²Омский автобронетанковый инженерный институт (ОАБИИ), г. Омск, Российская Федерация

ПЕРЕГРУЗКИ, ДЕЙСТВУЮЩИЕ НА ИСПЫТУЕМЫЕ ИЗДЕЛИЯ В ПРОЦЕССЕ УДАРА

Конструкция тормозного устройства в форме криволинейного желоба позволяет воспроизводить удары по испытуемым изделиям регулируемыми скоростями бойка; защищает корпус машины от ударных воздействий. Создание шарообразного бойка с закаленной сердцевиной и отпущенной оболочкой увеличивает работоспособность ударной машины при повышенных скоростях удара.

Ключевые слова: ударные машины, скорости и ускорения, торможение, испытуемые изделия, удар.

Boris N. Stikhanovsky¹, Svetlana A. Cheremisina²

¹Omsk State Transport University (OSTU), Omsk, the Russian Federation

²Omsk Automobile Armored Engineering Institute (OAAEI), Omsk, the Russian Federation

OVERLOADS APPLYING TO THE TESTED PRODUCTS DURING THE SHOCK

The design of the braking device in the form of a curved gutter allows reproducing impacts on the tested products with adjustable striking speeds; Protects the car body from shock. The creation of a spherical striker with a hardened core and a tempered shell increases the efficiency of the percussion machine at increased impact speeds.

Keywords: shock machines, speeds and accelerations, braking, test items, shock.

В настоящее время уделяется большое внимание созданию приборов и устройств на основе использования механизмов ударного действия. Большинство разработок в данном направлении основаны на принципе передачи комплексных импульсов поступательного и вращательного движения, что способствует созданию более простых, производительных и надежных механизмов. Основной недостаток существующих на сегодняшний день

устройств и механизмов ударного действия является малая удельная энергия на единицу веса машины и малый диапазон скоростей рабочего органа, что, в свою очередь, ведет к увеличению габаритов и веса устройства, а также применение сложных приводов и устройств, предназначенных для получения заданных параметров удара.

Кроме того, установки и стенды для исследования процессов и испытаний на механические перегрузки должны быть: воспроизводимы, достоверны и обладать возможностью сопоставления результатов. Решить данную задачу позволяют устройства, использующие энергию вращающихся масс. Применение принципа накопления кинетической энергии на большом пути разгона рабочего органа за несколько оборотов с защитой корпуса машины от ударных воздействий дает ряд преимуществ перед машинами с другими способами накопления энергии.

В механизмах и устройствах ударного действия для получения поступательного и вращательного движения бойка используется метод формирования ударно-вращательного импульса, посредством двигателя постоянного действия. Расчет параметров, описывающих ударно-вращательные импульсы, основывается на законах современной теории удара твердых тел.

В результате удара в местах контакта инструмента с испытуемым объектом возникает сила на несколько порядков превышающая усилия в опорных устройствах машин. Преобразование энергии постоянного тока в дискретную последовательность ударных импульсов небольшой длительности (десятки и сотни микросекунд) и упругого волновода, передающего ударные импульсы в виде волн деформаций к изделиям, позволяет создать огромные перегрузки.

Повышение эффективности устройства ударного действия способствует производительности, увеличению эксплуатационного ресурса машины, уменьшению энергозатрат, необходимых для выполнения технологического процесса, а также улучшение эргономических характеристик машин.

При выборе оптимального пути повышения производительности, следует определиться с поиском средств и способов формирования волн деформации с рациональными, позволяющими передавать по волноводу максимальную по величине энергию, а также с минимальными и неизбежными потерями, возникающими при ударе для элементов системы, одновременно обеспечивая эффективную передачу энергии к испытуемому изделию, сводя к минимуму разрушение деталей самой машины.

Основные направления развития существующих машин и устройств ударного действия: научный поиск и разработка новых способов преобразования энергии в разрушающую силу и совершенствование существующих. В данном направлении имеются теоретические и экспериментальные разработки отечественных и зарубежных ученых.

Одной из важных задач при создании ударной машины является разработка и расчет ее тормозного устройства. Имеется несколько типов тормозных устройств:

1. Тормозные устройства, тормозящие объект по прямой и расположенный вне объекта. Основным недостатком данного устройства является возникновение кратковременного ударного импульса во время начала взаимодействия объекта и тормозного участка, величиной более 1000 ед. При этом, максимально допустимые перегрузки не должны превышать 200 е.

2. Тормозные устройства, расположенные и разгоняемые вместе с объектом на разгонном устройстве, с торможением бойка по прямой.

Тормозное устройство должно быть технологичным, т.е. помимо того, что сама машина позволяет получить регулируемую скорость, устройство должно обладать возможностью резкого торможения в самое короткое время, при этом является простой по конструкции.

С учетом вышесказанного предложен принцип торможения изделий за счет создания сил трения между объектом и разгонным устройством. Стенд состоит из двух узлов, основными являются: механизм разгона бойка и узел торможения (рисунок 1).

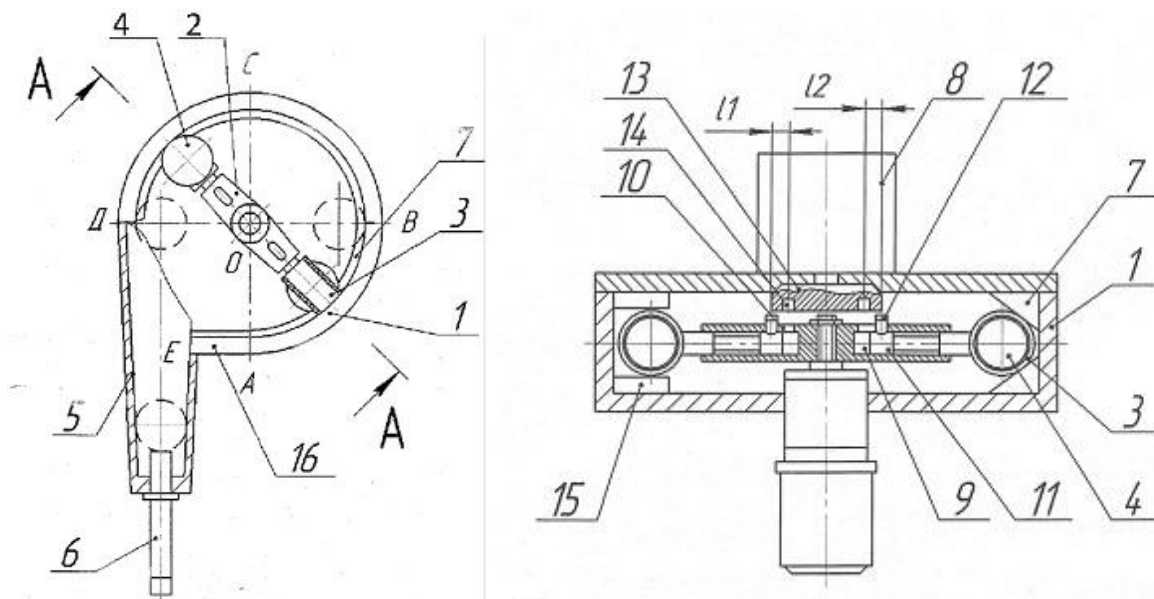


Рисунок 1 – Тормозное устройство ударного механизма

Ударное устройство состоит из корпуса 1 и ротора 2, на концах которого сборкой под сварку установлены держатели, в форме колец со сферической внутренней поверхностью 2, в которые установлены бойки 4 в виде шаров. Корпус 1 имеет конусный ствол 5, в конце которого установлен узел крепления испытуемого элемента 6. Тормозное устройство 7 выполнено в виде желоба с углом конусности 2α . Привод осевого перемещения 8, радиальные каналы 9 взаимосвязаны со штоками 11 и кольцами 3 через окна 10, а пальцы 12, в зависимости от положения относительно фиксатора 13 держателей (входящие в момент разгона ротора и выходящие из фиксатора держателей – с гнездами 14).

Участок ВСД реализован в виде направляющей 15, с вертикальными стенками, которые не соприкасаются и не тормозят держатели 3 с шаром 4 (при вылете - шар), а участок желоба 16 (АЕ), между конусом 5 и тормозным участком АВ, выполнен прямолинейным, впоследствии, плавно переходящий в криволинейный тормозной желоб 7 на участке АВ. Один из шаров 4 неподвижно зафиксирован в держателе 3, например, заварен (завальцован или сдерживается стопорным кольцом). Величина хода l_2 данного шара с держателем и штоком такова, что при срабатывании привода 8 держатель тормозится; а у другого держателя свободно вылетающего шара, держатель не задевает стенки желоба 7 и направляющей 15, так как у него малый ход $l_1 < l_2$.

Принцип работы устройства следующий: исходное положение - на устройстве привод отключен, а пальцы держателей установлены в гнезда фиксатора. Штоки входят внутрь радиальных каналов ротора и кольца, при вращении ротора не задевают стенки тормозного участка желоба. По достижении заданной скорости вращения ротора включается привод осевого перемещения, который поднимает фиксатор. Пальцы освобождаются и штоки с кольцами и бойками под действием центробежных сил перемещаются к периферии ротора, где боек производит удар по испытуемому объекту.

На выходе из узла поворота и входе в тормозное устройство характеризуется тем, что изделие не имеет снизу опорной поверхности и соприкасается только с боковой поверхностью направляющего короба.

На заключительном участке достигается торможение за счет трения о боковые направляющие корпуса и днища.

Сила, действующая на боек в момент торможения в желобе:

$$F_{\text{пр}} = \frac{F}{\sin \alpha}, \quad (1)$$

где α – угол конусности желоба.

Например, при $\alpha = 30^\circ$ имеем $F_{\text{пр}} = 2F$, где F – сила трения-скольжения кольца по плоскости

Твердые деформируемые тела в момент ударного взаимодействия формируют сложное и неоднородное поле напряжений. Поэтому одним из главных факторов, влияющих на прочность конструкции является точный расчет и измерение параметров поля напряжений, возникающих на поверхностях тел при контактном ударном взаимодействии.

Удар, как одно из сложных динамических контактных взаимодействий, характеризуется несколькими параметрами (скоростью удара V , скоростью деформации $\dot{\epsilon}$, скоростью напряжения $\dot{\sigma}$, зависящая от скорости приложения нагрузки), а возникающий при ударе контакт твердых тел является чисто пластическим контактом. Пластичность при возникшем контакте соударяющихся тел характеризуется твердостью, которая зависит от твердости H и пределом текучести при растяжении σ_T .

$$H = C \cdot \sigma_T \quad (2)$$

где C – коэффициент стеснения.

При упругопластическом контакте форма границы, разделяющей упругую и пластическую зоны, зависит от упругих свойств материала.

При одинаковой энергии единичного удара рациональны максимально допустимые скорости соударения, что способствует снижению реакции отдачи корпуса и вибрации.

Если кинетическая энергия бойка величина постоянна $E = \frac{m \cdot V^2}{2} = \text{const}$ и величина импульса отдачи при разгоне бойка меняется от 0 до V , то импульс сил, разгоняющих боек $P = \int_0^t F dt$. В результате получаем, что $P = \frac{2E}{V} = \frac{\text{const}}{V}$.

Следовательно, скорость соударения бойка прямо пропорционально понижает величину реакции отдачи и значительно уменьшает вес бойка. В машинах ударного и ударно-вращательного действия, развивающие скорость в диапазоне (10÷15м/с), можно использовать закаленные детали. При большей скорости соударения в зоне контактного взаимодействия возникают

упругопластические деформации, приводящие к заметной деформации соударяющихся тел и, впоследствии, выводят устройство из строя.

Использование относительно высоких скоростей в машинах ударного действия не позволяют большие напряжения в зоне ударного контакта. Решение задачи повышения контактной прочности бойка и инструмента применением улучшенных сталей и новых материалов позволяет повысить скорость удара незначительно. Кроме того, имеет важное значение, чтобы в машине ударного действия максимально использовалась энергия отскока бойка при обратном цикле.

При создании машин с повышенными скоростями удара предложен боек в форме шара из упругопластического материала с закаленной сердцевиной и отпущенной оболочкой. Переход твердости от сердцевины к оболочке изменяется постепенно, чтобы исключить в процессе работы отслоения. Принудительно поворачиваясь после каждого удара боек при соударении с инструментом формирует наклеп по всей поверхности. Закаленная сердцевина шара выполняет функцию жесткого скелета, позволяющая сохранить свою форму, а его упругопластическая оболочка уменьшает максимальные напряжения в местах контакта, увеличивает продолжительность ударного импульса.

Тормозное устройство машины ударного действия в форме криволинейного желоба позволяет регулировать скорость бойка, защищает корпус машины от ударных воздействий, разрушения. Создание шарообразного бойка с закаленной сердцевиной и отпущенной поверхностью позволяет при повышенных скоростях удара повысить ресурс ударной машины и ее производительность.

Список литературы

1. Стихановский, Б. Н. Процессы удара : монография / Б. Н. Стихановский. – Омск : Омский гос. технический ун-т, 2010. – 324 с. – Текст : непосредственный.
2. Патент № 2636798 Российская Федерация, МПК G01N 3/31 (2006.01). Копер для ударных испытаний : № 2016139840 : заявлено 10.10.2016 : опубликовано 28.11.2017 / Стихановский Б. Н. ; патентообладатель Омский государственный университет путей сообщения. – 5 с. : ил. – Текст : непосредственный.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Стихановский Борис Николаевич

Омский государственный университет
путей сообщения (ОмГУПС).

Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046,

Российская Федерация.

Доктор технических наук, профессор.

Тел.: +79069901394.

E-mail: bstish@mail.ru

Черемисина Светлана Алексеевна

Омский автобронетанковый инженерный
институт (ОАБИИ).

14 военный городок, г. Омск, 644098,

Российская Федерация.

Старший преподаватель кафедры

технологии производства ОАБИИ

Тел: +79043225677.

E-mail: cheremisvetlana@gmail.com.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Stikhanovsky Boris Nikolaevich

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx st., Omsk, 644046,

the Russian Federation.

Doctor of Technical Sciences, Professor.

Tel.: +79069901394.

E-mail: bstish@mail.ru.

Cheremisina Svetlana Alekseevna

Omsk Automobile Armored Engineering
Institute (OAAEI).

14 military town, Omsk, 644098,

the Russian Federation.

Senior Lecturer Department of Production

Technology OAAEI.

Phone: +79043225677.

E-mail: cheremisvetlana@gmail.com.

УДК 006

Б. Н. Стихановский

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС),

г. Омск, Российская Федерация

КОНСТРУКТИВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ТОКОВЕДУЩИХ ДЕТАЛЕЙ И ИЗМЕРЕНИЕ ИХ СКОРОСТЕЙ ПРИ УДАРАХ

Рассмотрены некоторые виды защиты контактной сети с помощью специального щитка для редких случаев удара каркаса токоприемника о соединительные зажимы. Приведены также измерительные устройства для определения скоростей прямого центрального удара взаимодействующих деталей.

Ключевые слова: механические напряжения, удар, щиток, каркас токоприемника.

CONSTRUCTION FEATURES OF DESIGNING OF CURRENT PARTS AND MEASURING THEIR SPEEDS AT IMPACT

Some types of protection of the contact network with the help of a special shield for rare cases of impact of the frame of the current collector on the connection clamps are considered. Measuring devices for determining the rates of direct central impact of interacting parts are also given.

Keywords: mechanical stress, impact, shield, current collector frame.

В настоящее время геометрические и прочностные свойства токопроводящих деталей не предназначены для высоких скоростей их взаимодействия, что приводит к их быстрому разрушению. Для того, чтобы спроектировать их более ударопрочными при увеличивающимися скоростями электропоездов, проанализируем значения напряжений, возникающие в контактной зоне при ударе [1]:

Максимальное напряжение в центре контактной площадки при упругих деформациях

$$\sigma_m = 0,63 \left(\frac{m_0 v_0^2 E_0^4}{R_0^3} \right)^{0,2}, \quad (1)$$

где V_0 – приведенная масса двух соударяющихся тел с массами m_1 и m_2 ;

$R_0 = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}$ – приведенный радиус поверхностей в области контакта тел;

$E_0 = \frac{E_1 \cdot E_2}{(1 - \mu_1^2) E_2 + (1 - \mu_2^2) E_1}$ – приведенный модуль упругости (модули Юнга)

взаимодействующих масс;

μ_1 и μ_2 – коэффициенты Пуассона;

V_0 – абсолютная скорость прямого центрального удара, т.е. скорость между центрами масс тел.

Из (1) следует, что максимальные напряжения существенно зависят от скорости удара $V_0^{0,4}$ и приведенного радиуса $R_0^{0,6}$. Для уменьшения σ_m необходимо снизить скорость прямого центрального удара V_0 и повысить

приведенный радиус поверхностей в области контакта R_0 взаимодействующих при ударе тел. Крепления, предназначенные для электрического соединения проводов, должны удерживать их при нагрузках с коэффициентом запаса 1,5. Значительное распространение получил способ стыкования проводов с использованием неразъемных и разъемных болтовых зажимов [2]. В редких случаях стыковые и провододержащие зажимы опускаются ниже провода из-за ошибок рабочих-монтажников, наледи, ветровых, вибрационных и прочих динамических перегрузках. При этом происходят удары токоприемников с зажимами, приводящими к разрушению контактной сети.

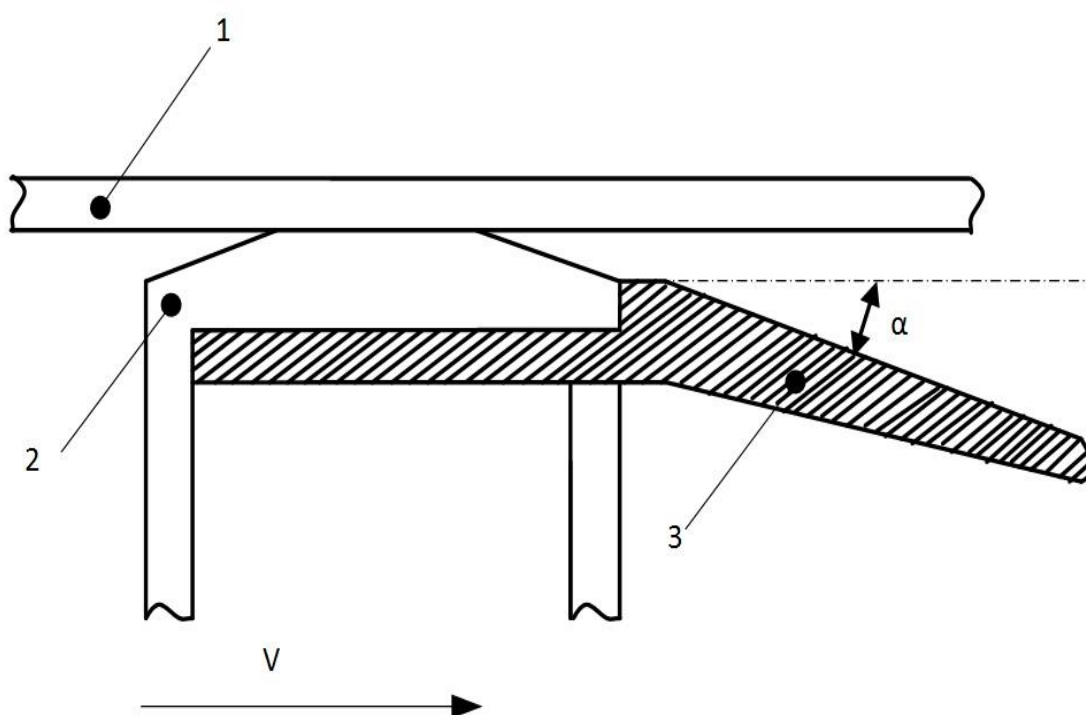


Рисунок 1 – Крепление щитка:

1 – контактный провод; 2 – каркас полоза токоприемника; 3 – щиток

Для уменьшения нагрузок при ударе предлагается прикрепить к каркасу полоза токоприемника щиток, см. рисунок. Щиток при ударе каркаса токоприемника с провисшими ниже контактного провода болтовыми зажимами уходит вниз, глиссирует и не разрушает весь пролет, т.е. происходит рикошетное взаимодействие тел. При ударе щитка скорость прямого центрального удара $V_0 = V \cdot \sin \alpha$, где V - скорость движения полоза

токоприемника, α – угол наклона щитка к горизонтали. Кроме этого, щиток заметно увеличивает приведенный радиус R_0 , что также уменьшает контактные напряжения при ударе. И, наконец, материал щитка можно изготовить из ударопрочного материала, у которого допускаемые напряжения значительно больше, чем у полоза токоприемника, например, из инструментальной твердой закаленной стали, стали Гатфельда, из легких сплавов титана и т.п.

Для измерения скорости V_0 прямого центрального удара можно использовать датчики, в которых применен принцип разрыва электромагнитной цепи. Сигнал измерительной цепи прямо пропорционален скорости разрыва элементов датчика при ударном взаимодействии деталей конструкции [2–5].

Список литературы

1. Стихановский, Б. Н. Процессы удара : монография / Б. Н. Стихановский. – Омск : Омский гос. технический ун-т, 2010. – 324 с. – Текст : непосредственный.
2. Горошков, Ю. И. Контактная сеть : учебник дл техникумов / Ю. И. Горошков, Н. А. Бондарев. – Москва : Транспорт, 1990. – 399 с. – Текст : непосредственный.
3. Патент № 2110072 Российская Федерация, МПК G01P 3/12 (1995.01). Индукционный датчик ударной скорости машин : № 96117047/28 : заявлено 19.08.1996 : опубликовано 27.04.1998 / Стихановский Б. Н ; патентообладатель Омский государственный технический университет. – 3 с. : ил. – Текст : непосредственный.
4. Патент № 46104 Российская Федерация, МПК G01 P 3/50. Датчик ударной скорости машин : № 2004137414/22: заявлено 21.12.2004 : опубликовано 10.06.2005 / Стихановский Б. Н., Пастухова Е. И. ; патентообладатель Омский государственный технический университет. – 6 с. : ил. – Текст : непосредственный.
5. Патент №45192 Российская Федерация, МПК G01 P 3/50. Датчик ударной скорости машин : № 2004132457 : заявлено 09.11.2004 : опубликовано 27.04.2005 / Стихановский Б. Н., Пастухова Е. И. ; патентообладатель Омский государственный технический университет. – 11 с. : ил. – Текст : непосредственный.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Стихановский Борис Николаевич

Омский государственный университет
путей сообщения (ОмГУПС).

Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046,

Российская Федерация.

Доктор технических наук, профессор.

Тел.: +79069901394.

E-mail: bstish@mail.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Stikhanovsky Boris Nikolaevich

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx st., Omsk, 644046,

the Russian Federation.

Doctor of Technical Sciences, Professor.

Tel.: +79069901394.

E-mail: bstish@mail.ru.

УДК 621.822

Denis V. Konishevskiy, Nazim S. Kodirov

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

ANALYSIS OF DATA ON DEFECTS AND MALFUNCTIONS OF BEARING UNITS OF LOCOMOTIVES

The study is devoted to finding out the causes of failure of bearing units of locomotives. The issues of reasonable choice and application of more advanced, capable of early detection of developing defects, methods and diagnostic tools of locomotive bearing assemblies are also considered.

Keywords: bearing assemblies, defects, damage, durability.

A significant role in ensuring the reliable operation of the locomotive fleet belongs to units containing rolling bearings. Therefore, the timely identification and prevention of the development of bearing defects is an important event in the integrated system of technology for the operation and maintenance of traction rolling stock.

Bearing assemblies used on rolling stock require special attention both during development and in operation, therefore, special requirements are imposed on them regarding the quality of steel and brass, hardness of working surfaces, machining of rolling surfaces, tolerances of dimensional fields and heat treatment modes. The rings and rolling elements of bearings manufactured for rolling stock of railways are subject to 100% control by parameters of hardness, absence of microcracks, residual

magnetization, correspondence of steel grade, presence of non-metallic and foreign inclusions, microporosity and microstructure. In addition, 5% of a batch of bearings undergo dynamic bench tests for 90% of the estimated durability.

In accordance with the foregoing, there is a need for systematic monitoring of the condition of the main components and assemblies of locomotives, including for the condition of the bearing units. However, it is not advisable to periodically open them for inspection, to dismantle electric machines for revision, as this leads to an increase in the complexity and cost of repairs, increases the downtime of a locomotive in repair, thereby reducing its performance. T.O. It is advisable to carry out periodic monitoring of the state of all elements of the bearing assemblies without dismantling and opening by means of in-line diagnostics.

Depending on the nature of the occurrence and development of the failure of the bearing assemblies, there are:

- fatigue defects;
- corrosion defects;
- defects in wear and tear;
- installation defects.

To obtain reliable information about the state change of locomotive asynchronous squirrel-cage electric motors, statistical data was collected and analyzed based on the results of their pre-repair fault detection at locomotive repair enterprises. Identification of defects and malfunctions was carried out during the final defect with complete disassembly. In this case, the data of locomotive depots were taken into account.

When collecting these data at locomotive repair enterprises, it was found that the number of faults and defects recorded during fault detection also depends on the requirements for electric machines. So, according to the data obtained at repair enterprises, 57% of malfunctions and damages account for wear and defects of bearing assemblies. Bearings mounted without surface damage and misalignment, working with an efficient lubrication system, usually have low wear.

Faults and failures of electric machines are a consequence of the accumulation of wear phenomena that develop during operation quite smoothly. This is due, on the one hand, to the nature of the operating mode of these machines, which are usually far from extreme, and, on the other hand, to their design features that ensure high reliability of electric machines.

If the lubricant does not meet the operating conditions or the bearing is not protected against foreign particles such as sand, dust, abrasive particles, etc., intensive wear of the raceways of the rings, rolling elements and cage cells may occur. This increases the radial clearance and changes the profile of the raceway. Intense wear of the bearing elements can also occur as a result of underloading of the bearing at significant rotational speeds [1, 2].

Thus, from the above analysis of statistical data, the nomenclature and frequency of certain defects and malfunctions of locomotive asynchronous motors with a squirrel-cage rotor are established, the weakest element is determined - bearings, which limit the reliability of asynchronous electric motors to drive auxiliary units. The uniformity of the observed operational defects and malfunctions of locomotive asynchronous squirrel-cage electric motors makes it possible to build a common diagnostic model and, therefore, a common system of technical diagnostics of these machines.

The results obtained are the initial information for studying the state space and signals of squirrel-cage locomotive asynchronous motors.

Consider the characteristic defects of the bearing assemblies and the causes of their occurrence.

Dents on raceways of rings can occur under shock or vibration load, as well as under static load, if it exceeds the value of static load capacity. Dents can also form if a non-rotating bearing, under a relatively light load, is exposed to vibration.

Another common type of damage is seizures and scratches that form on the bearing elements due to a violation of their interaction and maintenance technology. These damages can cause premature fatigue spalling. With increased axial loads and poor lubrication at the ends of the rollers and the sides of the cylindrical rings, scratches and nicks in the form of a cycloid may appear. Such scratches and local wear of the ends of the rings can form due to their interaction with additional devices and elements (covers, bushings, additional rings, drive devices, etc.).

Wear defects occur mainly due to a violation of the lubrication of the unit, a violation of the seals, mismatch of the type and load capacity of the bearing used, working conditions of the mechanism, shock and vibration.

If the viscosity of the lubricant or its quantity is insufficient and the thickness of the elastohydrodynamic layer is not ensured, then the interaction of irregularities, causing their plastic deformation, acquires a rapidly developing and irreversible character. Fatigue chipping occurs in the form of peeling of the surface.

The main reasons for premature bearing failure due to fatigue failure are metal quality and its compliance with current standards [2, 3], exceeding permissible design loads, damage to rolling surfaces during installation, inappropriate lubricant, its contamination or deficiency, deformation of housing seats or shaft. Fatigue defects have the property of fairly rapid development - usually damage to some parts leads to the failure of others. The destruction process acquires an avalanche-like character and other parts of bearing assemblies and additional devices are involved in it.

Corrosion of elements of bearing assemblies is one of the reasons for shortening their service life. Oxides, falling on the raceway, act as abrasive particles, accelerating the wear process. In addition, increasing contact friction, they accelerate the course of fatigue processes.

The most common causes of corrosion of rolling stock bearing assemblies are the presence of water or chemically active components in the lubricant.

A special type of corrosion damage to elements of bearing assemblies is fretting corrosion - a special type of intense oxidation of elements in contact with small repetitive mutual movements relative to each other. Under these conditions, a lubricant that initially separates the surfaces of the rings and rolling elements is squeezed out of the contact zone, as a result of which the microroughness of the contacting parts interact with each other [4]. Due to small movements of the rolling bodies relative to the rings, the wear products will remain in the contact zone or be located at its edges. Due to the large total surface of the metal flakes, their oxidation is intensive, red or black spots are formed on the bearing rings located at the same pitch as the rolling bodies [4].

Fretting corrosion can occur when rings slip on the shaft and in the housing, as well as in bearing assemblies with long-term settling of locomotives without movement [6]. Separate consideration should be given to corrosion defects that occur under the influence of an electric current, the passage of which through the bearing can lead to sparking in the contact areas of the rolling elements and rings, structural changes in the metal, impaired lubrication and the appearance of fatigue cracks. The bearings of axlebox units of locomotives are most susceptible to electrocorrosion, which is due to frequent disturbances in the operation of grounding devices.

A significant number of bearings fail due to non-compliance with the mounting technology of both the bearing itself and the components of the bearing assembly. When installing the bearing, there are dents or nicks of shock character, leading to fatigue defects. It is also extremely important when aligning the bearing to ensure

alignment and proper installation of covers and seals. In case of distortions, intense uneven wear of the rings and cage occurs, leading to a quick failure of the bearing.

An important condition for ensuring reliable operation of the bearing is the quality of its fit on the shaft with a guaranteed and required interference. Failure to do so leads to the fact that with a maximum tightness of the inner rings on the shafts, the radial clearance can completely disappear. In these cases, the assembly overheats, intense wear occurs, the rolling bodies slip without rotation, the separator is destroyed and the bearing is jammed [2].

Violation or improper installation of the seals of the bearing units leads to the extrusion of grease from the unit, ingress of contaminants and impurities, resulting in intense wear of the rings and rolling elements and the destruction of the bearing. In operation, there are often cases of the appearance of cracks in the inner rings, the reasons for which is an overestimated interference during their installation.

In most cases, the destruction of a working bearing assembly occurs after the gradual development of any damage. Timely identification of developing or emerging defects in the bearing or lubrication of the assembly and the adoption of necessary measures can significantly reduce operating costs, reduce the percentage of faulty locomotives, reduce the number of unplanned repairs, and prevent emergency and critical situations in operation. In some cases, the development of defects in bearing assemblies is accompanied by an increase in noise levels, vibration, and an increase in temperature, however, these signs indicate the presence of a sufficiently developed defect.

Identification of defects at an early stage of development, detailed monitoring of their nature and phases of development, reliable prediction of the technical condition of bearing assemblies is the task of methods and means of technical diagnosis.

Contact or fatigue life - the duration of the bearing before the start of the fatigue spalling of the material is expressed by the duration of the work (estimated life) until the bearing fails. The contact durability of the operation of the bearing assemblies depends on many factors, which include normal and tangential contact stresses, strength properties of the metal, the degree of contamination of steel with non-metallic inclusions, the condition of the contacting surfaces, the effectiveness of the lubricating system.

An analysis of the causes and statistics of the failure of locomotive bearing assemblies shows that, taking into account the aging of the rolling stock and the need

to ensure the safety of train traffic, three types of problems of technical diagnosis of bearing assemblies must be taken into account: 1. Determination of the current technical condition in which the unit is at a given moment in time - control;

2. Prediction of the technical condition in which the node will be at some future point in time - forecast;

3. Determination of the technical condition in which the node was at some point in time in the past - genesis.

References

1. Marchenko, B. G. Vibrodiagnostics of bearing assemblies of electrical machines / B. G. Marchenko, M. V. Myslovich. – Kiev : Naukova Dumka, 1992. – 195 p. – Text: direct.

2. Chermensky, O. N. Rolling bearings : catalog / O. N. Chermensky, N. N. Fedotov. – Moscow : Engineering, 2003. – 575 s. – Text: direct.

3. Balitsky, F. Ya. Vibroacoustic diagnostics of incipient defects / F. Ya. Balitsky, M. A. Ivanova, A. G. Sokolova. – Moscow : Nauka, 1984. – 119 p. – Текст : непосредственный.

4. Fedorov, D. V. Determining the effectiveness of lubricating compositions of bearing assemblies of locomotives by acoustic emission method / D. V Fedorov. – Text: direct // Defectoscopy. – 2003. – №3. – PP. 34–36.

5. Fedorov, D. V. Acoustic emission method for diagnosing the technical condition of locomotive bearing assemblies / D. V Fedorov. – Text: direct // Devices and systems. Control. Diagnostics. – 2004 – №4. – PP. 58–63.

6. Brown, S. Vibration Analysis of Roller and Ball Bearings / S. Brown, B. Datner // Design and Engineering Technology. – 1999. – T.101. – №1. – PP. 65–72.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Конишевский Денис Вячеславович
Омский государственный университет
путей сообщения (ОмГУПС).
Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046,
Российская Федерация.
Кандидат фил. наук, доцент кафедры
«Русский и иностранные языки» ОмГУПС.
Тел.: 8-3812-31-06-79.
E-mail: konishevskiydv@omgups.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Konishevskiy Denis Vyacheslavovich
Omsk State Transport University (OSTU).
35, Marx st., Omsk, 644046,
the Russian Federation.
Candidate Phil. Science, Docent Department of
“Russian and Foreign Languages” OSTU.
Phone: 8-3812-31-06-79.
E-mail: konishevskiydv@omgups.ru.

Кодиров Нозимжон Солиевич
Омский государственный университет
путей сообщения (ОмГУПС).
Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046,
Российская Федерация.
Магистрант ОмГУПС.
Тел.: +79658776007.
E-mail: nazimkadirov94@mail.ru.

Kodirov Nozimzhon Solievich
Omsk State Transport University (OSTU).
35, Marx st., Omsk, 644046,
the Russian Federation.
Undergraduate of OSTU.
Phone: +79658776007.
E-mail: nazimkadirov94@mail.ru.

УДК 620.179.162

А. О. Рыжова, С. А. Бехер

Сибирский государственный университет путей сообщения (СГУПС),
г. Новосибирск, Российская Федерация

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТЕЙ ПАРАМЕТРОВ АКУСТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ, ОТРАЖЕННЫХ ОТ ГРАНИЦЫ С ОБЪЕКТОМ КОНТРОЛЯ, СО СВОЙСТВАМИ МАТЕРИАЛА ОБЪЕКТА КОНТРОЛЯ

В статье представлены результаты экспериментального исследования образцов из разных материалов ультразвуковым методом контроля. Исследования проводились разработанным и изготовленным комбинированным преобразователем (ПЭП). Построены амплитудно-частотные характеристики отраженных сигналов от границы «ПЭП – исследуемый образец» и определены коэффициенты отражения R продольных волн на двух частотах. Построена зависимость коэффициента отражения от степени притертости ПЭП к исследуемому образцу.

Ключевые слова: внутренние кольца подшипников, ультразвуковой метод контроля, неразрушающий контроль, контроль натяга колец подшипников.

Anna O. Ryzhova, Sergey A. Bekher

Siberian State Transport University (STU), Novosibirsk, the Russian Federation

RESEARCH OF ACOUSTIC CHARACTERISTICS OF THE CONTACT LAYER FOR FIXED DETACHABLE JOINTS

The article presents the results of an experimental study of samples from different materials by ultrasound control. The research was carried out by a developed and manufactured combined piezoelectric transducer. The amplitude-frequency characteristics of the reflected signals from the

"piezoelectric transducer – test sample" boundary are constructed and the reflection coefficients R of longitudinal waves at two frequencies are determined. The dependence of the reflection coefficient on the degree of lapping of the piezoelectric transducer to the test sample is constructed.

Keywords: bearing inner rings, ultrasonic technique, non-destructive testing, interference inspection of ring bearing.

Буксовые узлы колесных пар являются наиболее ответственными элементами ходовых частей вагона. Их надежность зависит в том числе от плотности прессовой посадки внутренних колец на шейку оси колесной пары. В настоящее время контроль прессовых соединений проводят до монтажа по разности диаметров (натяг) колец подшипников и шейки осей. В процессе эксплуатации прочность соединения может снижаться, что приводит к ослаблению натяга, появлению подвижности соединения и провороту кольца. В вагоноремонтном хозяйстве при плановых видах ремонта при условии проверки плотности посадки и соответствии нормативно-технической документации кольца допускается не снимать.

Для контроля соединений с натягом перспективно применение методов акустического вида [2-4]. Ультразвуковой метод контроля плотности посадки основан на зависимости коэффициента отражения ультразвуковых волн R от параметров границы соединения кольца с осью. Значение коэффициента определяется акустическими свойствами материала соединяемых деталей и свойствами слоя контактной жидкости. Основным параметром слоя контактной жидкости являются его акустический импеданс и толщина, которая зависит от неровности и шероховатости поверхностей сопрягаемых деталей и оказывает существенное влияние на связь регистрируемых параметров акустических волн с акустическими характеристиками кольца. Толщина жидкости может изменяться не только от испытания к испытанию, но и иметь вариации на одном кольце при смещении точки измерения по радиусу или по окружности. Повышение точности измерения акустических параметров ультразвукового метода может быть достигнуто за счет использования многопараметрового контроля, для реализации которого необходимы исследования закономерности формирования отраженных волн в системе «ПЭП – акустическая задержка (кольцо подшипника) – контактная жидкость – ось».

Целью работы является исследование коэффициента отражения от границы «акустическая задержка – объект контроля» для оценки акустического

контакта ПЭП, обеспечения постоянства чувствительности ультразвукового контроля и определения в реальном режиме времени в процессе контроля плотности соединения двух объектов.

Исследования закономерностей взаимодействия акустической волны с границей соединения выполнялись прямым совмещенным ПЭП с рабочей частотой 5 МГц и диаметром пьезопластины 12 мм, наклеенным на акустическую задержку, изготовленную из стали 20 (рисунок 1). В экспериментах использовались образцы из стали ШХ4, используемой для изготовления колец подшипников, дюралю Д16Т, латуни и оргстекла. Исследуемые образцы имели различное состояние поверхности. В качестве контактной жидкости применялась трансформаторное масло, смазки ЭмПи-4 (используется для прессовой посадки колец на шейку оси) и водопроводная вода, обеспечивающая минимальную толщину контактного слоя между акустической задержкой и образцом.

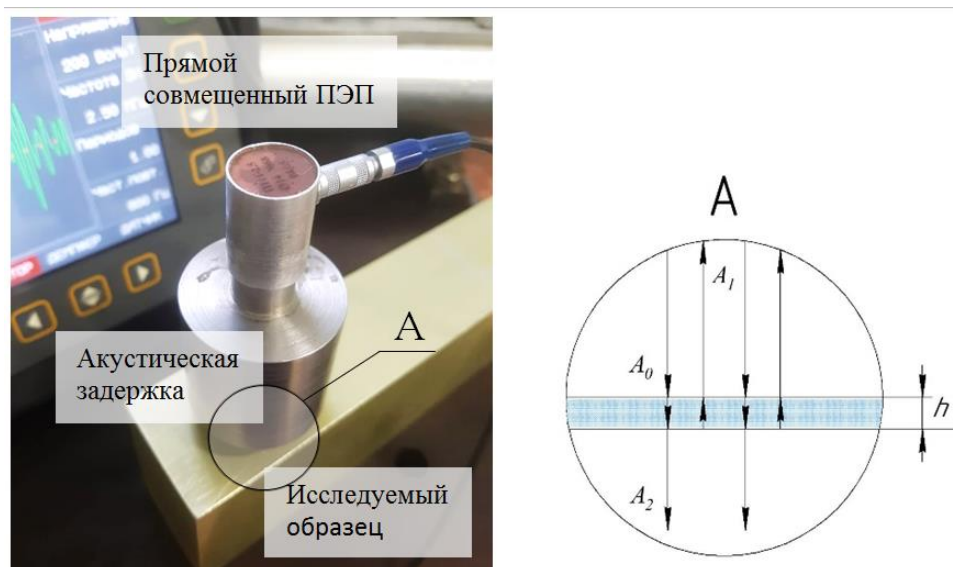


Рисунок 1 – Схема проведения эксперимента:

h – толщина слоя контактной жидкости; A_0 – амплитуда волны, падающей на границу «акустическая задержка – контактная жидкость – образец»;

A_1 – амплитуда отраженной волны; A_2 – амплитуда прошедшей волны

Преобразователь подключался параллельно к цифровому запоминающему осциллографу TBS2104 (№ 66636-17 в государственном реестре средств измерений) и ультразвуковому дефектоскопу УДС-50 (№ 34900-07 в государственном реестре средств измерений). Для обеспечения минимальной толщины контактной жидкости акустическая задержка (рисунок 1) притиралась к поверхности исследуемого образца. Генератором

дефектоскопа возбуждали пьезопластину ПЭП коротким импульсом, длительность которого составляла половину периода колебаний с частотой 5 МГц. Сигнал, отраженный от границы, регистрировался без частотной фильтрации в широком диапазоне от 0,1 до 20 МГц, оцифровывался осциллографом и сохранялся на электронный носитель. Цифровые сигналы обрабатывались в программной среде *Mathcad*, для каждого из них рассчитывался коэффициент отражения:

$$R = \frac{A_{\text{отр}}}{A_{\text{пад}}}, \quad (1)$$

где $A_{\text{пад}}$ и $A_{\text{отр}}$ – амплитуды волн, отраженных от свободной границы акустической задержки и от границы акустической задержки с образцом.

Экспериментально определенный коэффициент отражения позволяет с помощью известных зависимостей [5,6] определить толщину слоя контактной жидкости:

$$R = \sqrt{\frac{(z_3 - z_1)^2 + \left(\frac{z_1 \cdot z_3}{z_2}\right)^2 \cdot \sin^2\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot f \cdot h}{c}\right)}{(z_3 + z_1)^2 + \left(\frac{z_1 \cdot z_3}{z_2}\right)^2 \cdot \sin^2\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot f \cdot h}{c}\right)}}, \quad (2)$$

где z_1 – акустическое сопротивление материала акустической задержки, равное для стали ШХ4 466 кг/м²·с; h – толщина слоя контактной жидкости, м; λ_2 – длина акустической волны в материале исследуемого образца, м; z_2 – акустическое сопротивление материала исследуемого образца, кг/м²·с, которое определяется выражением:

$$z_2 = \rho \cdot c, \quad (3)$$

где ρ – плотность материала исследуемого образца, кг/м³; c – скорость распространения акустической волны в исследуемом образце, м/с.

Амплитуда отраженного сигнала уменьшается по мере притирания акустической задержки к исследуемому образцу. При чем, чем выше плотность материала исследуемого образца, тем существеннее влияние притирания на падения амплитуды отраженного сигнала. В выражении (2) первое слагаемое в знаменателе зависит от толщины слоя и частоты волны. Эта особенность коэффициента отражения может быть использована для отдельной оценки акустических сопротивлений и толщины слоя контактной жидкости.

Для оценки частотно-зависимой составляющей принятых сигналов построены их амплитудно-частотные характеристики (рисунок 2). Максимум амплитуд принятых сигналов наблюдался на частотах 5,4 и 2,9 МГц, на которых для всех исследуемых образцов по формуле (1) рассчитывался

коэффициент отражения R от границы акустической задержки с образцом. Используя выражение (3), экспериментальные значения скоростей распространения и табличные значения плотности, рассчитаны удельные акустические сопротивления (импеданс) материалов образцов. Разброс полученных значений R относительно среднего, характеризуемый средним квадратическим отклонением, не превышает 20 %. Экспериментальные и расчетные результаты приведены в таблице 1.

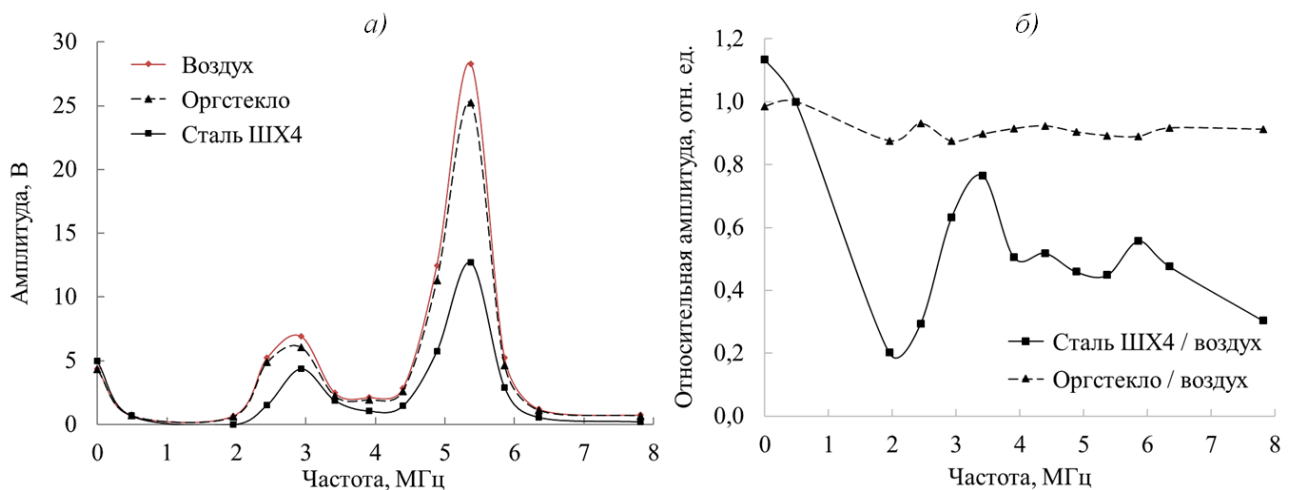


Рисунок 2 – Спектр (а) отраженных от границы акустической задержки сигналов и относительные спектры (б) сигналов, нормированные к спектру свободной границы (воздух)

Таблица 1

Значения коэффициентов отражения и толщины слоя контактной жидкости для образцов, изготовленных из материалов с разными значениями акустического импеданса

Материал образца	Импеданс, z , $\text{кг/м}^2 \cdot \text{с} \cdot 10^5$	Коэффициент отражения				Толщина слоя контактной жидкости, мкм	
		Максимальное значение		Среднее квадратическое отклонение			
		Диапазон частот, МГц					
		2,5 – 3,0	5,0 – 5,5	2,5 – 3,0	5,0 – 5,5	2,5 – 3,0	5,0 – 5,5
Оргстекло	30,35	0,89	0,90	0,01	0,01	14,2	10,7
Дюраль	182,70	0,67	0,87	0,04	0,04	6,4	7,6
Латунь	363,80	0,47	0,60	0,06	0,01	3,1	2,4
Сталь ШХ4	465,99	0,46	0,45	0,01	0,07	2,7	1,4

Для полученных в таблице значений коэффициентов отражения рассчитаны в соответствии с уравнением (2) и приведены в таблице 1 толщины слоя контактной жидкости.

Для оценки вариации толщины слоя контактной жидкости h в ходе одного эксперимента анализировались сигналы, отраженные от границы «ПЭП – контактная жидкость – исследуемый образец» с различной степенью притертости. Результаты эксперимента представлены на рисунке 3 в виде зависимостей значений коэффициентов отражения на частотах 5,4 и 2,9 МГц с увеличением степени притертости ПЭП к исследуемым образцам из стали ШХ4 (рисунок 3, а) и дюрэли (рисунок 3, б).

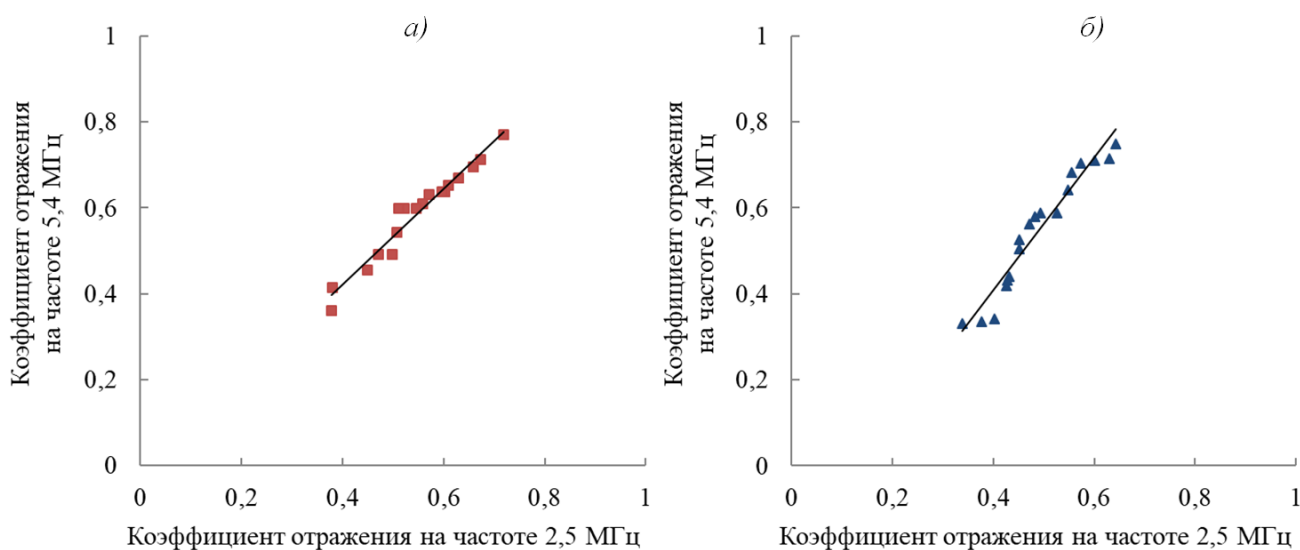


Рисунок 3 – Графики зависимости значений коэффициентов отражения на частотах 5,4 и 2,9 МГц с увеличением степени притертости ПЭП к исследуемому образцу из: а) стали ШХ4; б) дюрэли.

Наклон зависимостей коэффициентов отражения на двух частотах от степени притертости преобразователя к образцам составил для стали 1,2, для дюрэли – 1,5.

При вариации толщины слоя контактной жидкости между акустической задержкой и исследуемым образцом коэффициент отражения, R , изменялся в пределах от 0,34 до 0,97 на частоте 2,9 МГц и от 0,33 до 0,90 на частоте 5,4 МГц.

Выводы

1. Для образцов из стали ШХ4, латуни, дюрэли и оргстекла экспериментально определены максимумы амплитуд сигналов, отраженных от границы с преобразователем на двух частотах.

2. Рассчитаны значения коэффициентов отражения продольных волн от границы «акустическая задержка – контактная жидкость – исследуемый образец», которые составили для стали ШХ4 – 0,37, латуни – 0,46, дюрали – 0,65 и оргстекла – 0,97.

3. Экспериментально показано, что коэффициент отражения существенно зависит от степени притертости ПЭП к поверхности образца. Для повышения достоверности определения акустических свойств материала контролируемого объекта необходимо минимальное значение шероховатости поверхности $R_a < 1,25$ мкм и максимальная степень притертости с толщиной контактного слоя h , не превышающей 20 – 30 % шероховатости поверхности.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-38-90016\19.

Список литература

1. Белоногов, А. Г. Прибор ПС-219 для контроля натяга колец подшипников / А. Г. Белоногов, С. А. Родионов, А. М. Шанаурин. – Текст : непосредственный // Дефектоскопия. – 2004. – № 7. – С. 90–92.

2. Контроль натяга бандажей колес методом акустоупругости / В. В. Муравьев, В. А. Стрижак, Л. В. Волкова, А. В. Пряхин. – Текст : непосредственный // Локомотив. – 2014. – № 5. – С. 39–41.

3. Степанова, Л. Н. Контроль колец подшипников локомотива методом акустической эмиссии / Л. Н. Степанова Е. С. Тенитилов, С. А. Бехер. – Текст : непосредственный // Дефектоскопия. – 2009. – № 9. – С. 49–55.

4. Козятник, И. И. Определение натяга внутренних колец буксовых подшипников на шейке оси колесной пары вагона акустическим методом / И. И. Козятник, Т. В. Муравьев. – Текст : непосредственный // Вестник СГУПС. – 2005 – Выпуск 12 – С. 73–81.

5. Муравьев, В. В. Акустическая тензометрия и структуроскопия тонких стальных проволок: монография / В. В. Муравьев, О. В. Муравьева, А. В. Платунов; Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова. – Ижевск : Издательство ИжГТУ, 2016. – 107 с. : ил. – Текст : непосредственный.

6. Троицкий, В. А. Ультразвуковой контроль сварных соединений / В. А. Троицкий, В. Ю. Попов. – Киев : Феникс, 2010. – 224 с. – Текст : непосредственный.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Рыжова Анна Олеговна

Сибирский государственный университет
путей сообщения (СГУПС).

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

Аспирант СГУПС.

Тел.: +7 (383) 328-03-02.

E-mail: annalodo@yandex.ru.

Бехер Сергей Алексеевич

Сибирский государственный университет
путей сообщения (СГУПС).

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

Доктор технических наук, доцент,
заведующий кафедрой «Физика» СГУПС.

Тел.: +7 (383) 328-03-46.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Ryzhova Anna Olegovna

Siberian transport university (STU).

191, Dusi Kovalchuk, Novosibirsk, 630049,
the Russian Federation.

Postgraduate student STU.

Phone: +7 (383) 328-03-02.

E-mail: annalodo@yandex.ru.

Bekher Sergey Alekseevich

Siberian transport university (STU).

191, Dusi Kovalchuk, Novosibirsk, 630049,
the Russian Federation.

Doctor of Technical Science, associate
professor, head of the department
«Physics» STU.

Phone: +7 (383) 328-03-46.

E-mail: behers@mail.ru.

УДК 658.511

Д. И. Школина, С. А. Бехер, А. О. Коломеев

Сибирский государственный университет путей сообщения (СГУПС),
г. Новосибирск, Российская Федерация

РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ ИНФОРМАЦИОННОЙ ПОДДЕРЖКИ ДЛЯ ПОСТОЯННОГО МОНИТОРИНГА ПРОЦЕССОВ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ

В статье рассматриваются вопросы практического применения методов математической статистики для непрерывного мониторинга процессов неразрушающего контроля в вагоноремонтных предприятиях. Выполнен статистический анализ результатов магнитопорошкового контроля неномерных деталей грузовых вагонов. Установлена корреляционная зависимость между результатами контроля клиньев тягового хомута и маятниковой подвески.

Ключевые слова: неразрушающий контроль, статистический анализ, частота браковки деталей, постоянный мониторинг.

DEVELOPMENT OF INFORMATION SUPPORT METHODS FOR CONTINUOUS MONITORING OF NON-DESTRUCTIVE VERIFICATION PROCESSES

The article discusses the practical application of mathematical statistics methods for continuous monitoring of non-destructive testing processes in car repair enterprises. Statistical analysis of results of magnetic powder control of non-measuring parts of freight cars was performed. Correlation between results of control of traction clamp wedges and pendulum suspension is established.

Keywords: non-destructive testing, statistical analysis, part failure rate, continuous monitoring.

Организация безопасной эксплуатации подвижного состава напрямую зависит от эффективности процессов неразрушающего контроля (далее НК) деталей и узлов при проведении ремонта. Для постоянного мониторинга деятельности подразделения НК разрабатываются и активно применяются программные методы и средства сбора и управления информацией, а для анализа и обработки используются методы математической статистики [1-2].

Целью исследования является разработка методов непрерывного мониторинга деятельности процесса НК на предприятиях вагоноремонтного комплекса.

В вагоноремонтной компании, имеющей в своем составе 42 депо, введено в эксплуатацию программное обеспечение, направленное на автоматизацию работы подразделений НК. Программное обеспечение разрабатывалось с целью сокращения временных затрат при выполнении повторяющихся операций НК и постоянного соответствия требованиям нормативной документации за счет повышения объективности и оперативности информации об участке НК. Постоянный мониторинг процесса НК направлен на решение задач, заключающихся в формировании, обработке информации и анализе результатов НК узлов и деталей грузовых вагонов, повышения их достоверности и надежности для уменьшения доли продукции, несоответствующей требованиям на выходе производственного процесса.

Статистический анализ используется в качестве инструмента, позволяющего в реальном времени оценить эффективность элементов процесса НК: дефектоскопистов, оборудования и технологической документации. Корреляционный анализ проводился для результатов НК маятниковой подвески, клина тягового хомута и подвески тормозного башмака. Данные детали контролируются по схожей технологии: контроль осуществляется магнитопорошковым методом, способом приложенного поля с использованием магнитной суспензии и кольцевого намагничивающего устройства [3]. Для анализа отобрана статистика контроля деталей грузовых вагонов за 8 месяцев 2020 года.

Для количественной оценки взаимовлияния составляющих процесса контроля деталей грузовых вагонов проведен корреляционный анализ частот браковки маятниковой подвески и клина тягового хомута (рисунок 1, а), частот браковки клина тягового хомута и подвески тормозного башмака (рисунок 1, б) [4]. На вагоноремонтных предприятиях за рассматриваемый период проконтролировано более 95 тыс. клиньев тягового хомута и более 185 тыс. маятниковых подвесок, объемы контроля на предприятиях сопоставимы и составляют от 2,5 до 5 тысяч штук. При анализе не рассматривались результаты контроля деталей в 3,5 и более раз превышающие среднюю частоту браковки по каждому типу деталей по всем депо.

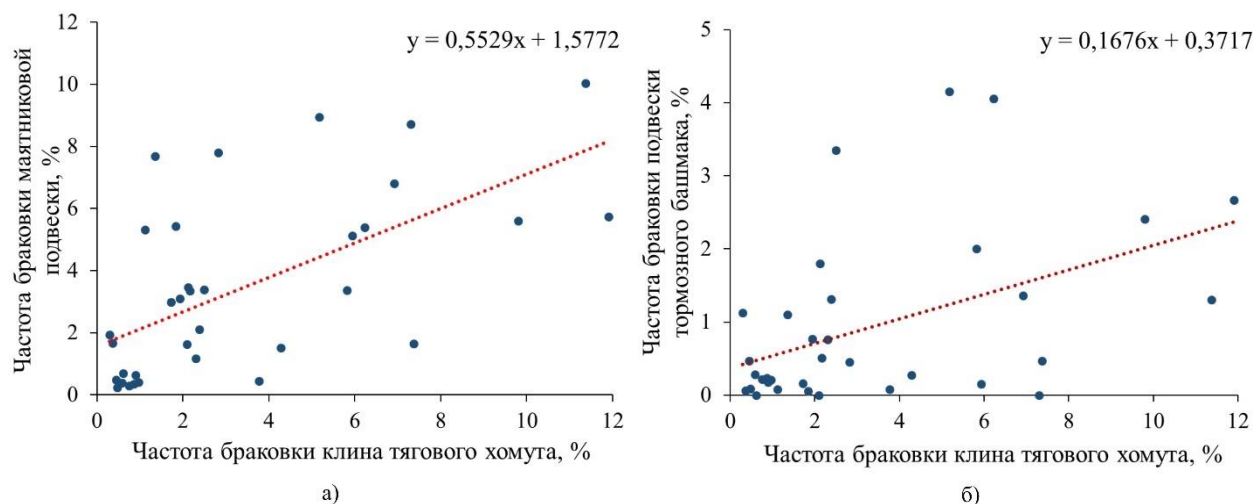


Рисунок 1 – Корреляционный анализ результатов браковки деталей грузовых вагонов:

а – зависимость частоты браковки маятниковой подвески от частоты браковки клина тягового хомута; б – зависимость частоты браковки подвески тормозного башмака от частоты браковки клина тягового хомута

Установлена корреляционная связь между результатами браковки клиньев тягового хомута и маятниковой подвески, коэффициент корреляции составляет $R = 0,62$. Между результатами браковки клина тягового хомута и подвески тормозного башмака, клина тягового хомута и подвески тормозного башмака установлена слабая корреляционная связь с коэффициентом корреляции $R = 0,40$.

Анализ результатов НК деталей грузовых вагонов тесно связан с изучением случайных процессов, поэтому наиболее адекватным методом, применяемым для описания процессов, является математическое моделирование с использованием генератора случайных чисел в качестве источника события. Математическое моделирование проводилось в программной среде Microsoft Excel, задавалась последовательность случайных чисел, распределение которой принадлежит биномиальному закону распределения с уровнем значимости $\alpha = 5\%$. По результатам анализа теоретической модели установлено, что вероятность наступления события, при котором коэффициент корреляции между двумя случайными величинами равен или больше 0,40 не превышает 1 %. Следовательно, наличие корреляционной связи между результатами контроля клина тягового хомута и маятниковой подвески может являться показателем уровня компетенции и квалификации персонала, занимающегося проведением НК, так как контроль данных деталей выполняется на одной позиции и одним дефектоскопистом [5].

Для анализа отобраны результаты магнитопорошкового контроля клиньев тягового хомута и маятниковых подвесок, в которых каждым дефектоскопистом проконтролировано более 500 деталей каждого вида. Числовые характеристики результатов магнитопорошкового контроля деталей грузовых вагонов представлены в таблице 1.

Таблица 1

Числовые характеристики результатов магнитопорошкового контроля

Наименование детали	Объем контроля, шт.	Среднее значение частоты, %	Среднее квадратическое отклонение, %
Клин тягового хомута	700 - 1200	5,67	8,44
Маятниковая подвеска	1200 - 1700	5,34	7,99

На основе выборки построено распределение количества дефектоскопистов от частоты браковки клина тягового хомута, которое удовлетворительно описывается биномиальным распределением с уровнем значимости $\alpha = 1\%$ (рисунок 2, а). Проверка принадлежности экспериментального распределения теоретическому закону выполнена с использованием критерия согласия Пирсона, рассчитанное значение $\chi^2 = 12,53$ не превышает его критического значения $\chi^2_q = 13,28$ с числом степеней свободы $k = 4$. Зависимость частоты браковки маятниковой подвески от частоты браковки клина тягового хомута по результатам контроля дефектоскопистов с коэффициентом корреляции $R = 0,66$ для наглядности представлена в логарифмическом масштабе (рисунок 2, б). Наличие корреляционной связи между результатами браковки деталей, контроль которых осуществляется на одной позиции, свидетельствует о сильном влиянии человеческого фактора, оборудования и условий контроля.

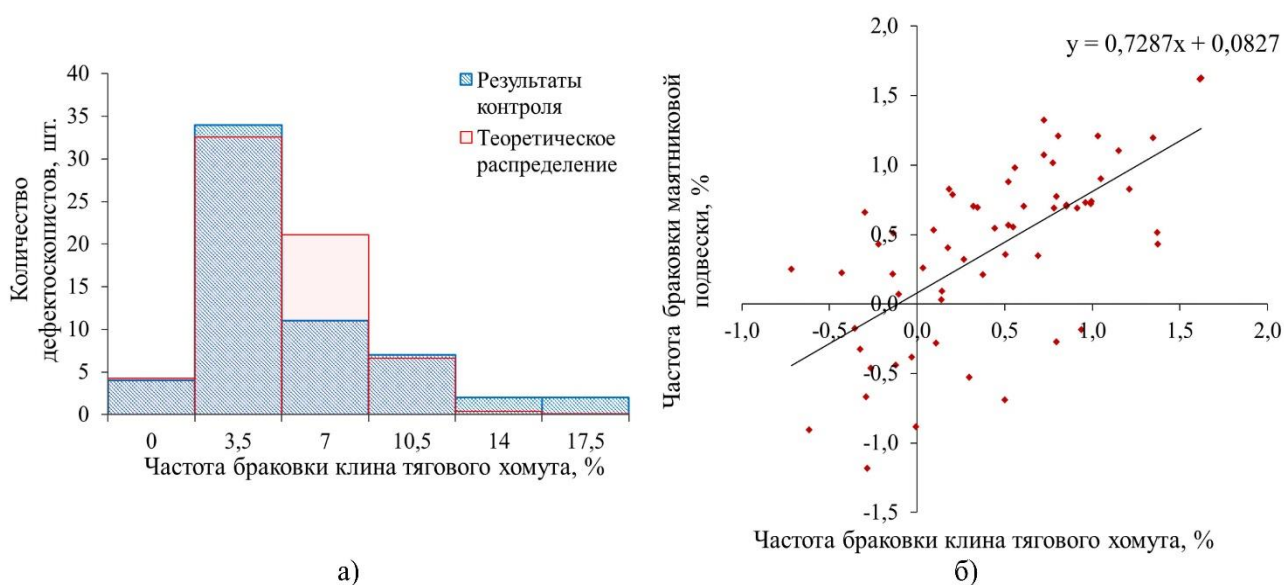


Рисунок 2 – Результаты контроля деталей грузовых вагонов
магнитопорошковым методом контроля:

- а – распределение дефектоскопистов по частоте браковки клиньев тягового хомута;
б – зависимость частоты браковки маятниковой подвески от частоты браковки клина тягового хомута

Применение программного обеспечения и статистических методов анализа результатов НК открывает возможности для непрерывного мониторинга элементов процесса. Критерии оценки функционирования подразделений НК на вагоноремонтных предприятиях основываются на

проверке принадлежности их к одному распределению и установлении корреляционной связи между результатами браковки деталей [6].

Результаты магнитопорошкового контроля клиньев тягового хомута и маятниковой подвески удовлетворительно описываются биномиальным распределением со средним значением частоты браковки 5,7 % и 5,3 % соответственно. Между результатами контроля деталей установлена корреляционная связь с коэффициентом корреляции $R = 0,66$, наличие которой объясняется выполнением контроля одним дефектоскопистом на одной позиции.

Список литературы

1. Поваров, В. П. Программная реализация интеллектуальной системы принятия решений при управлении объектами ядерной энергетики / В. П. Поваров. – Текст : непосредственный // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. – 2019. – Том 7 – № 1 – С. 293–308.
2. Иванов, В. И. Использование вероятностных методов для оценки эффективности неразрушающего контроля / В. И. Иванов, Н. Н. Коновалов, А. Н. Дергачев. – Текст : непосредственный // Технологии техносферной безопасности. – 2014. – № 6 (58). – С. 12.
3. Бахова, Л. В. Основные виды и методы неразрушающего контроля деталей и узлов железнодорожного подвижного состава / Л. В. Бахова. – Текст : непосредственный // Вестник науки и творчества. – 2017. – № 6 (18). – С. 14–20.
4. Орлов, А. И. Вероятностно-статистические модели корреляции и регрессии / А. И. Иванов. – Текст : непосредственный // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. – 2020. – №160. – С. 130–162.
5. Муравьев, В. В. Анализ результатов сертификации специалистов в области неразрушающего контроля объектов железнодорожного транспорта / В. В. Муравьев. – Текст : непосредственный // Интеллектуальные системы в производстве. – 2013. – №2. – С. 144–148.
6. Бехер, С. А. Информационная поддержка принятия управленческих решений в подразделениях неразрушающего контроля / С. А. Бехер, Д. И. Школина, А. О. Коломеец. – Текст : непосредственный // Вестник РГУПС. – 2020. – № 3 (79). – С. 8–14.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Школина Дарья Ивановна

Сибирский государственный университет
путей сообщения (СГУПС).
ул. Дуси Ковальчук, д. 191, г. Новосибирск,
630049, Российская Федерация.
Аспирант кафедры «Электротехника,
диагностика и сертификация» СГУПС.
Тел.: +7 (383) 328-03-46.
E-mail: dashashkolina@mail.ru.

Бехер Сергей Алексеевич

Сибирский государственный университет
путей сообщения (СГУПС).
ул. Дуси Ковальчук, д. 191, г. Новосибирск,
630049, Российская Федерация.
Доктор технических наук, профессор,
доцент кафедры «Информационные
технологии транспорта» СГУПС.
Тел.: +7 (383) 328-03-46.
E-mail: behers@mail.ru.

Коломеец Андрей Олегович

Сибирский государственный университет
путей сообщения (СГУПС).
ул. Дуси Ковальчук, д. 191, г. Новосибирск,
630049, Российская Федерация.
Кандидат технических наук, доцент
кафедры «Информационные технологии
транспорта» СГУПС.
Тел.: +7 (383) 328-03-02.
E-mail: andreykolomeec@yandex.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Shkolina Darya Ivanovna

Siberian Transport University (STU).
191, Dusi Kovalchuk st., Novosibirsk, 630049,
the Russian Federation.
Graduate student, Chair “Electrical engineering,
diagnostics and certification” STU.
Phone: +7 (383) 328-03-46.
E-mail: dashashkolina@mail.ru.

Bekher Sergey Alekseevich

Siberian Transport University (STU).
191, Dusi Kovalchuk st., Novosibirsk, 630049,
the Russian Federation.
Doctor of Engineering Sciences, Professor,
Associate Professor of Chair “Electrical
engineering, diagnostics and certification” STU.
Phone :+7 (383) 328-03-46.
E-mail: behers@mail.ru.

Kolomeec Andrey Olegovich

Siberian Transport University (STU).
191, Dusi Kovalchuk st., Novosibirsk, 630049,
the Russian Federation.
Candidate of Engineering Sciences, Associate
Professor of Chair “Electrical engineering,
diagnostics and certification” STU.
Phone :+7 (383) 328-03-02.
E-mail: andreykolomeec@yandex.ru.

Ю. И. Матяш, Ю. М. Сосновский, Е. М. Кондриков, Д. В. Муравьев

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС),

г. Омск, Российская Федерация

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СВЯЗИ ОСТАТОЧНОЙ
ДЕФОРМАЦИИ В ТЯЖЕЛОНАГРУЖЕННЫХ УЗЛАХ И ДЕТАЛЯХ
ПОДВИЖНОГО СОСТАВА С МОДУЛЕМ ЮНГА И
УДЕЛЬНЫМ КОЭФФИЦИЕНТОМ ТЭДС**

Проведены лабораторные исследования четырех стальных образцов. Представлены экспериментальные исследования зависимости модуля Юнга стали от величины остаточной деформации. Получены значения остаточной деформации при увеличении и уменьшении нагрузки. Исследована связь удельного коэффициента ТЭДС стали с остаточной деформацией. Проанализирована возможность применения полученных результатов для совершенствования системы диагностики остаточного ресурса тяжело нагруженных узлов и деталей подвижного состава.

Ключевые слова: Модуль Юнга, остаточный ресурс, остаточная деформация, лабораторный эксперимент, диагностика, подвижной состав, удельный коэффициент ТЭДС.

Yury I. Matiash, Yury M. Sosnovsky, Eugene M. Kondrikov, Dmitriy V. Muravev

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

**EXPERIMENTAL STUDY OF THE RELATIONSHIP RESIDUAL
DEFORMATION IN HEAVY-LOADED UNITS AND PARTS
OF ROLLING STOCK WITH THE YOUNG'S MODULUS AND
SPECIFIC COEFFICIENT OF THERMAL EMF**

Laboratory tests of four steel samples were carried out. Experimental studies of the dependence of the young's modulus of steel on the value of residual deformation are presented. The values of the residual strain with increasing and decreasing load are obtained. The relationship between the specific coefficient of thermal EMF of steel and the residual deformation is investigated. The possibility of applying the obtained results to improve the system of diagnostics of the residual life of heavy-loaded units and parts of rolling stock is analyzed.

Keywords: Young's modulus, residual life, residual deformation, laboratory experiment, diagnostics, rolling stock, specific coefficient of thermal EMF.

Одно из главных направлений инновационного развития ОАО «РЖД» согласно стратегии развития железнодорожного транспорта России до 2030 года, утвержденной распоряжением Правительства РФ от 17.06.2008 г. за №887-р, заключается в совершенствовании системы управления и обеспечения безопасности движения поездов и снижении рисков чрезвычайных ситуаций.

Для своевременного обнаружения возникновения различных видов неисправностей узлов и деталей подвижного состава в настоящее время на подходах к пунктам технического обслуживания размещаются различные комплексы: КТСМ-02, ПАК, КТИ, САКМА, АСООД и др.

Широко применяется ультразвуковая дефектоскопия рельсового пути, колесных пар и др. В основе данного метода лежат исследования советского физика С.Я. Соколова по распространению ультразвуковых колебаний с частотой от 0,5 МГц до 25 МГц. Ультразвуковые волны не изменяют траектории движения в однородных средах и отражаются от границ раздела сред с различным акустическим сопротивлением. Разрешающая способность данного метода определяется длиной волны и составляет примерно 10^{-4} м.

Магнитопорошковый метод, который также широко применяется в пунктах диагностического контроля, основан на искажении магнитного потока в местах с пониженной магнитной проницаемостью (трещины, неметаллические включения и др.). В искаженном, неоднородном магнитном поле на ферромагнитные частицы (порошок) начинают действовать силы, стремящиеся переместить частицы в область наибольшей неоднородности. Данный метод позволяет обнаруживать дефекты на глубине до 2-3 мм.

Другие методы, например, такие как виброакустический или магнитопорошковый не получили широкого распространения, главным образом, из-за неоднозначной трактовки полученных результатов при исследовании дефектных деталей.

Вместе нельзя не учитывать тот факт, что в процессе эксплуатации деформация детали под знакопеременным нагружением приводит, как правило, к кристаллической анизотропии металла. При этом наблюдается ряд эффектов, такие как потеря (уменьшение) пластичности и вязкости, увеличение твердости. Изменяются и физические свойства металла: сопротивление, теплопроводность, магнитная проницаемость, ТЭДС и др. Более подробно физико-химические причины этих изменений были рассмотрены в работе [1], в которой авторы использовали концепцию изменения структурной рыхлости.

Анализ существующих методов выявления различного рода дефектов в узлах и деталях подвижного состава, показывает, что методов, учитывающих структурные изменения и вместе с ними механические свойства деталей, на предприятиях ОАО «РЖД» практически нет [2]. Существующие же методы, направлены на выявление уже таких дефектов, после обнаружения которых любая эксплуатация исследуемого объекта должна быть прекращена. Расширение сведений о структурных изменениях стальных деталей в процессе их эксплуатации может существенно увеличить точность и достоверность существующих методов диагностики и привести к появлению новых наиболее эффективных способов определения остаточного ресурса. Потеря пластичности, увеличение твердости являются очень важными параметрами металлической детали, изменение которых обязательно должно контролироваться в процессе эксплуатации.

Один из вариантов решения этой проблемы, по нашему мнению, может основываться на определении изменения одной или нескольких физических характеристик металла, которые тесно связаны со структурой. Одним из таких параметров является удельный коэффициент термо-ЭДС (ТЭДС) исследуемой детали и постоянных контактов.

На рисунке 1 показана электрическая схема лабораторной установки для измерения удельного коэффициента ТЭДС. К свободному концу тестируемого образца, закрепленного в массивной станине, выполняющей роль холодильника (COOLER) присоединялось нагревательное кольцо, к которому через гибкую медную шину передавалось тепло от нагревателя (HEATER).

К нижней грани исследуемого образца, с помощью прижимных контактов присоединялась термопара медь-константан, удельный коэффициент ТЭДС которой был известен: $\alpha_T = 41,2$ мкВ/град. Для исключения короткого замыкания между концами термопары через металлический образец, между одним из концов и образцом была помещена пластина оксида бериллия (Beryllium oxide, BeO). Оксид бериллия является хорошим диэлектриком при комнатных температурах и имеет достаточно высокую теплопроводность. Показания нижней термопары фиксировались с помощью микровольтметра - μV_2 .

К верхней грани исследуемого образца, через точечные серебряные контакты, выполненные из одного и того же материала, через ключ К, находящийся при комнатной температуре присоединялся один из концов

верхней термопары, одним из проводников которой являлся исследуемый образец. Другой конец термопары состоял из закрепленного конца исследуемого образца и проводника, имеющего надежный электрический контакт с ним.

Наличие двух контактных площадок на верхней грани образца, предполагало исследование влияния механической деформации на величину удельного коэффициента ТЭДС.

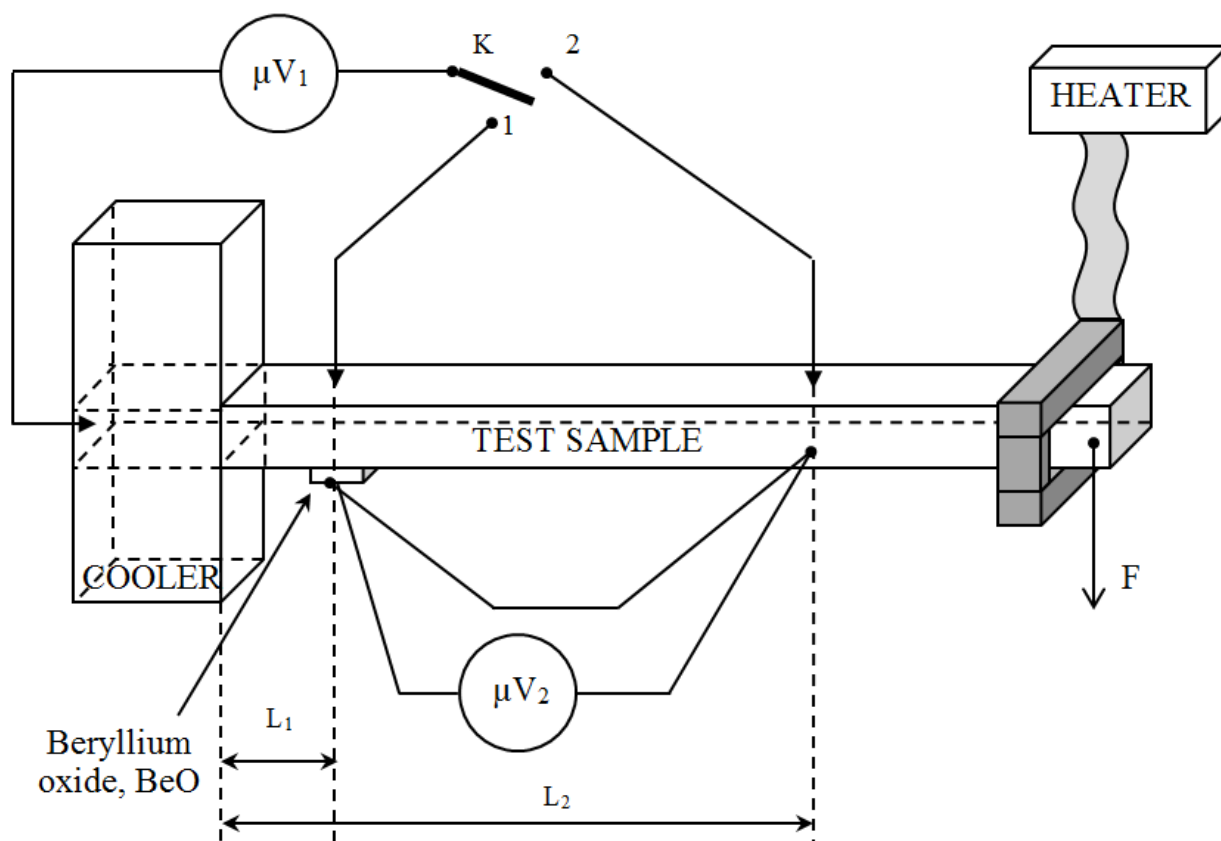


Рисунок 1 – Электрическая схема лабораторной установки для измерения удельного коэффициента ТЭДС

Показания верхней термопары фиксировались с помощью другого микровольтметра – μV_1 . Переключатель К позволял подключать верхнюю термопару к исследуемому образцу в двух точках: в первом случае горячий контакт верхней термопары находился на верхней грани исследуемого образца на расстоянии L_1 , а во втором случае – на расстоянии L_2 от холодильника.

Нагревание образца происходило до тех пор, пока разность температур между контактами нижней термопары не достигала 12-14°C и показания микровольтметра μV_2 не становились стабильными. Таким образом, градиент температуры в исследуемом образце априори считался линейным. Зная

показания микровольтметра μV_2 , удельного коэффициента ТЭДС термопары медь-константан α_T с учетом линейности градиента температуры определялась разность температур между холодильником и верхним контактом, находящимся на расстоянии L_1 или L_2 . По этой разности температур и показаниям микровольтметра μV_1 определялся удельный коэффициент ТЭДС исследуемого образца α_1 или α_2 :

$$\alpha_1 = \frac{\alpha_T (L_2 - L_1)}{L_1} \cdot \frac{U_1}{\varepsilon_T}, \quad (1)$$

$$\alpha_2 = \frac{\alpha_T (L_2 - L_1)}{L_2} \cdot \frac{U_2}{\varepsilon_T}, \quad (2)$$

где α_T - удельный коэффициент ТЭДС термопары медь-константан, U_1 и U_2 - показания микровольтметра μV_1 при двух положениях переключателя К, ε_T - ЭДС нижней термопары, определяемая по показаниям микровольтметра μV_2 , L_1 и L_2 параметры лабораторной установки.

Таким образом, лабораторная установка позволяла определять удельный коэффициент ТЭДС материала, из которого был изготовлен исследуемый образец в двух случаях: α_1 - по показаниям микровольтметра μV_1 подключенного к образцу через контакт 1 в переключателе К и α_2 - по показаниям микровольтметра μV_1 подключенного к образцу через контакт 2 в переключателе К в зависимости от приложенной силы F .

Испытуемый образец, в форме прямоугольного параллелепипеда одним концом жестко закреплялся в фиксирующем устройстве, а к незакрепленному концу подвешивались грузы различной массы. Под воздействием веса этих грузов F , свободный конец прогибался и по величине прогиба Δ и параметрам образца (a - размер узкой грани, b - размер широкой грани, L - плечо приложенной силы) рассчитывался модуль Юнга E по формуле:

$$E = \frac{4FL^3}{ba^3\Delta}. \quad (3)$$

Величина прогиба свободного конца образца Δ фиксировалась по показаниям часового микрометра с точностью $\pm 0,01$ мм.

Более подробно схема лабораторной установки, её возможности и методика измерений рассмотрены в работе [3].

В таблице 1 представлены используемые в эксперименте образцы и результаты их предварительного химического анализа.

Таблица 1

Результаты предварительного химического анализа используемых образцов

№ образца	Образец	Массовая доля углерода, С (%)
1	Автосцепка	0,215
2	Рельс	0,761
3	Сталь 45	0,271

Все измерения проводились при комнатной температуре.

Механическое напряжение в сечении зажима образца рассчитывалось по формуле:

$$\sigma = \frac{6FL}{a^2b} . \quad (4)$$

Расчётные значения максимального напряжения $\sigma_{\max}$ в области зажима составили приблизительно от 0,6 ГПа до 0,7 ГПа для разных образцов. Следует заметить, что в работе [4] приводятся расчеты прочности боковой рамы и надрессорной балки, выполненные в программе SolidWorks с использованием модуля COSMOSWork, входящего в состав программы. Полученные максимальные значения допускаемых напряжений составили не более 0,3 ГПа. Это говорит о том, что диапазон напряжений в образцах в лабораторном эксперименте полностью охватывал диапазон рабочих нагрузок боковой рамы и надрессорной балки в реальных условиях эксплуатации.

Приведем основные результаты лабораторных исследований.

1. Для всех исследуемых образцов №1, №2 и №3 было характерно несовпадение зависимости величины прогиба образца от прикладываемой силы (напряжения) при увеличении и уменьшении нагрузки. На рисунке 2 показана зависимость величины прогиба в прямом и обратном направлении для образца №1 (автосцепка). При небольших нагрузках (см. рисунок 2а) зависимости величины прогиба в прямом и обратном направлении практически совпадают, что соответствует линейной зависимости или выполнимости закон Гука. По мере увеличения нагрузки и перехода в область пластической деформации несовпадение зависимости величины прогиба образца от прикладываемой силы в прямом и обратном направлении возрастает (см. рисунок 2b, рисунок 2с и рисунок 2d).

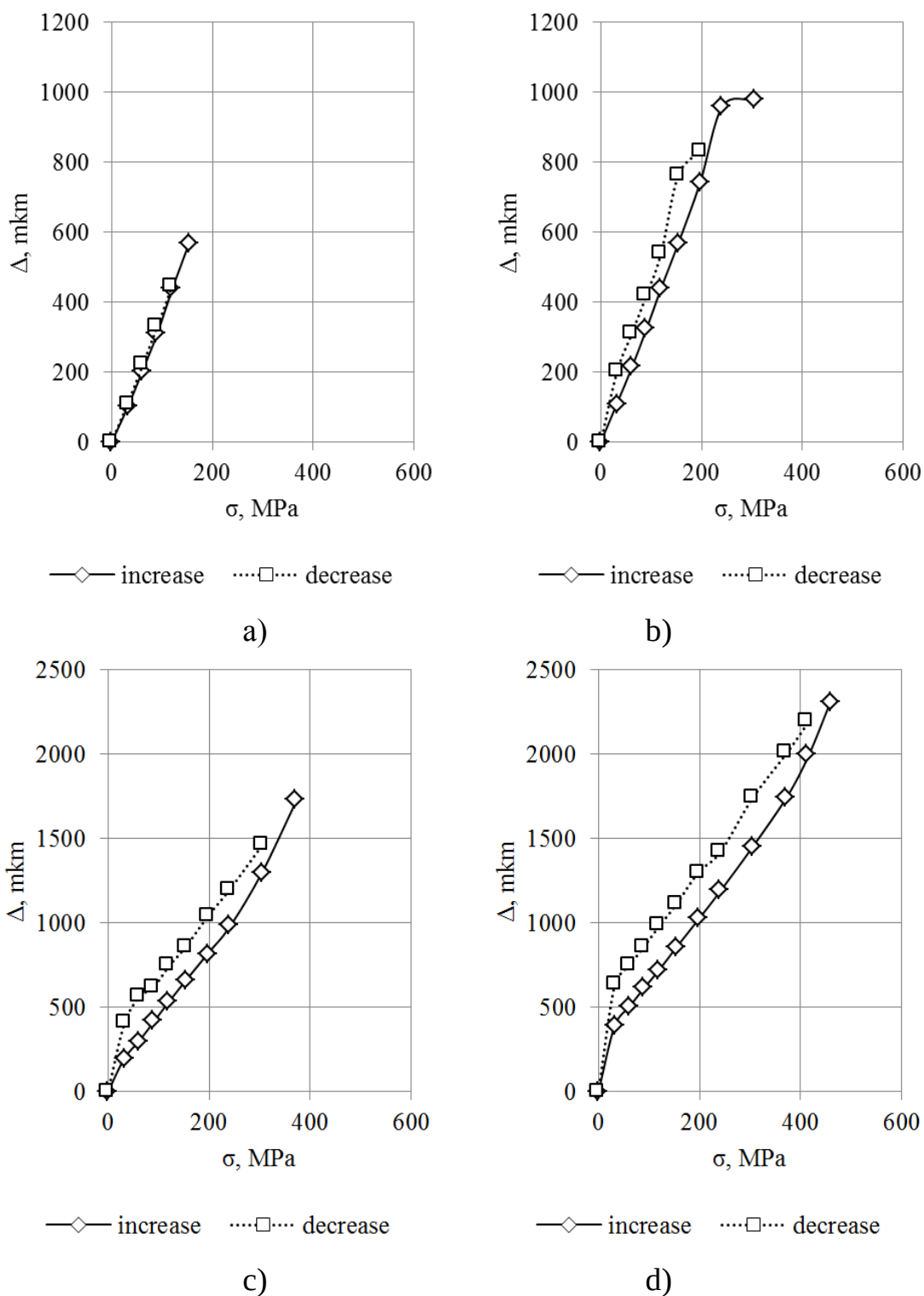


Рисунок 2 – Зависимость величины прогиба Δ при увеличении и уменьшении нагрузки для образца №1

Особый интерес вызывает появление остаточной деформации $\Delta_{\text{ост}}$ в этом же образце, показанная на рисунок 3. Образец не вынимался из установки, показания индикатора фиксировались относительно начального положения. Из рисунка 3а видно, что при линейной деформации образца, в зоне выполнения

закона Гука, остаточная деформация практически не наблюдалась. По мере увеличения прикладываемой силы (увеличения напряжения) величина остаточной деформации становится существенной (см. рисунок 3б, рисунок 3с и рисунок 3д).

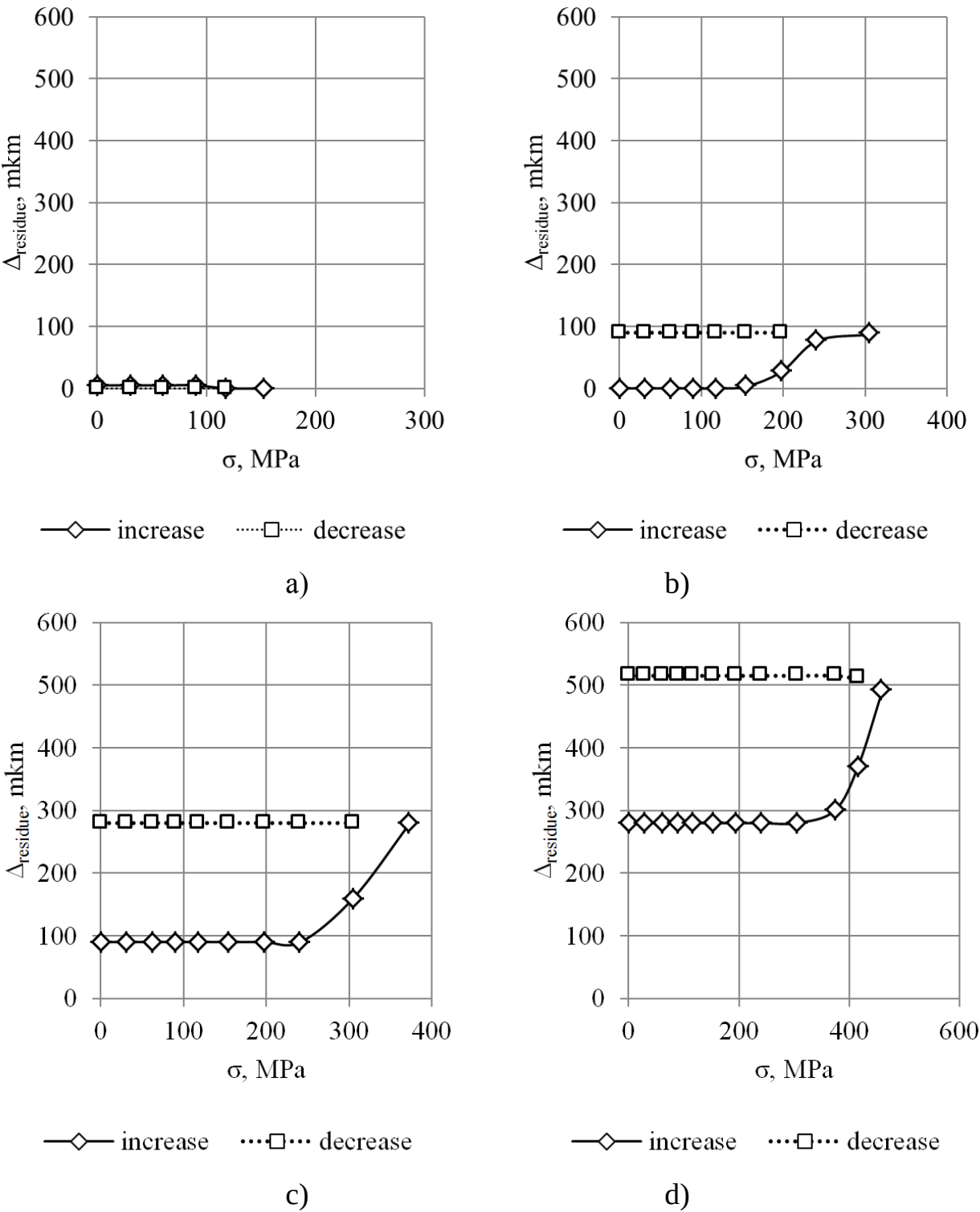


Рисунок 3 – Значение и динамика изменения остаточной деформации Δ_{residue} для образца №1

Подобные значения величины остаточной деформации были характерны для всех образцов, кроме образца №2 (рельс).

Анализируя графики, изображенные на рисунке 3, хорошо видно, что изменение остаточной деформации $\Delta_{\text{ост}}$ увеличивается при увеличении механического напряжения. Так, например, из рисунка 3b видно, что изменение остаточной деформации начинается примерно со 160 МПа. Из рисунка 3c и рисунка 3d эти же значения уже составляют примерно 240 и 320 МПа соответственно.

На рисунке 4 показана зависимость величины прогиба Δ и остаточной деформации $\Delta_{\text{ост}}$ для образца №2 (рельс).

Если для образца №1 (автосцепка) максимальная величина остаточной деформации составляла, примерно, 500 мкм (см. рисунок 3d), то для образца №2 (рельс), это значение составляло примерно 9 мкм (см. рисунок 4b). Такое отличие связано, по всей видимости, с более высокой твердостью рельсовой стали, обусловленной высокой долей углерода в этом образце: 0,761% против 0,215% (см. таблицу 1).

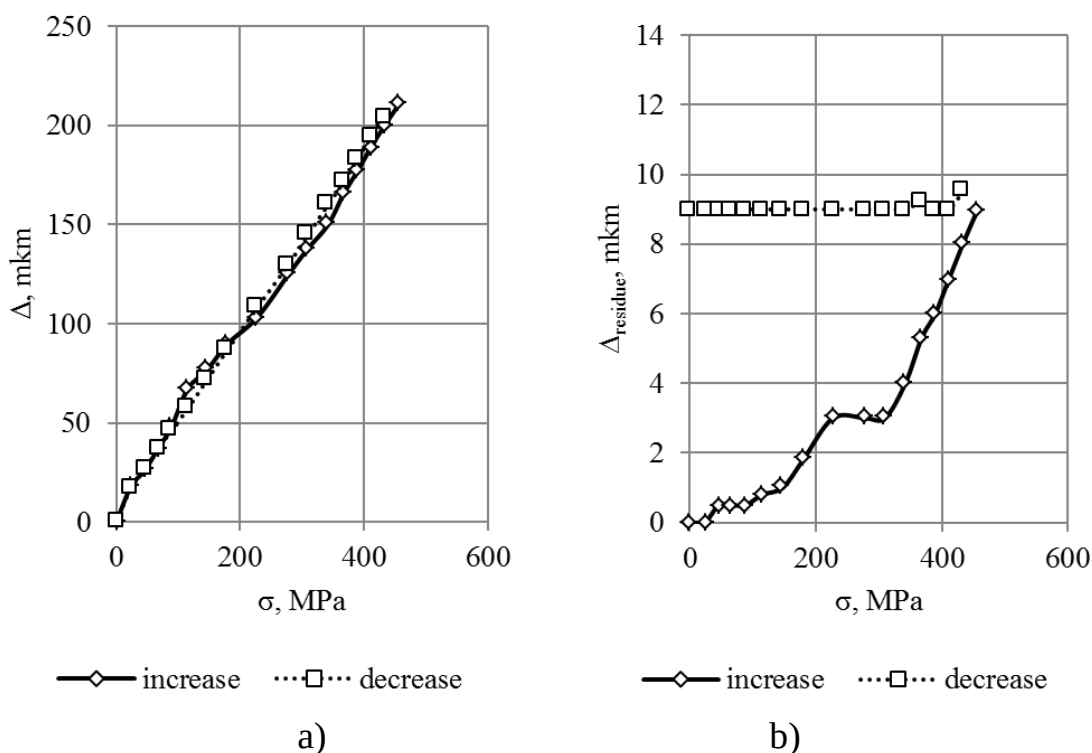


Рисунок 4 – Зависимость величины прогиба Δ и остаточной деформации Δ_{residue} для образца №2

Массовая доля углерода в сталях нелинейно связана с величиной прогиба Δ . Так, например, увеличение процентного содержания углерода

примерно в три раза приводит к тому, что величина прогиба Δ уменьшается примерно в десять раз: при напряжении 400 МПа прогиб для образца №1 (автосцепка) составляет примерно 2000 мкм (см. рисунок 2d), а для образца №2 (рельс), при том же напряжении – 200 мкм (см. рисунок 4а).

2. На рисунке 5 представлены средние значения удельного коэффициента ТЭДС α образцов, используемых в эксперименте. Обращает на себя внимание тот факт, что самое большое значение $\alpha = 17,4 \text{ мВ/К}$ соответствует образцу №1 (автосцепка), который предварительно был подвержен существенной упругопластической деформации. Следует отметить, что по предварительным данным, значение удельного коэффициента ТЭДС для этого образца составляло примерно 5 мВ/К. Значительное изменение удельного коэффициента ТЭДС (более чем в три раза) произошло после того как образец был подвергнут существенной упругопластической деформации.

У образца №2 (рельс), в котором остаточная деформация практически отсутствует, самое наименьшее значение удельного коэффициента ТЭДС $\alpha = 10,6 \text{ мВ/К}$. Среднее значение α вычислялось как среднее арифметическое между α_1 и α_2 , рассчитанными по формулам (1) и (2).

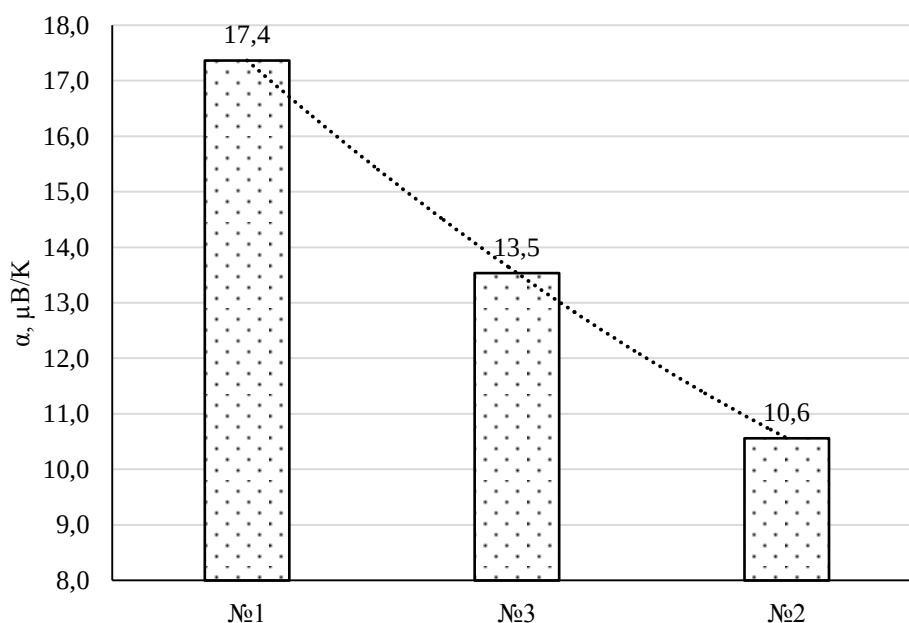


Рисунок 5 – Средние значения и динамика изменения удельного коэффициента ТЭДС различных образцов

3. По экспериментальным точкам при увеличении и уменьшении нагрузки рассчитывался модуль Юнга по формуле (3), косвенно характеризующий изменение структуры образцов в процессе деформации.

В ходе эксперимента, образцы были подвержены двум видам нагрузка: в первом случае, подвешивался груз, затем его снимали и подвешивали груз большей массы; во втором случае, к каждому грузу подвешивался дополнительный груз без снятия первого. Таким образом, в первом случае, нагрузка была прерывистая сначала нарастающая, а потом убывающая, а во втором случае, нагрузка практически плавно сначала увеличивалась, а потом уменьшалась. В некоторых случаях, образец переворачивался вдоль продольной оси на 180 градусов.

В ходе эксперимента было замечено, что в таких случаях угол наклона прямой на зависимости механическое напряжение от величины деформации увеличивался. На рисунке 6 показана зависимость механического напряжения σ в сечении крепления образца №1 (автосцепка) от величины прогиба Δ при увеличении и уменьшении нагрузки.

Линейно аппроксимируя экспериментальные данные, можно заметить, что тангенс угла наклона, косвенно характеризующий модуль Юнга, увеличился при этом примерно на 20%.

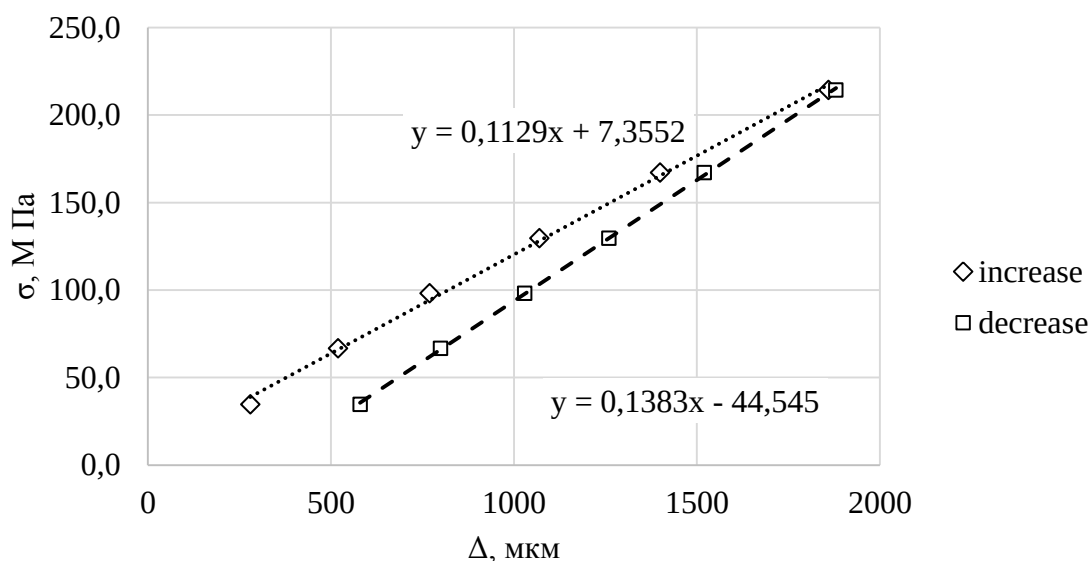


Рисунок 6 – Зависимость механического напряжения σ образца №1 от величины прогиба Δ при увеличении и уменьшении нагрузки

Полученные экспериментальные результаты показывают, что полученные различными способами увеличение удельного коэффициента ТЭДС и увеличение модуля Юнга говорит о наличии корреляции между этими величинами. А это, в свою очередь, может стать основой разработки нового, более эффективного способа определения остаточного ресурса узлов и деталей подвижного состава.

Список литературы

1. Матяш, Ю. И. Изменение физико-химических свойств стальных узлов и деталей железнодорожного транспорта как метод определения остаточного ресурса / Ю. И. Матяш, Ю. М. Сосновский, А. А. Ражковский, Е. М. Кондриков. – Текст : непосредственный // Омский научный вестник. – 2017. – №4 (154). – С. 9–13.
2. Петракова, А. Г. Повышение эксплуатационного ресурса цельнокатаных колес грузовых вагонов путем выбора рационального интервала их твердости : специальность 05.22.07 «Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация» : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Петракова Анна Геннадьевна ; Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2008. – 18 с. – Текст : непосредственный.
3. Матяш, Ю. И. Лабораторная установка для измерения электропроводности, термоЭДС и модуля Юнга стальных ферромагнитных образцов при упругом нагружении / Ю. И. Матяш, Е. М. Кондриков, Ю. М. Сосновский. – Текст : непосредственный // Приборы и методы измерений, контроля качества и диагностики в промышленности и на транспорте : материалы II всероссийской научно-технической конференции с международным участием / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2016. С.91–97.
4. Лукин, В. В. Расчет боковой рамы и надрессорной балки тележки грузового вагона методом конечных элементов / В. В. Лукин, А. О. Бельский. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2013. – 1(13). – С. 7–12.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Матяш Юрий Иванович

Омский государственный университет
путей сообщения (ОмГУПС).
Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046,
Российская Федерация.
Доктор технических наук, профессор
кафедры «Вагоны и вагонное хозяйство»
ОмГУПС.
Тел.: (3812) 31-06-72.
E-mail: vvh@omgups.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Yury Ivanovich Matias

Omsk State Transport University (OSTU).
35, Marx st., Omsk, 644046,
the Russian Federation.
Doctor of Technical Science, Professor of the
department “Cars and Cars Economy” OSTU.
Phone: (3812) 31-06-72.
E-mail: vvh@omgups.ru.

Сосновский Юрий Михайлович

Омский государственный университет
путей сообщения (ОмГУПС).
644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.
Кандидат физико-математических наук,
доцент кафедры «Физика и химия»
ОмГУПС.
Тел.: (3812) 31-53-68
E-mail: sosnovskyym@mail.ru

Yury Mikhailovich Sosnovsky

Omsk State Transport University (OSTU).
35, Marx st., Omsk, 644046,
the Russian Federation.
Ph.D in Physics and Mathematics Sciences,
Associate Professor of the department «Physics
and Chemistry» OSTU.
Phone: (3812) 31-53-68
E-mail: sosnovskyym@mail.ru

Кондрик Евгений Михайлович

Омский государственный университет
путей сообщения (ОмГУПС).
644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.
Старший преподаватель кафедры «Физика и
химия» ОмГУПС.
Тел.: (3812) 31-53-68.
E-mail: fh@omgups.ru.

Evgeny Mikhailovich Kondrikov

Omsk State Transport University (OSTU).
35, Marx st., Omsk, 644046,
the Russian Federation.
Senior teacher of department «Physic and
Chemistry» OSTU.
Phone: (3812) 31-53-68.
E-mail: fh@omgups.ru.

Муравьев Дмитрий Валерьевич

Омский государственный университет
путей сообщения (ОмГУПС).
644046, г. Омск, пр. Маркса, 35.
Кандидат технических наук, доцент, доцент
кафедры «Технологии транспортного
машиностроения и ремонта подвижного
состава» ОмГУПС.
Тел.: (3812) 31-18-11.
E-mail: mdvomsk@yandex.ru.

Muravev Dmitriy Valerevich

Omsk State Transport University (OSTU).
35, Marx st., Omsk, 644046,
the Russian Federation.
Candidate of technical sciences, associate
professor, associate professor of the department of
“Technology of transport mechanical engineering
and repair of a rolling stock” OSTU.
Phone: (3812) 31-18-11.
E-mail: mdvomsk@yandex.ru.

УДК 620.179.16

Л. Н. Степанова, А. Н. Курбатов, Е. С. Тенитлов

Сибирский государственный университет путей сообщения (СГУПС),
г. Новосибирск, Российская Федерация

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРОДОЛЬНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ, ВОЗНИКАЮЩИХ
ПРИ СЖАТИИ РЕЛЬСОВ БЕССТЫКОВОГО ПУТИ,
УЛЬТРАЗВУКОВЫМ МЕТОДОМ**

Определено влияние напряжения сжатия на изменение времени задержки продольных, поперечных и трансформированных волн. Осуществлены измерения сжимающих напряжений в стальном образце ультразвуковым методом, основанном на эффекте акустоупругости. Напряжения рассчитывались через измеренные временные параметры УЗ-волн. Отмечено сходство результатов тензометрических измерений с результатами расчета сжимающих напряжений, полученных ультразвуковым методом.

Ключевые слова: напряжение, ультразвук, акустоупругость, бесстыковой путь, рельс.

Ludmila N. Stepanova, Alexander N. Kurbatov, Evgeniy S. Tenitilov

Siberian Transport University (STU), Novosibirsk, the Russian Federation

DETERMINATION OF LONGITUDINAL STRESSES ARISING FROM COMPRESSION OF RAILS OF A JOINT-FREE TRACK BY ULTRASONIC METHOD

The influence of compression stress on the change in the delay time of longitudinal, transverse and transformed waves is determined. Compressive stresses in a steel sample were measured using an ultrasonic method based on the acoustoelasticity effect. The stresses were calculated using the measured time parameters of ultrasonic waves. The similarity of strain-gauge measurements with the results of calculating compressive stresses obtained by the ultrasonic method is noted.

Keywords: stress, ultrasound, acoustoelastic, continuous welded railroad, rail.

На российских железных дорогах широко применяется бесстыковой путь. При изменении температуры окружающей среды в плетях такого железнодорожного пути возникают значительные продольные напряжения. В зимний период при низких температурах в рельсах появляются растягивающие, а в летний период – сжимающие напряжения. Нарушение технологии укладки, содержания и ремонта пути, а также увеличение скорости и грузонапряженности приводит к изменению напряженно-деформированного состояния рельсов. В летний период, от сжимающих напряжений, возникающих в рельсах при высоких температурах, может произойти выброс железнодорожного пути. Поэтому для обеспечения безопасности движения поездов проводится периодический контроль напряжений в рельсах.

Цель работы – контроль сжимающих напряжений в протяженных металлоконструкциях ультразвуковым методом, основанным на эффекте акустоупругости.

Для бесстыкового пути температурное напряжение σ_t , возникающее в рельсе в связи с несостоявшимся изменением его длины при изменении температуры, определяются по формуле [1]:

$$\sigma_t = \alpha \cdot E \cdot \Delta T \approx 2,5 \cdot \Delta T, \quad (1)$$

где α – коэффициент линейного расширения рельсовой стали ($\alpha = 1,18 \cdot 10^{-5}$ град $^{-1}$);

E – модуль упругости рельсовой стали ($E = 2,1 \cdot 10^5$ МПа);

ΔT – разность между температурой, при которой определяется напряжение в рельсе, и температурой закрепления рельсовой плети на шпалах, °С.

В свою очередь, разность температур ΔT определяется по формуле:

$$\Delta T = T_p - T_z,$$

где T_p – температура рельса, при которой определяется продольное напряжение, °С;

T_z – температура закрепления рельсовой плети на шпалах, °С.

Из формулы (1) следует, что при превышении в рельсе температуры закрепления рельса на 10°С, напряжение σ_t в нем изменится на 25 МПа и в закрепленном рельсе возникнут сжимающие напряжения.

В [2] описан акустоупругий эффект, который основан на влиянии механического напряжения на скорость распространения ультразвуковых (УЗ) волн. Влияние механического напряжения на скорости распространения продольной и поперечной волн, излученных под углом к направлению приложенного напряжения, можно определить как:

- для скорости распространения продольной волны C_L :

$$C_L = C_{L_0} (1 + \beta_L \sigma \sin \alpha_L), \quad (2)$$

где C_{L_0} – скорость распространения продольной волны в ненагруженном рельсе;

β_L – акустоупругий коэффициент для продольной волны;

α_L – угол ввода продольной волны;

- для скорости распространения поперечной волны C_T :

$$C_T = C_{T_0} (1 + \beta_T \sigma \cos \alpha_T), \quad (3)$$

где C_{T_0} – скорость распространения поперечной волны в ненагруженном рельсе;

β_T – акустоупругий коэффициент для поперечной волны;

α_T – угол ввода поперечной волны.

В Сибирском государственном университете путей сообщения (СГУПС) были проведены исследования влияния продольных напряжений, возникающих в стальном образце, при приложении к нему сжимающей нагрузки по его длине. Нагрузки контролировались тензометрическим и УЗ методами.

Тензометрия стального образца в форме параллелепипеда с размерами 420x80x70 мм проводилась для измерения деформации сжатия с одновременным измерением времени прохождения УЗ сигнала. Нагрузка прикладывалась 250-тонным прессом (рисунок 1).

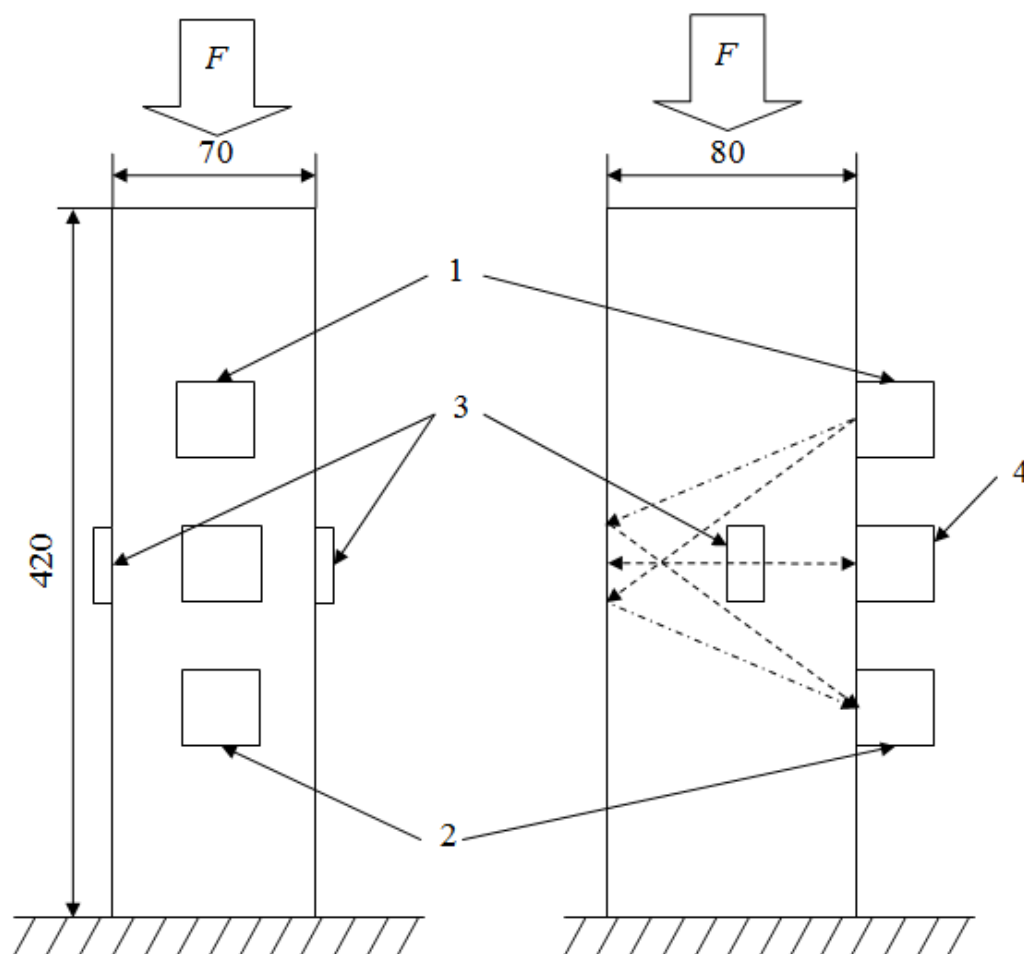


Рисунок 1 – Схема расположения пьезоэлектрических преобразователей (1, 2 и 4), тензорезисторов (3) на нагружаемом стальном бруске и направление распространения продольных (----->) и поперечных (----->) УЗ волн в нем

Микропроцессорная многоканальная тензометрическая система ММТС-64.01 производства ФГУП «СибНИА им. С.А. Чаплыгина» (свидетельство об утверждении типа RU.C. 34.007.A № 44412), осуществляла измерение статических деформаций с погрешностью 0,2 %. На стальной образец были

наклеены проволочные тензодатчики типа ПКС-12 производства СибНИА (свидетельство об утверждении типа RU.C.28. 007.A № 30935) сопротивлением $R=120$ Ом, базой 12 мм и коэффициентом тензочувствительности $K=2,12$.

Были проведены исследования влияния напряжения сжатия на изменение времени задержки УЗ-волн в стальном образце. Отличительной особенностью этой работы является то, что УЗ-волны распространялись в объекте контроля не вдоль или поперек направления приложенной силы, а под некоторым углом к ней. Этот угол выбирался таким образом, чтобы было можно одним наклонным пьезоэлектрическим преобразователем (ПЭП) 1 возбуждать в объекте контроля одновременно продольные L и поперечные T волны, которые доходя до противоположной грани объекта контроля, отражались и трансформировались из продольных L в поперечные T и наоборот из поперечных T в продольные L волны (рисунок 1).

В эксперименте изучалось влияние продольных сжимающих напряжений, создаваемых в объекте контроля внешней нагрузкой, на задержку времени распространения УЗ волн. Сигналы отраженных продольных L , поперечных T и трансформированных LT волн принимались вторым наклонным ПЭП 2 с таким же углом ввода, что и излучающего ПЭП 1. При этом они находились на одной контролируемой поверхности образца. Угол ввода ПЭП составлял 18° , рабочая частота 2,5 МГц. Их акустические оси были направлены на встречу друг другу. Преобразователи располагались посередине на одной оси объекта контроля, как показано на рисунке 1.

Кроме этого на противоположных боковых гранях стального образца в средней его части были наклеены вдоль прикладываемой одноосной нагрузки два тензодатчика 3. Они измеряли деформацию стального образца при создании прессом сжимающей силы F . Между наклонными ПЭП 1 и ПЭП 2 располагался прямой раздельно-совмещенный (РС) ПЭП 4 с углом ввода 0° и рабочей частотой 2,5 МГц, который возбуждал продольную УЗ-волну, распространяющуюся перпендикулярно прикладываемой нагрузке [3,4].

На рисунке 2 показана зависимость изменения времени задержки Δt для различных УЗ волн, распространяющихся в нагружаемом стальном объекте. Из зависимостей видно, что L -волна и T -волна находятся под воздействием растягивающих напряжений, а LT -волна – сжимающих. Следует отметить, что растягивающие напряжения сильнее изменяют время задержки T -волны, чем L -волны. На схеме нагружения стального образца (рисунок 1) было показано,

что

L -волна излучалась в стальной образец перпендикулярно направлению приложенной сжимающей силы. Она распространялась вдоль растягивающего напряжения, возникающего в поперечной плоскости относительно сжимающего напряжения, прикладываемого нагружающей машиной. Это подтверждается зависимостью изменения времени задержки L -волны от приложенного напряжения сжатия (рисунок 2).

При этом T -волна возбуждалась наклонным ПЭП 1 в плоскости, поперечной направлению сжимающих напряжений. На рисунке 2 изменение времени задержки T -волны увеличивается с увеличением напряжения сжатия, а изменение времени задержки трансформированных LT -волн уменьшается с увеличением сжимающего напряжения. Это позволяет осуществлять контроль возникающих сжимающих продольных напряжений в стальном образце.

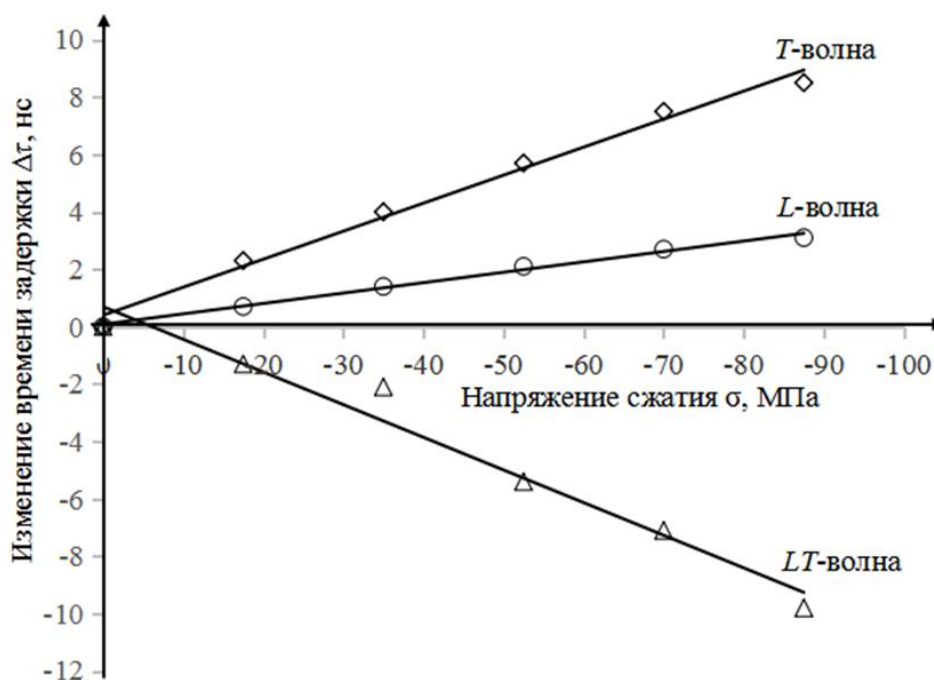


Рисунок 2 – Зависимость изменения времени задержки УЗ-волн от приложенного напряжения сжатия

Расчет продольных напряжений в стальном образце осуществлялся через измеряемые временные параметры УЗ-волн. Для этого использовались продольные L и трансформированные LT волны. По задержке времени распространения сигналов от продольных и трансформированных волн в ненагруженном и в нагруженном стальном образце определялось действующее продольное напряжение σ [3]:

$$\sigma = \frac{\frac{(\tau^{LT} - \Delta\tau_0^{LT})}{(\tau^L - \Delta\tau_0^L)} - \frac{\tau_0^{LT}}{\tau_0^L}}{\beta}, \quad (4)$$

где τ_0^L , τ^L - времена распространения сигнала продольной волны в ненагруженном и нагруженном стальном образце, нс;

τ_0^{LT} , τ^{LT} - времена распространения трансформированной волны от излучателя к приемнику в ненагруженном и нагруженном стальном образце, нс;

$\Delta\tau_0^L$ - разность времен распространения сигнала продольной волны на ненагруженном стальном образце, нс;

$\Delta\tau_0^{LT}$ - разность времен распространения трансформированной волны от излучателя к приемнику на ненагруженном стальном образце, нс;

β - акустоупругий коэффициент, МПа⁻¹.

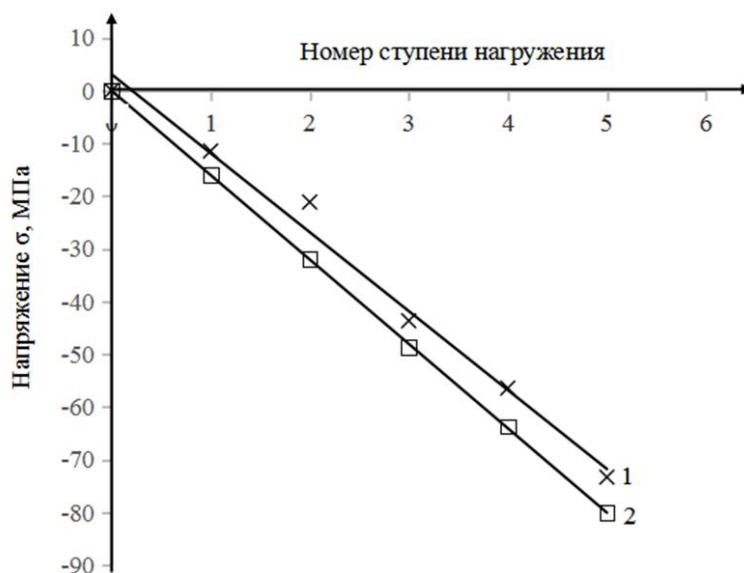


Рисунок 3 – Напряжение, измеренное в объекте контроля, акустическим (1) и тензометрическим (2) способами

При этом акустоупругий коэффициент β для данного образца определялся экспериментально.

На рисунке 3 – приведены зависимости полученных напряжений в стальном образце от ступени нагружения. Для определения напряжений использовали УЗ метод, основанный на эффекте акустоупругости (линия 1) и тензометрический метод контроля (линия 2). Как видно из рисунка 3, наблюдается сходимость результатов измерения сжимающего напряжения этими методами.

Выводы:

1. Разработана схема расположения пьезоэлектрических преобразователей на объекте для контроля сжимающих напряжений УЗ методом, основанном на эффекте акустоупругости. Предложенная методика определения сжимающих напряжений осуществляет контроль по всему прозвучиваемому объему контролируемого участка стального образца.

2. Определено влияние напряжения сжатия на изменение времени задержки импульсов, поступающих на принимающий пьезоэлектрический преобразователь продольных, поперечных и трансформированных волн. Выявлено, что при использовании разработанной схемы расположения пьезоэлектрических преобразователей на объекте контроля сжимающие напряжения слабо влияют на изменение времени задержки продольной волны. При этом изменение времени задержки трансформированных волн уменьшается с увеличением сжимающих напряжений. Это позволяет осуществлять контроль сжимающих напряжений с помощью этих волн.

3. С использованием эффекта акустоупругости осуществлены измерения сжимающих напряжений в стальном образце с размерами 420×80×70 мм. Расчет напряжений проводился через измерения временных параметров УЗ волн и тензометрическим способом. Отмечено сходство тензометрических измерений с результатами расчета сжимающих напряжений, полученных УЗ методом, в котором использовались временные параметры УЗ волн и эффект акустоупругости.

Список литературы

1. Инструкция по устройству, укладке, содержанию и ремонту бесстыкового пути : утверждена распоряжением ОАО «РЖД» № 2788р от 29.12.2012. – Москва : ОАО «РЖД», 2012. – Текст : непосредственный.

2. Никитина, Н. Е. Акустоупругость. Опыт практического применения / Н. Е. Никитина. – Новгород: ТАЛАН, 2005. –208 с. – Текст : непосредственный.

3. Патент № 2619842 Российская Федерация, МПК G 01 N 29/07. Ультразвуковой способ определения механических напряжений в рельсах : № 2016116198 : заявлено 25.04.2016 : опубликовано 18.05.2017 / Степанова Л. Н., Курбатов А. Н., Тенитилов Е. С.; патентообладатель Сибирский государственный университет путей сообщения. – 12 с. : ил. – Текст : непосредственный.

4. Патент 2723148 Российская Федерация, МПК G 01 N 29/04. Ультразвуковой способ определения механических напряжений в рельсах : № 2019134354 : заявлено 25.10.2019 : опубликовано 09.06.2020 / Степанова Л. Н., Курбатов А. Н. ; патентообладатель Сибирский государственный университет путей сообщения. – 13 с. : ил. – Текст : непосредственный.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Степанова Людмила Николаевна

Сибирский государственный университет
путей сообщения (СГУПС)

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

Доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой «Электротехника,
диагностика и сертификация» СГУПС.

Тел.: +7 (383) 328-05-59.

E-mail: stepanova@stu.ru.

Курбатов Александр Николаевич

Сибирский государственный университет
путей сообщения (СГУПС)

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

Старший преподаватель кафедры
«Электротехника, диагностика и
сертификация» СГУПС.

Тел.: +7 (383) 328-05-43.

E-mail: kant@stu.ru.

Тенитилов Евгений Сергеевич

Сибирский государственный университет
путей сообщения (СГУПС)

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

Кандидат технических наук, доцент
кафедры «Электротехника, диагностика и
сертификация» СГУПС.

Тел.: +7 (383) 328-05-43.

E-mail: evgentnt@mail.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Stepanova Ludmila Nikolaevna

Siberian Transport University (STU).

191, D.Kovalchuk street, Novosibirsk,
630049, the Russian Federation.

Doctor of Technical Science, Professor,
head of the department «Electrical Engineering,
diagnostic and certification» (STU).

Phone: +7 (383) 328-05-59.

E-mail: stepanova@stu.ru.

Kurbatov Alexander Nikolaevich

Siberian Transport University (STU).

191, D.Kovalchuk street, Novosibirsk,
630049, the Russian Federation.

Assistant professor department
«Electrical Engineering, diagnostic
and certification» (STU).

Phone: +7 (383) 328-05-43.

E-mail: kant@stu.ru.

Tenitilov Evgeniy Sergeevich

Siberian Transport University (STU).

191, D.Kovalchuk street, Novosibirsk,
630049, the Russian Federation.

Associated professor of department
«Electrical Engineering, diagnostic
and certification» (STU).

Phone: +7 (383) 328-05-43.

E-mail: evgentnt@mail.ru.

А. Н. Сташков, Е. А. Шапова, А. П. Ничипурук

Институт физики металлов имени М. Н. Михеева Уральского отделения РАН
(ИФМ УрО РАН), г. Екатеринбург, Россия

ОСОБЕННОСТИ ПОВЕДЕНИЯ ПОЛЕВЫХ ЗАВИСИМОСТЕЙ ОБРАТИМОЙ МАГНИТНОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ УПРУГО- И ПЛАСТИЧЕСКИ ДЕФОРМИРОВАННОЙ МАЛОУГЛЕРОДИСТОЙ ФЕРРИТО-ПЕРЛИТНОЙ СТАЛИ

На пластически-деформированных образцах из малоуглеродистой стали Ст3 были измерены полевые зависимости сигнала индукционного преобразователя $U \sim (H)$. Установлено, что при приложении дополнительной упругой сжимающей нагрузки к предварительно пластически-деформированным образцам максимумы на кривых $U \sim (H)$ смещаются в область больших полей. Определены нагрузки для образцов из стали Ст3 с разной степенью удлинений, при которых на кривых $U \sim (H)$ вместо двух максимумов становятся отчетливо различимы три максимума. На кривой с двумя максимумами третий всегда есть, но он сливается с левым максимумом. Для определения полей всех трех максимумов проведена математическая обработка с помощью функций псевдо-Фойгта. Рассчитаны остаточные и приложенные напряжения сжатия. Расхождение рассчитанных механических напряжений с приложенными в диапазоне 60 МПа и более составило менее 10%.

Ключевые слова: низкоуглеродистая сталь, пластическая и упругая деформация, остаточные механические напряжения, перемангничивание, индукционный преобразователь, 90- и 180-градусные смещения доменных границ, максимумы на полевой зависимости сигнала индукционного преобразователя, аппроксимация.

Alexey N. Stashkov, Elizaveta A. Schapova, Alexander P. Nichipuruk

M.N. Mikheev Institute of Metal Physics of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences
(IMP UB RAS), Ekaterinburg, the Russian Federation

PECULIARITIES OF THE BEHAVIOR OF THE FIELD DEPENDENCES OF THE REVERSIBLE MAGNETIC PERMEABILITY OF THE ELASTIC AND PLASTIC DEFORMED LOW-CARBON FERRITE-PERLITIC STEEL

The field dependences of the signal of the induction transducer $U \sim (H)$ were measured on plastically deformed specimens of low-carbon steel St3. It was found that an additional elastic

compressive load to the pre-deformed samples led to shifting of maxima on the $U \sim (H)$ curves to the high fields region. The loads were determined for specimens of steel St3 with different degrees of elongation, at which three maxima become distinctly distinguishable on the $U \sim (H)$ curves. On the curve with two maxima, the third has always been, but it merges with the left maximum. To determine the fields of all three maxima, fitting procedure was carried out using pseudo-Voigt functions. Residual and applied compressive stresses were calculated. The discrepancy between the calculated stresses and those applied in the range of 60 MPa and more was less than 10%.

Keywords: low-carbon steel, plastic and elastic deformation, residual stresses, magnetization reversal, induction transducer, 90- and 180-degree domain walls, maxima on the field dependence of the inductive transducer signal, pseudo-Voigt functions.

На сегодняшний день в России и мире многими исследователями решается задача создания методик контроля остаточных механических напряжений в стальных конструкциях и деталях. С точки зрения практического применения наиболее интересны неразрушающие методики, в частности, магнитные. Нами была предложена и развивается магнитометрическая методика контроля [1]. Ее особенность состоит в отсутствии необходимости проведения предварительной калибровки применяемой магнитометрической аппаратуры на образцах из той марки стали, на которой предполагается проводить контроль. Методика была опробована в лабораторных условиях на образцах из малоуглеродистой стали Ст3. Несмотря на свою перспективность, методика нуждается в дальнейшем усовершенствовании и формулировке области ее применимости. Целью данной работы являлось определение условий экспериментального наблюдения трех максимумов на полевых зависимостях сигнала индукционного преобразователя, измеренных на образцах пластически-деформированной малоуглеродистой стали Ст3, а также расчета механических напряжений по магнитным параметрам.

Образцы и методика измерений.

Экспериментальные исследования проводили на образцах из малоуглеродистой стали Ст3 длиной 267 мм и с поперечным сечением $2 \times 3 \text{ мм}^2$, которые после отжига в вакууме при 650°C в течение двух часов и медленного остывания с печью были пластически деформированы на $\epsilon_{\text{пл}} = 0.5, 1.3$ и 3.9% .

Схема экспериментальной установки для приложения к испытуемым образцам механических напряжений и одновременного измерения полевых зависимостей сигнала индукционного преобразователя $U \sim (H)$ описана в [1]. На

центральной части испытуемого образца размещался индукционный преобразователь, состоящий из двух катушек на едином каркасе: измерительной с числом витков 900 и возбуждающей с числом витков 450. В обмотку возбуждающей катушки подавался переменный ток 14 мА с частотой 30 Гц. Сигнал с измерительной катушки подавался на Lock-in-amplifier Stanford Research SR830 и детектировался на частоте тока в возбуждающей катушке. Образец с индукционным преобразователем размещался в соленоиде. Перемагничивание образцов проводилось по предельной петле гистерезиса при частоте изменения поля $5 \cdot 10^{-3}$ Гц. Максимальное магнитное поле в соленоиде составляло ± 135 А/см.

Концы образцов закреплялись в захватах машины для механических испытаний для создания упругих сжимающих напряжений σ во время магнитных измерений. Измерения полевых зависимостей $U^{\sim}(H)$ проводили до приложения нагрузки, а также во время приложения к образцу одноосной сжимающей нагрузки. Для того, чтобы образец не потерял устойчивость и не изогнулся, предварительно он был помещен в оправку из неферромагнитного материала.

Результаты и их обсуждение.

В работе [2] нами было показано, что на кривых $U^{\sim}(H)$, измеренных на отожженных недеформированных образцах из малоуглеродистой стали Ст3, наблюдался один максимум в районе коэрцитивной силы. После пластической деформации в разгруженном состоянии на кривых $U^{\sim}(H)$ появлялся второй максимум в положительном поле, если перемагничивание проводилось из $+H_{\max}$ до $-H_{\max}$. Причем, чем больше степень пластической деформации, тем дальше друг от друга находятся максимумы (рисунок 1). Причиной появления второго максимума на кривой $U^{\sim}(H)$, как указывалось в работе [2], являются остаточные сжимающие напряжения 1-го рода, которые приводят к появлению магнитной текстуры типа «легкая плоскость». В работе [3] при несколько отличной схеме эксперимента на пластически деформированных проволоках из малоуглеродистой стали нам удалось получить кривые с тремя максимумами. Поэтому возник вопрос, касающийся условий экспериментального наблюдения трех максимумов на кривых $U^{\sim}(H)$, измеренных на пластически деформированных образцах.

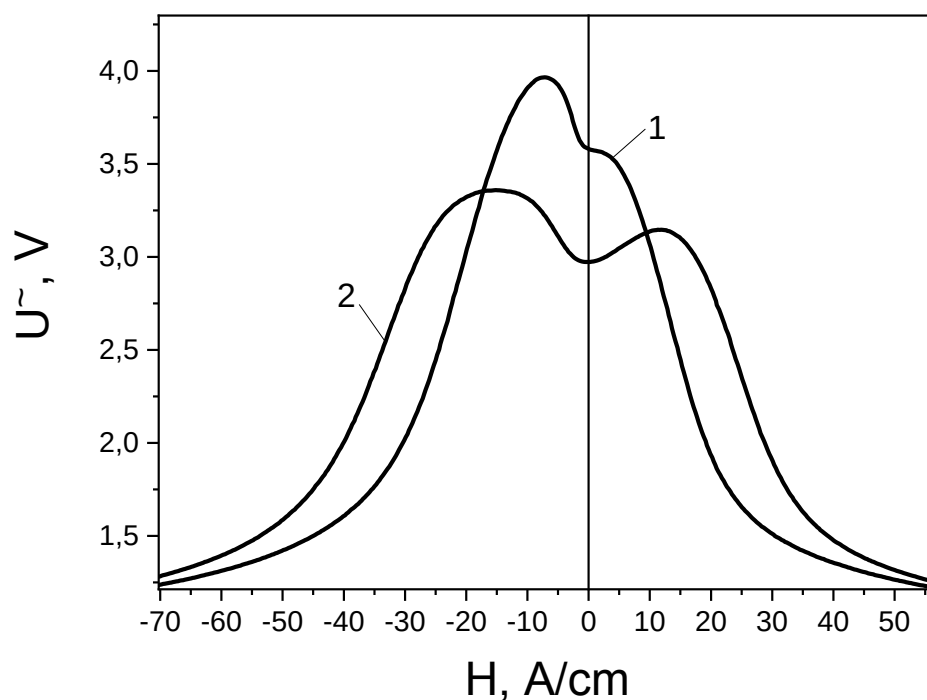


Рисунок 1 – Полевые зависимости сигнала индукционного преобразователя $\tilde{U}(H)$ пластически-деформированных образцов из малоуглеродистой стали Ст3: 1 – относительная деформация 0.5%; 2 – относительная деформация 3.9%

На рисунке 2 изображены полевые зависимости $\tilde{U}(H)$ для образца малоуглеродистой стали Ст3 с относительным удлинением 0,5% без приложенной внешней нагрузки и при действии сжимающих нагрузок различной величины. Из рисунка 2 видно, что кривая $\tilde{U}(H)$, измеренная на образце, не подверженному действию внешней нагрузки, имеет максимум в отрицательном и перегиб в положительном магнитном поле. При приложении к образцу сжимающих напряжений 33 МПа в положительном поле вместо перегиба появляется отчетливый максимум, а максимум в отрицательном поле сдвигается влево. При увеличении сжимающих напряжений до 83 МПа на кривой $\tilde{U}(H)$ между левым и правым максимумами появляется перегиб, а при напряжениях 131 МПа на кривой $\tilde{U}(H)$ можно наблюдать три отчетливых максимума. Эти максимумы соответствуют смещению разного типа доменных границ: в полях левого и правого максимума преимущественно смещаются 90-градусные доменные границы, а в поле среднего максимума – 180-градусные. Такую интерпретацию мы давали и в своих более ранних работах [2-4], однако в одном эксперименте нам не удавалось найти условие появления среднего

максимума на полевых зависимостях дифференциальной проницаемости или сигнала индукционного преобразователя, пропорционального обратимой магнитной проницаемости. На основании данных, представленных на рисунке 2, можно предположить, что средний максимум на кривой $\tilde{U}(H)$, полученной на образце без приложения внешней нагрузки, сливается с левым максимумом и не виден. При этом, на положение левого максимума оказывают влияние смещение доменных границ двух типов – 90- и 180-градусных. Для правильного определения положения левого максимума в этом случае требуется проводить аппроксимацию исходной кривой и разложение ее на три кривые с единственными максимумами, например, при помощи функций псевдо-Фойгта [5].

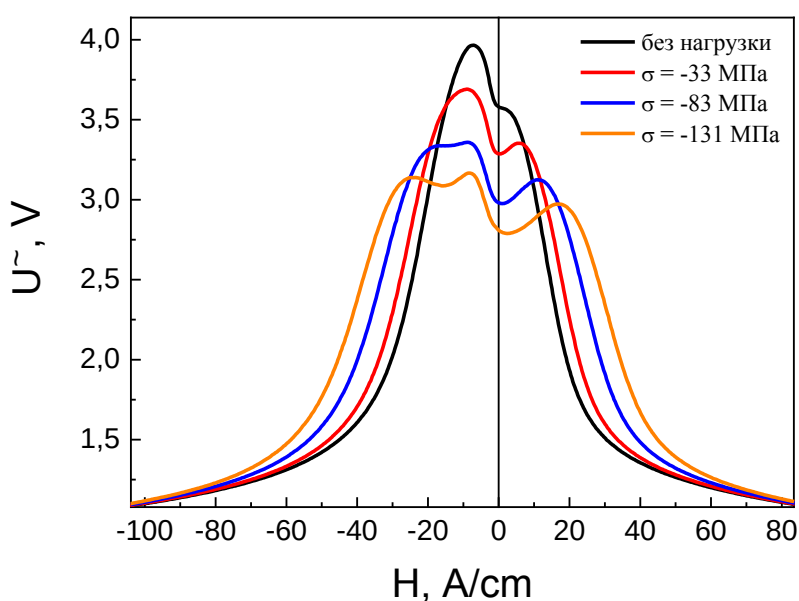


Рисунок 2 – Полевые зависимости сигнала индукционного преобразователя $\tilde{U}(H)$ образца из малоуглеродистой стали Ст3 с относительной деформацией 0.5% без внешней нагрузки и при действии сжимающих нагрузок

Результат аппроксимации исходной кривой $\tilde{U}(H)$ для образца с $\varepsilon=0.5\%$ без действия внешней нагрузки графически представлен на рисунке 3. В результате аппроксимации были определены поля H_1 и H_2 кривых 1 и 2 с одиночными максимумами. Поля H_1 и H_2 соответствуют полям левого и правого максимума экспериментальной кривой $\tilde{U}(H)$. Из рисунка 3 видно, что суммарная кривая одиночных пиков разложения 4 и исходная кривая $\tilde{U}(H)$ практически совпадают.

Аналогичная аппроксимация была проведена для кривых $U \sim (H)$, полученных для образца с $\varepsilon=0.5\%$ при действии упругих сжимающих нагрузок (напряжений), а также для образцов с относительными удлинениями 1,35 и 3,9%.

Результаты нахождения полей левого H_1 и правого H_2 максимумов, а также рассчитанные значения механических напряжений $\sigma_{\text{расч}}$ и относительной погрешности для образца с $\varepsilon=0.5\%$ приведены в таблице 1.

Формула для расчета механических напряжений $\sigma_{\text{расч}}$ была предложена в работе [6]:

$$\sigma_i = \frac{2}{3} \cdot \frac{H_\sigma \cdot M_s}{\lambda_{100}}, \quad (1)$$

где M_s – намагниченность насыщения,

λ_{100} – константа магнитострикции вдоль кристаллографического направления (100),

H_σ – магнитное поле, равное среднему арифметическому от абсолютных величин полей левого H_1 и правого H_2 максимумов.

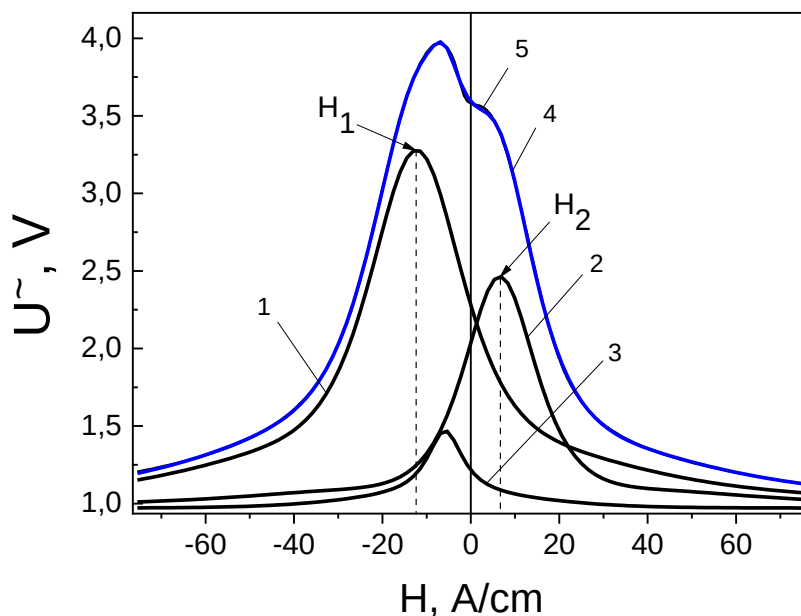


Рисунок 3 – Зависимость $U \sim (H)$ образца Ст3 с $\varepsilon=0.5\%$ без приложенной нагрузки и результат аппроксимации функциями псевдо-Фойгта:

1,2,3 – одиночные пики разложения; 4 – сумма пиков 1,2 и 3;

5 – экспериментальная кривая $U \sim (H)$

Так как в пластически-деформированных образцах имеются остаточные напряжения сжатия, то приложенные упругие сжимающие напряжения σ будут суммироваться с остаточными. В результат определения полей максимумов H_1

и H_2 будут вносить вклад как остаточные, так и действующие на образец напряжения (таблица 1). Поэтому для пластически-деформированного образца без приложения к нему внешней нагрузки ($\sigma=0$) величина $\sigma_{\text{расч}} \neq 0$. Для того, чтобы сравнить величины приложенных и расчетных напряжений, были рассчитаны величины $\Delta\sigma_{\text{расч}}$ как разность между расчетными напряжениями для каждого приложенного σ и $\sigma_{\text{расч}}$ при $\sigma=0$.

Таблица 1

Результаты определения магнитных полей и механических напряжений для образца с $\varepsilon=0.5\%$.

σ , МПа	H_1 , А/см	H_2 , А/см	$H_{\text{ср}}$, А/см	$\sigma_{\text{расч}}$, МПа	$\Delta\sigma_{\text{расч}}$, МПа	Относит. погрешность, %
0	-12,3	6,6	9,4	85	-	-
33	-14,9	9	11,9	107	23	31,8
66	-19,7	11,8	15,8	142	58	12,3
99	-25	16,5	20,8	187	103	-4,2
115	-27,1	18,4	22,8	205	121	-4,9
131	-28,2	18,6	23,4	211	126	4,1

Из таблицы 1 следует, что относительная погрешность определения расчетного значения $\sigma_{\text{расч}}$ уменьшается при увеличении σ . При $\sigma \geq 100$ МПа относительная погрешность составила менее 5%. Максимальные приложенные напряжения σ составили 131 МПа. При больших сжимающих σ образец мог потерять устойчивость и разрушиться. При $\sigma=0$ величина остаточных сжимающих напряжений $\sigma_{\text{расч}}$ составила 85 МПа. Как и ожидалось, для образцов с $\varepsilon=1,35\%$ и $\varepsilon=3,9\%$ рассчитанные значения сжимающих напряжений получились больше, чем для образца с $\varepsilon=0.5\%$.

Установлено, что условием визуального наблюдения среднего максимума на экспериментальной кривой $U \sim (H)$, соответствующего необратимому смещению 180-градусных доменных границ, является наличие в образце суммарного напряжения сжатия более 200 МПа. Такое остаточное напряжение далеко не всегда достижимо на практике, поэтому на экспериментальных кривых $U \sim (H)$, как правило, наблюдаются 2 максимума. Максимум в положительном поле связан со смещением 90-градусных доменных границ, а максимум в отрицательном поле является суммой двух близко расположенных максимумов, связанных со смещением 90- и 180-градусных доменных границ. Чтобы разделить вклад в процессы намагничивания от смещения двух типов доменных границ и найти поле максимума, соответствующего смещению 90-

градусных доменных границ, необходимо математически обработать экспериментальные кривые $U^{\sim}(H)$. Только определив поля максимумов, соответствующих смещению 90-градусных доменных границ, возможно определить величину остаточных механических напряжений.

Заключение.

Установлено, что при приложении дополнительной упругой сжимающей нагрузки к предварительно пластически-деформированным образцам из малоуглеродистой стали Ст3 максимумы на кривых $U^{\sim}(H)$ смещаются в область больших полей. Определены напряжения для образцов из стали Ст3 с разной степенью удлинений, при которых на кривых $U^{\sim}(H)$ вместо двух максимумов становятся отчетливо различимы три максимума, два крайних из которых связаны с необратимым смещением 90-градусных доменных границ. По всей вероятности, на исходных кривых $U^{\sim}(H)$ с двумя видимыми максимумами третий максимум не виден за счет его близкого расположения к левому максимуму в отрицательном поле. Для определения положений всех трех максимумов на кривых $U^{\sim}(H)$ проведена математическая обработка экспериментальных данных с помощью полиномиальных функций. Определены поля максимумов на кривой $U^{\sim}(H)$, в которых преимущественно происходят смещения 90-градусных доменных границ. Рассчитаны остаточные и приложенные напряжения сжатия. Расхождение рассчитанных механических напряжений с приложенными в диапазоне 60 МПа и более для образцов с разным относительным удлинением составило менее 10%.

Работа выполнена в рамках государственного задания МИНОБРНАУКИ России (тема «Диагностика», №АААА-А18-118020690196-3) при финансовой поддержке РФФИ (проект №20-58-00015 Бел_а).

Список литературы

1. Stashkov, A Magnetic non-destructive testing of residual stresses in low carbon steels / A. Stashkov, A. Nichipuruk, V. Kuleev, E. Schapova. – Text: direct // J. Phys.: Conf. Ser. – 2019. – Vol. 1389. – PP. 012032.
2. Stashkov, A. N. Studying Field Dependence of Reversible Magnetic Permeability in Plastically Deformed Low-Carbon Steels / A. N. Stashkov, V. G. Kuleev, E. A. Schapova, A. P. Nichipuruk. – Text: direct // Russian Journal of Nondestructive Testing. – 2019. – Vol. 54. – PP. 855–860.
3. An experimental method for evaluating the critical fields of moving domain boundaries in plastically tension-deformed low-carbon wires / A. P.

Nichipuruk, E. V. Rozenfel'd, M. S. Ogneva [et al.]. – Text: direct // Russian Journal of Nondestructive Testing. – 2014. – №10. – PP. 18–26.

4. A Procedure and Device for Calibration-Free Determination of Residual Compression Stresses in Low-Carbon Steels Deformed by Tension / A. P. Nichipuruk, A. N. Stashkov, V. G. Kuleev [et al.]. – Text: direct // Russian Journal of Nondestructive Testing. – 2017. – Vol. 53. – №11. – PP. 772–778.

5. Determination of the Gaussian and Lorentzian content of experimental line shapes / G. K. Wertheim, M. A. Butler, K. W. West, D. N. E Buchanan. – Text: direct // Review of Scientific Instruments. – 1974. – Vol. 45(11). – PP. 1369–1371.

6. Schneider, C. S. Vibration induced magnetization / C. S. Schneider, E. A. Semcken. – Text: direct // Journal of Applied Physics. – 1981. – Vol. 52(3). – PP. 2425–2427.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Сташков Алексей Николаевич

Институт физики металлов имени
М.Н. Михеева Уральского отделения РАН.
ул. С. Ковалевской, 18, г. Екатеринбург,
620108, Российская Федерация.
Старший научный сотрудник.
Тел.: +7 (343) 378-36-18.
E-mail: stashkov@imp.uran.ru.

Щапова Елизавета Андреевна

Институт физики металлов имени М.Н.
Михеева Уральского отделения РАН.
ул. С. Ковалевской, 18, г. Екатеринбург,
620108, Российская Федерация.
Аспирант.
Тел.: +7 (343) 378-36-18.
E-mail: schapova@imp.uran.ru.

Ничипурук Александр Петрович

Институт физики металлов имени М.Н.
Михеева Уральского отделения РАН.
ул. С. Ковалевской, 18, г. Екатеринбург,
620108, Российская Федерация.
Заведующий лабораторией.
Тел.: +7 (343) 374-44-90.
E-mail: nichip@imp.uran.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Stashkov Alexey Nikolaevich

Mikheev Institute of Metal Physics.
18, S. Kovalevskaya St., Yekaterinburg
620108, the Russian Federation.
Senior Researcher.
Phone: +7 (343) 378-36-18.
E-mail: stashkov@imp.uran.ru.

Schapova Elizaveta Andreevna

Mikheev Institute of Metal Physics.
18, S. Kovalevskaya St., Yekaterinburg
620108, the Russian Federation.
PhD student.
Phone: +7 (343) 378-36-18.
E-mail: schapova@imp.uran.ru.

Nichipuruk Alexander Petrovich

Mikheev Institute of Metal Physics.
18, S. Kovalevskaya St., Yekaterinburg
620108, the Russian Federation.
Head of laboratory.
Phone: +7 (343) 374-44-90.
E-mail: nichip@imp.uran.ru.

М. Ф. Байсадыков, П. Г. Петров, Д. В. Супоня

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

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ИЗНОСА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЩЕТОК ТЯГОВЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ С УЧЕТОМ УСЛОВИЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ ПОДВИЖНОГО СОСТАВА

В статье приведены данные по разработке математической модели определения интенсивности износа электрических щеток тяговых электродвигателей. Описан подход, позволяющий использовать данные бортовой системы подвижного состава для определения ресурса электрических щеток. В заключении приведены сравнительные данные износа полученных в результате расчета и из эксплуатации.

Ключевые слова: машины постоянного тока, коллекторно-щеточный узел, электрические щетки, математическая модель, прогнозирование.

Marsel F. Baysadykov, Pavel G. Petrov, Dmitry V. Suponya

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

PREDICTION THE WEAR OF TRACTION MOTOR'S ELECTRIC BRUSHES TAKING INTO ACCOUNT OF THE ROLLING STOCK'S OPERATING CONDITIONS

This article presents the data on development of mathematical model for determination of electric brushes wear intensity for traction motors. The approach allowing to use the data of onboard system of rolling stock for determination of electric brushes resource is described. In the conclusion there are comparative data on electric brushes wear received as a result of calculation and from operation.

Keywords: DC machines, collector-brush unit, electric brushes, mathematical model, forecasting.

Надёжность локомотивного парка и его технического состояния в эксплуатации обеспечивается качественным и своевременным техническим обслуживанием с использованием современных средств технологического оснащения ремонтных предприятий и инновационных технологий. Одной из

актуальных задач в настоящее время является разработка методов и средств, позволяющих выявлять узлы, для которых наиболее вероятен выход из строя.

В настоящее время одним из наиболее распространенных типов подвижного состава на сети железных дорог России являются электровагоны и тепловозы, оснащенные коллекторными тяговыми электродвигателями (ТЭД). При этом согласно проведенному анализу данных по отказам подвижного состава, на долю элементов коллекторно-щеточный узел (КЩУ) ТЭД приходится порядка 25% от общего числа отказов ТЭД.

Одним из часто наиболее часто выходящих из строя элементов КЩУ ТЭД являются электрические щетки. Это связано в первую очередь с тем, что в процессе всей своей работы они подвержены постоянному воздействию большого количества факторов механической, электрической и электромагнитной природы, что приводит к повышению интенсивности износа щеток, вследствие чего возникает необходимость их более частой замены, и возникает проблема снижения заявленного ресурса работы щеток [1].

В результате анализа вопроса по исследованию процесса износа электрических щеток [2-4] сформирована уточненная математическая модель для определения интенсивности изнашивания электрических щеток [5]:

$$\frac{\Delta I}{\Delta t} = (n \cdot P_{\text{ср.щ}}) \cdot K_{\text{ф}} + (n^{\frac{3}{4}} \cdot I_a^{\frac{1}{2}} \cdot P_{\text{ср.щ}}^{\frac{1}{2}}) \cdot K_{\text{эк}} + (n \cdot W_{\text{и}}) \cdot K_{\text{эр}} \quad (1)$$

где t – время;

n – частота вращения двигателя;

$P_{\text{ср.щ}}$ – средняя величина давления на щетку;

I_a – ток, протекающий по щетке;

$W_{\text{и}}$ – энергия искрения;

$K_{\text{ф}}$ – коэффициент фрикционного износа;

$K_{\text{эк}}$ – коэффициент электрокоррозионного износа;

$K_{\text{эр}}$ – коэффициент электроэрозионного износа.

В представленной математической модели (1) процесс износа рассматривается как совместное действие трех составляющих: фрикционной, электрокоррозионной, электроэрозионной. Приведенная модель (1) позволяет определить интенсивность изнашивания электрической щетки в зависимости от основных параметров эксплуатации. Однако стоит учесть, что в процессе эксплуатации частота вращения и ток ТЭД, установленных на подвижном

составе, не являются постоянной величиной и подвержены постоянному изменению, обусловленных режимами ведения поезда.

Современный подвижной состав оснащен бортовыми цифровыми системами мониторинга, с помощью которого можно производить фиксацию большинства параметров движения [7], в том числе: тока якоря каждого из ТЭД I , также скорости движения локомотива V , напряжение на двигателях, мощность ТЭД и другие. Выходные данные, получаемые с системы мониторинга, представляют собой массив значений по изменению параметров каждого из установленных ТЭД, регистрируемых с высокой точностью. Используя данные эксплуатации, полученных с системы мониторинга за длительный период эксплуатации, можно определять наиболее характерные режимы работы локомотива и использовать их при определении интенсивности износа электрических щеток и прогнозировании ресурса их работы.

Согласно математической модели (1) при определении интенсивности износа электрических щеток необходимо иметь данные по изменению I и V для рассматриваемого локомотива. На рисунке 1, в качестве примера, приведены гистограммы изменения параметров для тепловоза марки 2ТЭ116У, полученных по данным эксплуатации.

Для расчета интенсивности изнашивания электрических щеток ТЭД произведем перевод абсолютных значений параметров V , I , и $P_{\text{ср.щ.}}$ осуществим переход в удельные:

1) Производим перевод частоты вращения якоря ТЭД в линейную скорость движения щетки по поверхности коллектора. Для этого сначала осуществляется переход от линейной скорости к частоте вращения колесной пары по формуле:

$$n_{\text{кп}} = \frac{60 \cdot V}{\pi \cdot D_{\text{кп}}}, \quad (2)$$

где $D_{\text{кп}}$ – диаметр колесной пары, м; $n_{\text{кп}}$ – частота вращения колёсной пары, об/мин.

Далее производится пересчет частоты вращения ТЭД в линейную скорость перемещения щетки по поверхности коллектора $V_{\text{к}}$ по формуле:

$$V_{\text{к}} = \frac{\pi \cdot D_{\text{к}} \cdot n_{\text{кп}}}{60}, \quad (3)$$

где $D_{\text{к}}$ – диаметр коллектора ТЭД, м.

2) Производим перевод тока якоря ТЭД в плотность тока $j_{щ}$, протекающего по щетке, по формуле:

$$j_{щ} = \frac{I}{S_{щ}}, \quad (4)$$

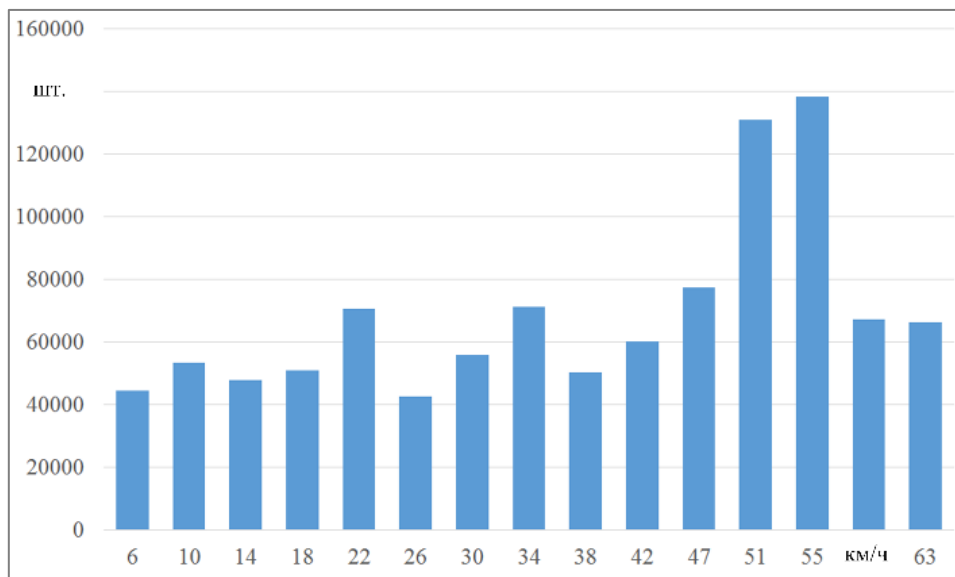
где $S_{щ}$ – суммарная площадь электрических щеток одной полярности:

$$S_{щ} = \sum_{i=1}^N S_{щi} = \sum_{i=1}^N b_{щi} \cdot \delta_{щi}, \quad (5)$$

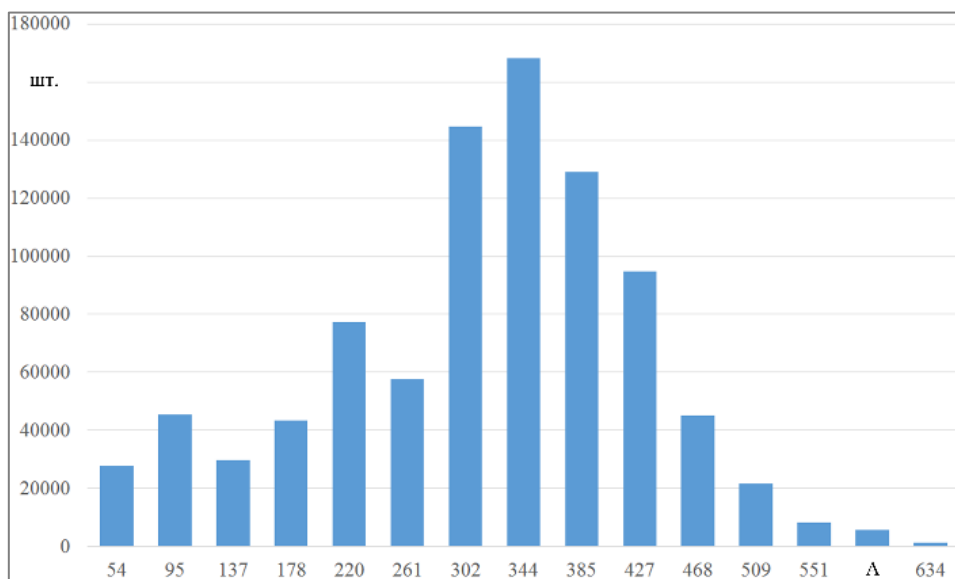
где $b_{щi}$ – ширина щетки, см;

$\delta_{щi}$ – глубина щетки, см;

N – количество щеток.



а



б

Рисунок 1 – Гистограммы изменения параметров электровоза:

а – скорость движения; б – ток якоря ТЭД

В результате получаем массивы значений по изменению $j_{щ}$ и V_k . Для полученных массивов значений $V_k, j_{щ}$ производится разбиение на интервалы i , в каждом из которых определяется среднее значение. Полученные значения используются в дальнейшем при определении интенсивности износа.

3) Значение усилия нажатия, зафиксированное в ходе измерений, также переводим в удельное по формуле:

$$P_{щ} = \frac{P_{ср.щ.}}{S_{щ}}, \quad (6)$$

где $P_{щ}$ – удельное нажатие на щетку, кг/см².

$P_{ср.щ.}$ – нажатие на щетку, кг.

Таким образом интенсивность износа щетки, позволяющую учесть условия эксплуатации, можно представить в следующем виде:

$$\frac{\Delta I}{\Delta t} = K_{\phi} \cdot V_{ксп} \cdot P_{щ} + K_{эк} \cdot \sum_i \left(V_{ki}^{\frac{3}{4}} \cdot j_{щi}^2 \cdot f(V_{ki}^{\frac{3}{4}} \cdot j_{щi}^2) \right) \cdot P_{щ}^{\frac{1}{2}} + K_{эр} \sum_i (V_k \cdot W_{и}) \quad (7)$$

Далее определяем износ электрической щетки на 10000 км по выражению:

$$\Delta I_{10000} = \frac{10000}{V_{тер}} \cdot \frac{\Delta I}{\Delta t}, \quad (8)$$

где $V_{тер}$ – средняя скорость движения тепловоза по всему массиву данных.

Прогнозируемый ресурс работы щетки вычисляем по формуле:

$$T_{ост} = h_{нач} - \Delta I_{10000} \cdot \frac{L_{тек}}{10000}, \quad (9)$$

где $h_{нач}$ – начальная высота щетки, мм;

$L_{тек}$ – текущий пробег тепловоза от момента замены щеток, км.

Оценка достоверности приведенной математической модели (7) осуществлялась путем сравнения результатов по определению интенсивности износа электрических щеток на модельном двигателе типа 2ПН в лабораторных условиях и данных по износу электрических щеток ТЭД ЭД133 тепловоза 2ТЭ116У, полученных из эксплуатации. При этом для проведения экспериментальных исследований с использованием теории подобия определены масштабы подобия для соответствия параметров ($j_{щ}$, $P_{щ}$, V_k , $W_{и}$) модельной машины и ТЭД [8].

Основные результаты по сравнению величины износа по расчету с использованием математической модели (7) и данных из эксплуатации приведены в таблице 1.

Таблица 1

Полученные значения износа электрических щеток, мм/10 тысяч км.

№	Тип материала щетки	Расчетные значения			Фактический износ	Расхождение результатов, %
		Фрикционный	Электрокоррозионный	Электроэрозионный		
1	ЭГ61АЕ*	0,91	1,04	1,16	1,04	11,49
2	ЭГ61АЕ**	1,55	1,66	1,76	1,54	14,54
3	ЭГ61АИ	0,66	0,94	1,22	1,11	10,27

Приведенные результаты подтверждают достоверность разработанной математической модели определения интенсивности изнашивания электрических щеток (7). Расхождение в результатах расчетов связано тем, что при расчете износа электрических щеток не учитывалась настройка магнитодвижущей силы добавочных полюсов ТЭД и состояние профиля коллектора ТЭД. Дополнительное наличие таких входных данных может быть использовано для повышения точности расчетов.

Наличие дополнительных данных о состоянии коллектора ТЭД, типе ТЭД и локомотиве, а также данных из эксплуатации могут быть использованы для прогнозирования ресурса щеток, установленных на конкретных ТЭД в составе локомотива, и способствовать разработке подходов для определения повышенного износа щеток и необходимости их замены без проведения периодических осмотров.

Список литературы

1. Ермолин, Н. П. Надежность электрических машин / Н. П. Ермолин, И. Л. Жирихин. – Ленинград: Энергия, 1976. – 248 с. – Текст : непосредственный.
2. Мышкин, Н. К. Электрические контакты / Н. К. Мышкин, В. В. Конциц, М. Браунович. – Долгопрудный: Интеллект, 2008. – 560 с. – ISBN 978-5-91559-003-7. – Текст : непосредственный.
3. Качин, О. С. Увеличение ресурса скользящего контакта электрических машин / О. С. Качин, С. И. Качин. – Lambert Academic Publishing, 2012. – С. 165. – Текст : непосредственный.
4. Хольм, Р. Электрические контакты / Р. Хольм. – Москва: Изд-во иностранной литературы, 1961. – С. 464. – Текст : непосредственный.
5. Харламов, В. В. Методика определения параметров математической модели износа электрических щеток / В. В. Харламов, Д. И. Попов,

М. Ф. Байсадыков. – Текст : непосредственный // Инновационные проекты и технологии в образовании, промышленности и на транспорте : материалы научной конференции / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2017. – С. 109–116.

6. Харламов, В. В. Определение интенсивности изнашивания электрических щеток коллекторных машин постоянного тока с учетом воздействия профиля коллектора / В. В. Харламов, Д. И. Попов, М. Ф. Байсадыков. – Текст : непосредственный // Проблемы машиноведения : материалы III международной научно-технической конференции / Омский гос. тех. ун-т. – Омск, 2019. – С. 302–309.

7. Электровоз 2ЭС6 "Синара" / под. ред. В. В. Брексона. – Верхняя Пышма: ООО "Уральские локомотивы", 2015. – 328 с. – Текст : непосредственный.

8. Байсадыков, М. Ф. Оценка и прогнозирование износа электрических щеток тяговых двигателей с применением теории подобия / М. Ф. Байсадыков, П. К. Шкодун, Д. В. Супоня. – Текст : непосредственный // Технологическое обеспечение ремонта и повышение динамических качеств железнодорожного подвижного состава : материалы V всероссийской научно-технической конференции с международным участием / Омский гос. тех. ун-т. – Омск, 2019. – С. 222–229.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Байсадыков Марсель Фаритович

Омский государственный университет
путей сообщения (ОмГУПС).
Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046,
Российская Федерация.
Преподаватель кафедры «Электрические
машины и общая электротехника» ОмГУПС.
Тел.: 8-3812-31-18-27.
E-mail: emoe@omgups.ru.

Петров Павел Геннадьевич

Омский государственный университет

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Baysadykov Marsel Faritovich

Omsk State Transport University (OSTU).
35, Marx av.m, Omsk, 644046,
the Russian Federation.
Applicant at the Department of «Electric
machines and electrical engineer» OSTU.
Phone: 8-3812-31-18-27.
E-mail: emoe@omgups.ru.

Petrov Pavel Gennadyevich

Omsk State Transport University (OSTU).

путей сообщения (ОмГУПС).
Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046,
Российская Федерация.
Доцент кафедры «Электрические машины
и общая электротехника» ОмГУПС.
Тел.: 8-3812-31-18-27.
E-mail: emoe@omgups.ru.

35, Marx av.m, Omsk, 644046,
the Russian Federation.
Docent at the Department of «Electric machines
and electrical engineer» OSTU.
Phone: 8-3812-31-18-27.
E-mail: emoe@omgups.ru.

Супоня Дмитрий Викторович
Омский государственный университет
путей сообщения (ОмГУПС).
Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046,
Российская Федерация.
Аспирант кафедры «Электрические машины и
общая электротехника» ОмГУПС.
Тел.: 8-3812-31-18-27.
E-mail: emoe@omgups.ru.

Suponya Dmitriy Viktorovich
Omsk State Transport University (OSTU).
35, Marx av.m, Omsk, 644046,
the Russian Federation.
Postgraduate student at the Department of
«Electric machines and electrical engineer»
OSTU.
Phone: 8-3812-31-18-27.
E-mail: emoe@omgups.ru.

УДК 629.4.015

С. М. Овчаренко, И. С. Ринг

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

ВОПРОСЫ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ СИСТЕМ ПРОГРЕВА ТЕПЛОВОЗОВ

В данной статье рассмотрены вопросы эффективности современных систем тепловозов, выявлены ключевые недостатки действующих систем, поставлены задачи по совершенствованию систем прогрева.

Ключевые слова: энергетические затраты, прогрев, тепловоз.

Sergey M. Ovcharenko, Ivan S. Ring

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

ISSUES OF EFFICIENCY OF OPERATION OF HEATING SYSTEMS OF LOCOMOTOR

This article examines the efficiency of modern diesel locomotive systems, identifies the key shortcomings of the existing systems, sets tasks to improve heating systems.

Keyword: energy costs, heating, diesel locomotive.

Снижение энергетических затрат для железнодорожного транспорта является одной из приоритетных задач развития компании ОАО «РЖД» [1]. Решением является снижение потребления топливно-энергетических ресурсов на тягу поездов и прогрев локомотивов в холодное время года [2]. В целом по сети железных дорог России для прогрева силовых установок автономных локомотивов в холодное время года затрачивается в год до 3-5 % от всего количества потребляемого топлива. Непроизводительные затраты топлива представляют значительную долю в расходах локомотивного депо, если учесть, что затраты на топливо составляют до 55 % всех эксплуатационных затрат локомотивных депо.

Специфика конструкции тепловозов требует поддержания температуры теплоносителей не ниже 40⁰С [3]. Эксплуатация тепловозов, особенно маневровых, предполагает наличие таких технологических моментов, как простой в ожидании работы, причем доля в бюджете времени довольно существенная (рисунок 1).

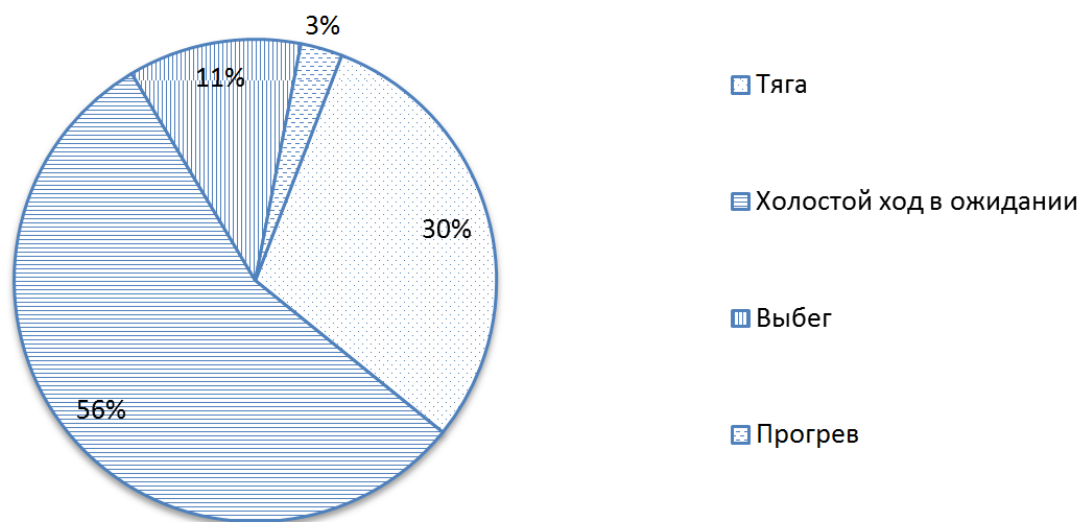


Рисунок 1 – Время работы тепловозов

При низких температурах окружающей среды необходимо поддерживать допустимый температурных режим – путем прогрева тепловоза. Выполненный анализ расхода топлива тепловозами (рисунок 2) показывает, что на прогрев

локомотива тратится порядка 5% от общего расхода топлива локомотивами и это довольно существенные непроизводительные затраты.

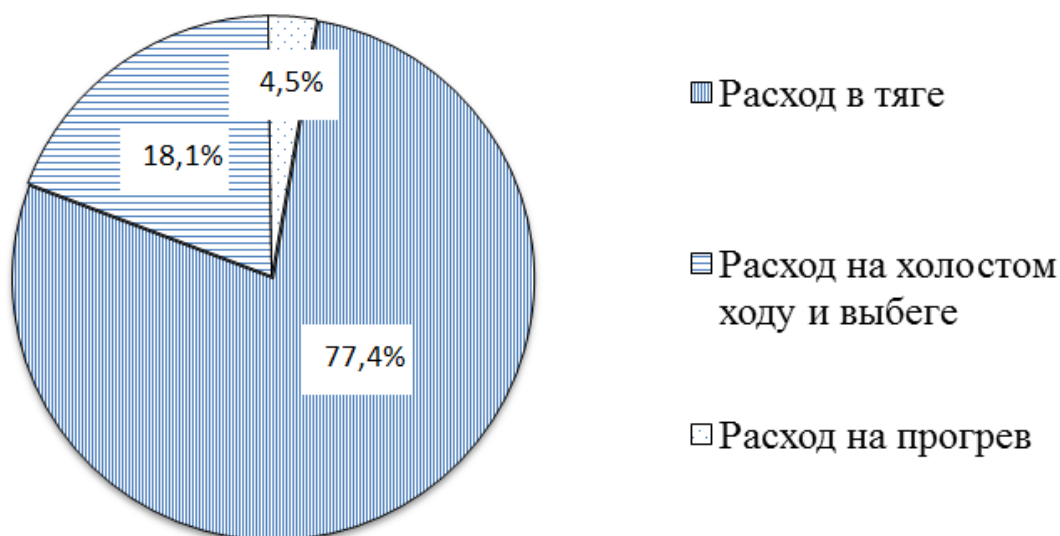


Рисунок 2 – Расход топлива тепловозами

Прогрев систем тепловоза обеспечивается несколькими технологиями: дизель работает в режиме холостого хода, тепловоз размещается в отапливаемом помещении, тепловоз оборудуется бортовой или подключается к стационарной системе прогрева. Каждая из этих технологий имеет свои достоинства и недостатки. Наиболее приемлемой, экономичной и реализуемой является технология прогрева систем тепловоза бортовой системой. Основным достоинством таких систем является отсутствие необходимости позиционирования (привязки) тепловоза к конкретному месту.

В настоящее время разработано и эксплуатируется несколько систем по прогреву локомотивов и поддержания в течение длительного времени предпусковых температурных условий дизелей маневровых и магистральных тепловозов путем обеспечения установленной температуры охлаждающей жидкости, масла, топлива, воздуха в кабине машиниста и аккумуляторном отсеке.

В таблице представлены наиболее распространенные комплексы и системы, которые эксплуатируются в разных регионах и на разных сериях тепловозов, имеющие различную степень эффективности [2].

Таблица

Комплексы и системы прогрева локомотивов

№	Наименование комплекса (системы)	Простота в эксплуатации	Сложность монтажа	Эффективность	Стоимость оборудования
1	СПТМ «Гольфстрим»	+	–	+	–
2	«КОНТУР»	+	–	+	+
3	АСПТ (ОАО «ВНИКТИ»)	+	+	+	+
4	«БРИС»	–	–	+	+
5	«РУБИН»	–	–	+	–

Каждая из представленных систем позволяет решать задачу экономии дизельного топлива и не расходовать моторесурс дизеля. Как показывает анализ расхода топлива локомотивами, в настоящее время еще не использованы все возможности для более эффективного использования энергетических параметров дизель-генераторных установок тепловозов как в плане вторичного использования выработанной дизелем энергии при обогреве систем в период ожидания работы, так и энергии внешних источников для обогрева [4]. Более 60 % энергии топлива, сгоревшего в цилиндрах дизеля, теряется. Накопление и использование этой энергии в период отстоя наряду с энергией, вырабатываемой системой прогрева, несомненно, позволит повысить эффективность бортовых систем. Основным недостатком существующих систем является несоответствие заявленных характеристик. Существующие системы эффективно справляются с поставленной задачей до температуры наружного воздуха -15–20 °С. При более низких температурах приходится использовать прогрев систем тепловоза от работающего дизеля.

Задача требует комплексного решения на основе моделирования всех теплообменных процессов, установлении мест наибольших потерь тепловой энергии, и разработке интеллектуальной системы прогрева, позволяющей управлять процессами с максимальной эффективностью. Проведенные исследования позволили установить, что для обеспечения теплового режима систем дизеля при реализации технологии прогрева теплоносителей от электрических ТЭНов необходима мощность не менее 60 кВт для маневрового тепловоза. Использование накопленной энергии позволит без увеличения

мощности расширить диапазон температур внешней среды, при которых бортовая система будет обеспечивать требуемый температурный режим теплоносителей. В качестве постановочных задач можно определить следующие:

- разработка модели теплообмена всех систем и узлов тепловоза с окружающей средой;
- разработка технологий накопления энергии;
- разработка технических мероприятий по снижению потерь тепловой энергии;
- разработка модели управления теплообменными процессами на основе математического аппарата искусственных нейронных сетей.

Поставленные задачи в настоящее время решаются на кафедре «Локомотивы» в рамках диссертационной работы.

Список литературы

1. Минаков, В. А. Совершенствование технологии диагностирования тепловозного дизеля по результатам контроля содержания продуктов износа в моторном масле : 05.22.07 «Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Минаков Виталий Анатольевич ; Омский государственный университет путей. – Омск, 2019. – Текст : непосредственный.

2. Аналитическая оценка экологической безопасности тепловозных дизелей / Е. И. Сковородников, А. С. Анисимов, В. А. Минаков, И. В. Чернышков // Известия петербургского университета путей сообщения. – 2019. – №1.

3. ЦТРТ-14/97 Технические указания по подготовке, эксплуатации и обслуживанию тепловозов и дизель поездов в зимних условиях : утвержден руководителем департамента локомотивного хозяйства Г. Б. Сарафанов : дата введения 1997-12-30 : введен взамен инструктивного указания по подготовке, эксплуатации и обслуживанию тепловозов и дизель-поездов в зимних условиях ЦТтеп-87. – ЦЕНТРМАГ, 2020. – 18 с.

4. Якушин, Р. Ю. Повышение эффективности прогрева силовых установок тепловозов при отстое в холодное время года : 05.22.07 «Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация» : диссертация на

соискание ученой степени кандидата технических наук / Якушин Роман Юрьевич ; Омский государственный университет путей. – Омск, 2002. – Текст : непосредственный.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Овчаренко Сергей Михайлович

Омский государственный университет
путей сообщения (ОмГУПС).

Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046,

Российская Федерация.

Доктор технических наук, доцент,

Ректор ОмГУПС, заведующий

кафедрой «Локомотивы».

Тел.: +7 (3812) 31-42-19.

E-mail: Rector@omgups.ru.

Ринг Иван Сергеевич

Омский государственный университет
путей сообщения (ОмГУПС).

Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046,

Российская Федерация.

Аспирант, Председатель ППО студентов
ОмГУПС.

Тел.: +7 (3812) 31-06-33.

E-mail: ring088@yandex.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Ovcharenko Sergei Mikhailovich

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx st., Omsk, 644046,

the Russian Federation.

Doctor of Technical Sciences, Associate

Professor, Rector of OSTU, Head of the

Department of Locomotives.

Phone: +7 (3812) 31-42-19.

E-mail: Rector@omgups.ru.

Ring Ivan Sergeevich

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx st., Omsk, 644046,

the Russian Federation.

Post-graduate student, Chairman of the OSTU
students' PPO.

Phone: +7 (3812) 31-06-33.

E-mail: ring088@yandex.ru.

Г. В. Волчанин, А. А. Кузнецов, В. А. Кандаев

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

МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ГЕНЕРАТОРА ИМПУЛЬСОВ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОГО УСТРОЙСТВА ДИАГНОСТИРОВАНИЯ КОРРОЗИОННОГО СОСТОЯНИЯ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ

В статье рассматривается генератор импульсов электрохимического устройства с применением быстродействующих транзисторов для диагностирования железобетонных опор контактной сети. Показаны временные зависимости представленного устройства, приведена методика расчета численных значений параметров диагностирования.

Ключевые слова: железобетонные конструкции, коррозионное состояние, генератор импульсов, быстродействующие транзисторы, параметры диагностирования, неразрушающий контроль.

Georgii V. Volchanin, Andrey A. Kuznetsov, Vasiliy A. Kandaev

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

MODELING THE OPERATING MODES OF THE PULSE GENERATOR OF AN ELECTROCHEMICAL DEVICE FOR DIAGNOSING THE CORROSION STATE OF REINFORCED CONCRETE STRUCTURES.

The article discusses a pulse generator of an electrochemical device using high-speed transistors for diagnosing reinforced concrete supports of a contact network. The time dependences of the presented device are shown, the method for calculating the numerical values of the diagnostic parameters is presented.

Keywords: reinforced concrete structures, corrosion condition, pulse generator, high-speed transistors, diagnostic parameters, non-destructive testing.

Обеспечение безопасности движения поездов является одним из приоритетных направлений деятельности ОАО «РЖД». Для этого ежегодно проводится комплекс организационно технических мероприятий, направленных на повышение надежности работы основных электротехнических устройств и

поддержание инфраструктуры предприятия в работоспособном состоянии. Стратегически важными объектами инфраструктуры ОАО «РЖД» являются железобетонные опоры контактной сети, которые подвержены коррозионному воздействию вследствие множества влияющих внешних факторов. Поэтому задача совершенствования методов определения коррозионного состояния опор контактной сети актуальна.

Отталкиваясь от расчетной схемы исследования переходного процесса, был разработан генератор импульсов, с использованием быстродействующих транзисторных ключей и получена осциллограмма его работы.

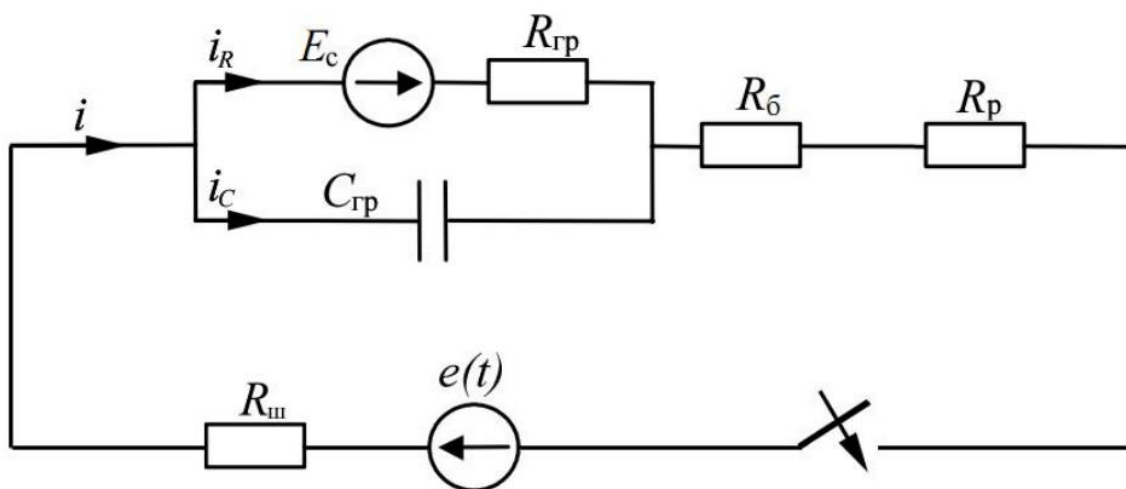


Рисунок 1 – Расчетная схема переходного процесса на железобетонном образце

На расчетной схеме замещения приняты следующие обозначения: $R_{гр}$, $C_{гр}$ – сопротивление и емкость границы раздела «арматура – бетон»; $R_б$ – сопротивление бетона от границы раздела «арматура – бетон» до внешней границы бетонного образца.

Электрохимический потенциал измеряется вольтметром относительно медно-сульфатного электрода сравнения.

На рисунке 2 приняты следующие обозначения: V1 – источник тока с внутренним сопротивлением; Q1 – Q4 – быстродействующие транзисторные ключи; V2 – источник постоянного тока; R1 – сопротивление границы раздела; C1 – емкость границы раздела; R2 – сопротивление бетона; R3 – Сопротивление растеканию; XSC1 – Осциллограф.

На рисунке 3 показаны осциллограммы тока и напряжения при исследовании схемы замещения перехода арматура – грунт железобетонного образца.

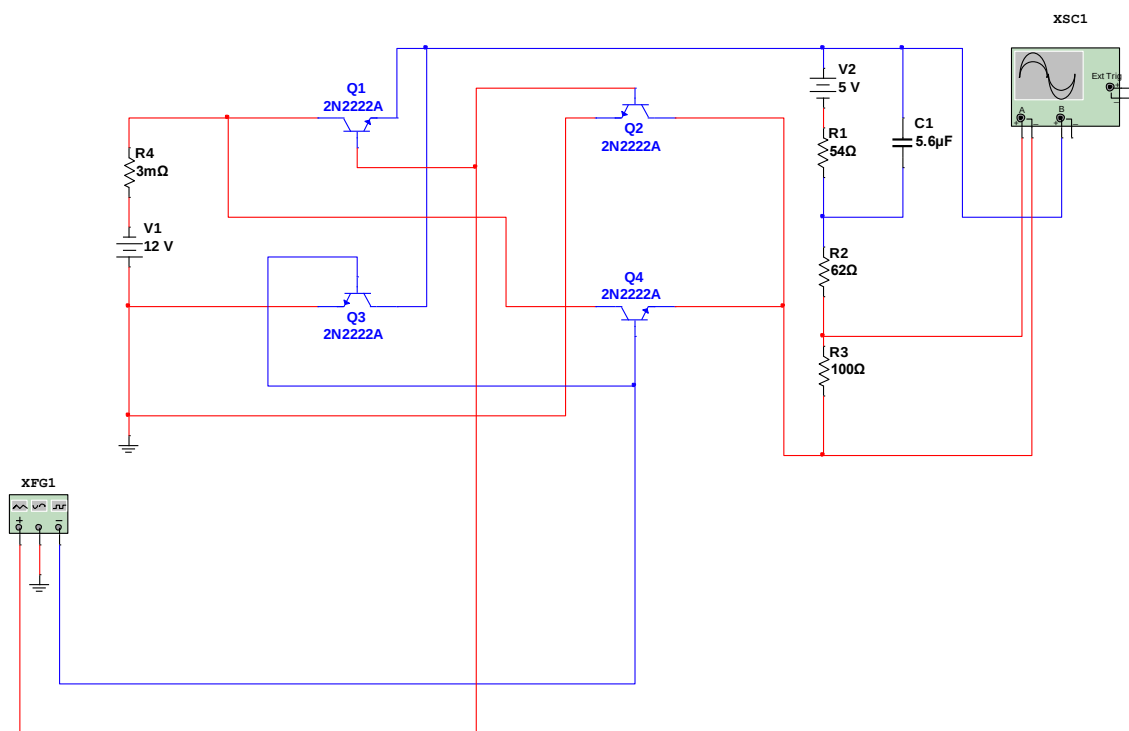


Рисунок 2 – Принципиальная схема подключения с применением быстродействующих транзисторных ключей в программе Multisim

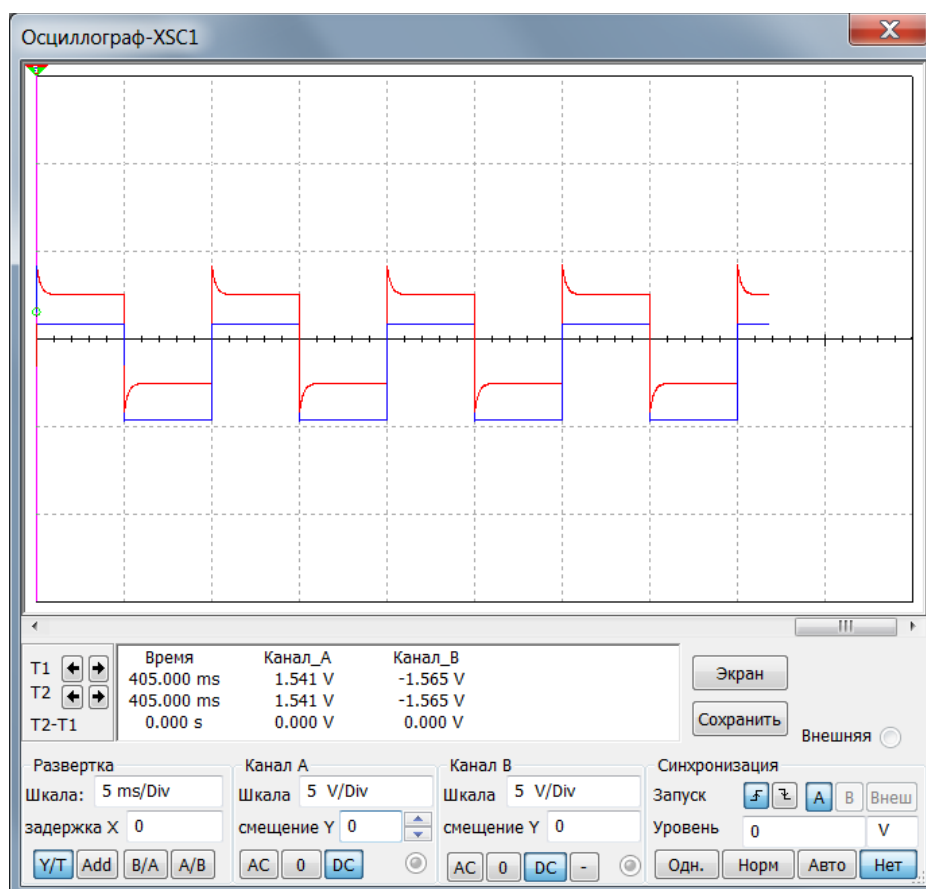


Рисунок 3 – Осциллограмма исследуемой схемы с применением быстродействующих транзисторных ключей

На осциллограмме красным цветом показан ток, синим - напряжение, приложенное к исследуемой схеме замещения. Используя данную осциллограмму, получим данные для численного расчета электротехнических параметров опорной конструкции контактной сети.

Учитывая, что сопротивление бетона R_6 и сопротивление растеканию электрического тока R_p в схеме замещения включены последовательно, в расчетах удобнее их учитывать вместе. Объединим их в одно сопротивление коррозионной среды ($R_{кс}$):

$$R_{кс} = R_6 - R_p. \quad (1)$$

Постоянная времени рассматриваемой цепи

$$\tau = R_{\Sigma} C_{гр}, \text{ где } R_{\Sigma} = \frac{R_{гр} (R_{кс} + R_{ш})}{R_{гр} + R_{кс} + R_{ш}}. \quad (2)$$

Выражение для тока может быть записано в виде:

$$i(t) = i_{пр}(t) + A_1 e^{-\frac{t}{\tau}}. \quad (3)$$

Принужденная составляющая при постоянном внешнем напряжении является константой и не зависит от времени. Установившееся значение тока можно найти из выражения:

$$i_{пр} = \frac{E_c + E}{R_{кс} + R_{ш} + R_{гр}}. \quad (4)$$

Учитывая, что $R_{ш}$ известно, а начальное значение тока $i(0+)$ можно определить по осциллограмме переходного процесса, из уравнения (1) определяем $R_{кс}$:

$$R_{кс} = \frac{E_c + E}{i(0+)} - R_{ш}. \quad (5)$$

Сопротивление $R_{гр}$ можно найти через отношение

$$\frac{i(0+)}{i_{пр}} = \frac{R_{кс} + R_{ш} + R_{гр}}{R_{кс} + R_{ш}} = 1 + \frac{R_{гр}}{R_{кс} + R_{ш}}, \quad (6)$$

так как значение $i_{пр} = \text{const}$ и его можно получить по осциллограмме при

условии, что за время, отведенное на поляризацию, переходный процесс успел завершиться.

Численный расчет параметров схемы замещения $C_{гp}$, $R_{гp}$ и R_6 на примере зарегистрированного переходного процесса можно выполнить по выражениям [5].

$$R_{гp} = \left(\frac{i(0+) - i_{np}}{i_{np}} - 1 \right) (R_{кс} + R_{ш}). \quad (7)$$

Емкость $C_{гp}$ можно найти по выражению (4):

$$C_{гp} = \frac{\tau}{R_3}. \quad (8)$$

Постоянная времени τ определяется графически по осциллограмме.

$$i(t_1) = i_{np} + A_1 e^{-\frac{t_1}{\tau}};$$

$$\tau = \frac{t_1}{\ln \left(\frac{A_1}{i(t_1) - i_{np}} \right)}. \quad (9)$$

Для более точного определения значения тока в нужных точках процесс записи осциллограммы разбивается на две части: включение и выключение напряжения. Отключение схемы от источника напряжения выполняется через 40 с – время, необходимое для подготовки осциллографа к записи следующего графика и вполне достаточное для того, чтобы переходный процесс завершился.

По осциллограмме определяются следующие значения.

Начальное значение тока непосредственно после коммутации:

$$i(0+) = \frac{u_{ш}(0+)}{R_{ш}}; \quad (10)$$

где, $u_{ш}(0+)$ – напряжение на шунте после включения источника.

Принужденная составляющая тока определяется непосредственно перед выключением источника:

$$i_{np} = \frac{u_{ш np}}{R_{ш}}; \quad (11)$$

где, $u_{ш np}$ – напряжение на шунте непосредственно перед выключением источника.

Коэффициент A_1 можно найти как разность значений:

$$A_1 = i(0+) - i_{\text{пр}}; \quad (12)$$

Воспользовавшись выражениями (1) – (12) можно определить численные значения параметров диагностирования, по которым производится разделение железобетонных опор по степени коррозии. Применение генератора импульсов с повышенным быстродействием уменьшает методическую погрешность измерения временных параметров по осциллограммам, используемым для приведенных выше расчетов.

Список литературы

1. Котельников, А. В. Блуждающие токи и эксплуатационный контроль коррозионного состояния подземных систем электроснабжения железнодорожного транспорта / А. В. Котельников, В. А. Кандаев. – Москва : Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте, 2013. – 552 с. – Текст : непосредственный.
2. Вайнштейн, А. Л. Коррозионные повреждения опор контактной сети / А. Л. Вайнштейн, А. В. Павлов. – Москва : Транспорт, 1988. – 111 с. – Текст : непосредственный.
3. Алексеев, С. Н. Коррозия и защита арматуры в бетоне / С. Н. Алексеев. – Москва: Научно-исследовательский институт бетона и железобетона, 1968. – 225 с. – Текст : непосредственный.
4. Ефимов, А. В. Надежность и диагностика систем электроснабжения железных дорог: учебник для вузов ж.-д транспорта / А. В. Ефимов, А. Г. Галкин. – Москва : УМК МПС России, 2000 – 512 с. – Текст : непосредственный.
5. Кандаев, В. А. Определение параметров границы раздела «арматура – бетон» по результатам анализа переходного процесса / В. А. Кандаев, К. В. Авдеева, А. В. Пономарев. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2014. – №4 (20). – С. 85–92.
6. Патент № 2528585. Российская федерация, МПК G01N 17/00 (2006.01). Способ определения коррозионного состояния подземной части железобетонных опор : № 2013104209/28 : заявлено 31.01.2013 : опубликовано 20.09.2014 / Кандаев В. А., Авдеева К. В., Серебрянников Э. В. – 8 с. – Текст : непосредственный.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Волчанин Георгий Викторович

Омский государственный университет
путей сообщения (ОмГУПС).
Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644000,
Российская Федерация.
Аспирант кафедры «Электроснабжение
железнодорожного транспорта» ОмГУПС.
Тел.: 8-913-154-79-65.
E-mail: vev_7@bk.ru.

Кузнецов Андрей Альбертович

Омский государственный университет
путей сообщения (ОмГУПС).
Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644000,
Российская Федерация.
Д.т.н. профессор, заведующий кафедрой
«Теоретическая электротехника» ОмГУПС.
Тел.: 8-904-321-50-90.
E-mail: kuznetsova.omgups@gmail.com.

Кандаев Василий Андреевич

Омский государственный университет
путей сообщения (ОмГУПС).
Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644000,
Российская Федерация.
Д.т.н. профессор кафедры
«Телекоммуникационные, радиотехнические
системы и сети» ОмГУПС.
Тел.: 8-983-110-19-77.
E-mail: kandaev_va@mail.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Volchanin Georgii Viktorovich

Omsk State Transport University (OSTU).
35, Marx av.m, Omsk, 644000,
the Russian Federation.
Postgraduate of department «Power supply for
railway transport» OSTU.
Phone: 8-913-154-79-65.
E-mail: vev_7@bk.ru.

Kuznetsov Andrey Albertovich

Omsk State Transport University (OSTU).
35, Marx av.m, Omsk, 644000,
the Russian Federation.
Doctor of Technical Sciences Professor, Head of
the Department "Theoretical Electrical
Engineering" OSTU.
Phone: 8-904-321-50-90.
E-mail: kuznetsova.omgups@gmail.com.

Kandaev Vasiliy Andreevich

Omsk State Transport University (OSTU).
35, Marx av.m, Omsk, 644000,
the Russian Federation.
Doctor of Technical Sciences Professor of the
Department of «Telecommunication, Radio
Engineering Systems and Networks» OSTU.
Phone: 8-983-110-19-77.
E-mail: kandaev_va@mail.ru.

Ю. И. Матяш, Е. В. Кондратенко, Т. Б. Брылова

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

ПОВЫШЕНИЕ ДОСТОВЕРНОСТИ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ЦЕЛЬНОКАТАНОГО КОЛЕСА НА ХОДУ ПОЕЗДА

Приведен краткий обзор существующих устройств диагностики колесных пар, применяемых на отечественных и зарубежных железных дорогах. Предложен способ для обнаружения трещин в диске цельнокатаного колеса грузового подвижного состава по ходу поезда с использованием излучателей типа «фазированных решеток» позволяющих на ходу поезда обнаруживать трещины различного пространственного расположения в дисках колес грузовых вагонов.

Ключевые слова: движение поезда, вагон, цельнокатаное колесо, трещина, диагностирование, ультразвуковой контроль, фазированные решетки, техническое преимущество.

Yury I. Matyash, Euvgenyi V. Kondratenko, Tatyana B. Brylova

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

IMPROVING THE RELIABILITY OF DIAGNOSTICS OF AN ALL-ROLLED WHEEL WHILE THE TRAIN IS RUNNING

A brief overview of existing wheelset diagnostic devices used on domestic and foreign Railways is given. A method is proposed for detecting cracks in the disk of an all-rolled wheel of a freight rolling stock during the movement of a train using "phased array" type emitters that allow detecting cracks of various spatial locations in the wheels of freight cars during the movement of the train.

Keywords: train movement, wagon, all-rolled wheel, crack, diagnostics, ultrasonic control, phased arrays, technical advantage.

Основополагающей современной тенденцией организации систем мониторинга колесных пар является интегрирование в рамках единого комплекса функций нескольких модулей, обеспечивающих получение полной информации о параметрах колесной пары.

В современных условиях развития диагностической и измерительной микропроцессорной аппаратуры первоочередную важность при контроле колес в движении приобретают методические вопросы. Трудности, связанные с выделением в сигнале первичных преобразователей информативных составляющих и оценкой по ним параметров дефекта, до сих пор практически не изучены. Между тем реализация методики контроля колес в движении требует полной автоматизации и достаточно высокой точности измерений.

Обоснованная отцепка вагона от грузового поезда может производиться только на основании достоверных результатов измерений, полученных по аттестованным методикам и с использованием средств измерений, зарегистрированных в государственном реестре и прошедших испытания в установленном порядке.

Создание таких систем требует разработки методик, средств контроля, включающих в себя как аппаратную, так и программную части на основании научных исследований. При этом должны быть учтены все влияющие факторы, такие как конструкция и состояние верхнего строения пути, особенности движения колесной пары.

Рассматривая системы проведения автоматизированного контроля состояния колес и колёсных пар, таких как «ARGUS» (разработана немецкой компанией «Hegenscheidt-MFD», Эркеленц), системы бесконтактного контроля «TreadView» (компания «AEA Technology Rail», Великобритания), «GeoTech» (разработана итальянской компанией «Technogamma», выпускается компанией Maat», Нидерланды), «WheelSpec» («Imagemap», США), «WPMS» («Lynxrail», Австралия), которые получили наибольшее распространение, в том числе и за рубежом, нельзя однозначно отдать предпочтение тому или иному варианту.

Отметим, что при применении большинства вышеуказанных систем кроме сложности устройства, точности измерений и требований по ограничению скорости проведения диагностирования требуют учета стоимости разработки, условия монтажа оборудования, требования к обслуживанию, периодичность проверок и тестовых испытаний. Использование на отечественных железных дорогах зарубежных комплексов сдерживается наличием двойных требований к подвижному составу, так как, с одной стороны, дефекты нормируются по размерам, с другой – по уровню прилагаемых динамических сил.

Проведенный анализ существующих устройств диагностики колесных пар, применяемых на отечественных железных дорогах, таких как ДЦК, ДИСК-К, АСОК-Л выявил следующие недостатки: проведение диагностики колесных пар при скорости поезда до 50 км/ч, необходимость проведения процедуры диагностики в условиях депо или технического пункта обслуживания, большой объем ручного труда, обнаружение ползунов без определения количественных значений параметров ползуна [1].

Вне зависимости от достоинств и недостатков рассмотренных технических решений неизменным остаётся лишь тот факт, что поиск дефектов поверхности катания колеса должен быть непрерывным автоматизированным процессом без вмешательства человека в процесс диагностирования, а лишь при решении возникших проблем. Это вызвано тем, что во время проведения осмотра колеса из-за конструктивных особенностей тележки и с учётом участка в зоне контакта колеса с рельсом, не осмотренной частью колеса остаётся более 50 % – у пассажирских и 40 % – у грузовых поездов [2].

Для создания методики необходимо провести анализ ударных воздействий колеса о рельс, применять высокоточную и одновременно высокочастотную аппаратуру, разработать алгоритмы обработки экспериментальных данных, специализированное программное обеспечение, определить связи информативных параметров сигнала с геометрическими размерами и типом дефектов. Однако, ультразвуковой контроль можно проводить, используя не только стандартный, пьезоэлектрический преобразователь, но и с использованием преобразователя с фазированными антенными решетками (ФАР).

Одна из основных целей применения ФАР – более точное нахождение несплошностей разных по типу, форме и ориентации. Для этого, как правило, необходимо проводить контроль объекта с разными углами ввода ультразвука.

В общем виде принцип ультразвукового контроля основан на способности луча отражаться от дефекта в исследуемом материале. Результат традиционного УЗК выводится в виде А-скана.

Метод фазированной решетки – это множество А-сканов, количество которых соответствует количеству преобразователей в фазированном датчике. В дальнейшем это множество А-сканов преобразуется в S-скан, позволяющий визуализировать структуру материала, выделяя цветом частоту амплитудных колебаний.

Данный метод не противоречит принятым стандартам традиционного

УЗК, т. к. является одним из способов генерирования ультразвуковых волн. Применение фазированных решеток позволяет генерировать лучи под множеством углов, что дает возможность контроллеру выбрать луч с нужным углом и другими регламентируемыми параметрами.

Одним из предлагаемых технических решений для обнаружения дефектов, эквивалентных плоскодонным отверстиям диаметром 1 – 3,2 мм при контроле ж/д колес является вариант Автоматизированная Система Контроля Колёс Железнодорожных Вагонов Фазированными Решётками Olympus [3].

Особенностью решения является то, что мертвые зоны могут быть уменьшены с помощью специальных функций ПО. Для соответствия требованиям контроля ж/д колес, колесный обод может быть проверен на наличие дефектов, эквивалентных плоскодонным отверстиям диаметром 3 мм, с повторяемостью 2 дБ, отношением сигнал-шум (ОСШ) 22 дБ и типичной мертвой зоной > 6 мм. Скорость контроля составляет 101-203 мм/сек., что позволяет осмотреть колесо диаметром 914 мм менее чем за 30 секунд. Эта процедура соответствует или превосходит международные стандарты контроля ж/д колес, такие как EN13262, ISO5948 и AAR M-107/M-208.

Вместе с тем возникающие акустические импульсы в ходе движения состава по контролируемому участку с искусственными неровностями рельсов за счет трущихся частей тележки вагона имеют высокий уровень шумовой составляющей, что может привести к регистрации ложных дефектов в процессе диагностики.

Предлагаемое техническое решение позволяет на ходу поезда обнаруживать трещины в дисках колес, различного пространственного расположения, а также имеет возможность осуществлять их контроль отдельно, например, вначале, на левой, а затем на правой стороне тележки, что позволяет повысить надежность и достоверность выявления трещин. Принцип работы предлагаемого устройства представлен на рисунках 1– 2.

Указанная цель достигается за счет обеспечения перпендикулярности направления всех ультразвуковых импульсов посылаемых ультразвуковыми излучателями (1 и 1*), приведенными на рисунке 1, на трещину произвольного ее пространственного расположения, путем использования «фазированных решеток», обеспечивающие подачу на диск колеса ультразвуковых импульсов под различным углом падения (примерно, через 15^0 - 20^0).

Наряду с этим, на стыках отдающих рельсов, для передачи

ультразвукового излучения диску колеса вместе с ультразвуковыми излучателями крепятся электромагниты (2 и 2*), а на стыках принимающих рельсов импульсы отраженных сигналов, улавливаются ультразвуковыми приемниками (3 и 3*), выполненными в виде «фазированных решеток».

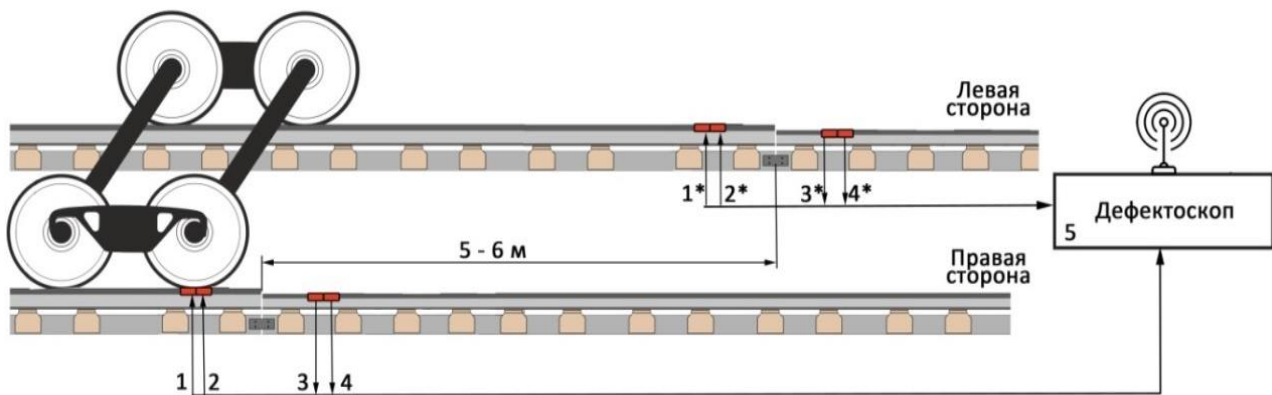


Рисунок 1 – Схема расположения устройства для диагностирования дефектов цельнокатаного колеса на ходу поезда (работа отдающего рельса)

Контроль обработки и хранение информации на мониторе, поступающих сигналов, от излучателей и приемников, производится с помощью ультразвукового дефектоскопа (5).

Для исключения, помех, возникающих при одновременном контроле дисков колес левой и правой стороны тележки левые стыки рельсов вместе с ультразвуковыми излучателями (1*) и приемниками (3*), а также с электромагнитами (2* и 4*), располагаются на расстоянии примерно через 5-6 метров.

Способ диагностирования цельнокатаного колеса реализуется следующим образом.

При движении поезда по контрольному участку, и в момент нахождения первого диска колеса, правой стороны тележки на конце отдающего рельса (см. рисунок 1), электромагнит (2) прижимает к поверхности колеса излучатель (1), и происходит передача колесу ультразвуковых импульсов под различным углом их направления (примерно, через 15^0 - 20^0), частотой в диапазоне от 400 до 500 кГц. Посылаемые импульсы распространяется в диске колеса в виде поверхностных волн, которые многократно обегает его по окружности.

При дальнейшем движении поезда, и в момент нахождения первого диска колеса, правой стороны тележки на конце принимающего рельса осуществляется прижатие ультразвукового приемника (3) электромагнитом (4)

к диску колеса, и импульсы отраженных сигналов, будут регистрироваться ультразвуковым дефектоскопом (5).

В момент нахождения первого диска колеса, правой стороны тележки на конце принимающего рельса, второй диск колеса, правой стороны тележки находится на конце отдающего рельса и электромагнит (2) прижимает излучатель (1), к поверхности второго диска колеса правой стороны тележки. В результате происходит передача этому колесу ультразвуковых импульсов под различным углом их направления (примерно, через 15^0 - 20^0), частотой в диапазоне от 400 до 500 кГц. Посылаемые импульсы в виде поверхностных волн распространяется во втором диске колеса, правой стороны тележки которые многократно обегает его по окружности.

При дальнейшем движении поезда, и в момент нахождения второго диска колеса, правой стороны тележки на конце принимающего рельса (см. рисунок 2) осуществляется прижатие ультразвукового приемника (3) электромагнитом (4) ко второму диску колеса, правой стороны тележки, и импульсы отраженных сигналов, будут регистрироваться ультразвуковым дефектоскопом (5).

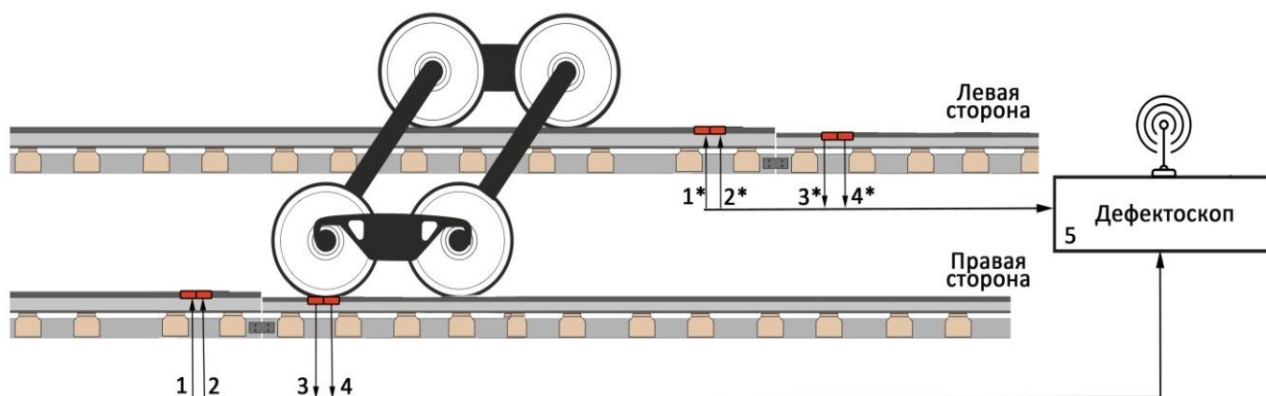


Рисунок 2 – Схема расположения устройства для диагностирования дефектов цельнокатаного колеса на ходу поезда (работа принимающего рельса)

Поскольку ультразвуковые волны, при движении в однородной среде (колесо без дефектов) не изменяют своей траектории, поэтому на ультразвуковой дефектоскоп (5) приходят донные эхо-сигналы с равными интервалами, соответствующими полному времени прохода окружности диска колеса.

При наличии в колесе дефекта отраженные от него эхо-сигналы регистрирующие ультразвуковым дефектоскопом (5), имеют иное время прохождения, не соответствующее полному времени прохода окружности

диска колеса. Соотношение амплитуд отраженного от дефекта и донного сигналов служит мерой глубины трещины в поверхности катания.

Использование предлагаемого способа, в частности излучателей типа «фазированных решеток» позволяет на ходу поезда обнаруживать трещины в дисках колес грузовых вагонов, различного пространственного расположения, а предлагаемый отдельный контроль дисков колес, например, вначале, на левой, а затем на правой стороне тележки, существенно повышает надежность и достоверность контроля.

Список литературы

1. Тен, Е. Е. Экспресс-диагностика колесных пар подвижного состава железных дорог / Е. Е. Тен. – Текст : непосредственный // Молодые ученые: материалы XIII краевого конкурса молодых ученых и аспирантов: в 2 томах. – Хабаровск : Изд-во Тихоокеанского гос. ун-та, 2011. – Т.2. – С. 204–208.

2. Буряк, С. Ю. Диагностирование состояния поверхности катания колеса подвижного состава железных дорог / С. Ю. Буряк. – Текст : электронный // КиберЛенинка: научная электронная библиотека: сайт. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/diagnostirovanie-sostoyaniya-poverhnosti-kataniya-kolesa-podvizhnogo-sostava-zheleznyh-dorog/> (дата обращения: 20.09.2020).

3. Контроль железнодорожных колес с использованием фазированных решеток // Olympus: официальный сайт. – URL: <https://www.olympus-ims.com/ru/applications/inspecting-train-wheels-using-phased-array/> (дата обращения: 10.09.2020). – Текст: электронный.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Матяш Юрий Иванович

Омский государственный университет
путей сообщения (ОмГУПС).
Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046,
Российская Федерация.
Доктор технических наук, профессор
кафедры «Вагоны и вагонное хозяйство».
Тел.: (3812) 31-06-72.
E-mail: vvh@omgups.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Yury Ivanovich Matias

Omsk State Transport University (OSTU).
35, Marx av., Omsk, 644046,
the Russian Federation.
Doctor of Technical Science, Professor of the
department “Cars and Cars Economy” OSTU.
Phone: (3812) 31-06-72.
E-mail: vvh@omgups.ru.

Кондратенко Евгений Владимирович
Омский государственный университет
путей сообщения (ОмГУПС).
Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046,
Российская Федерация.
К.т.н, доцент кафедры «Вагоны и вагонное
хозяйство» ОмГУПС.

Kondratenko Evgeni Vladimirovich
Omsk State Transport University (OSTU).
35, Marx av.m, Omsk, 644046,
the Russian Federation.
Ph.D in technical science, Associate Professor
of "Cars and cars economy" OSTU.

Брылова Татьяна Борисовна
Омский государственный университет
путей сообщения (ОмГУПС).
Маркса пр., д. 35, г. Омск 644046,
Российская Федерация.
К.т.н, доцент кафедры «Вагоны и
вагонное хозяйство» ОмГУПС.
Тел.: (3812) 31-06-72.
E-mail: biser65@mail.ru.

Brylova Tatyana Borysovna
Omsk State Transport University (OSTU).
35, Marx av.m, Omsk, 644046,
the Russian Federation.
Cand. Tech. Sci., the associate Professor of the
department "Cars and car economy" OSTU.
Phone: (3812) 31-06-72.
E-mail: biser65@mail.ru.

УДК 627.298

Р. Ф. Салихов, С. В. Савельев, И. А. Шутанов

Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ),
г. Омск, Российская Федерация

ТЕПЛОВОЙ МЕТОД КОНТРОЛЯ МОТОРНЫХ МАСЕЛ В ПРОЦЕССЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ ТРАНСПОРТНЫХ, ТРАНСПОРТНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ МАШИН

Рассмотрены основные виды и причины отказов КШМ дизельных ДВС транспортных и транспортно-технологических машин. Дано описание изменений кинематической вязкости моторного масла, а также рассмотрены факторы, оказывающие влияние на данный процесс. Особое внимание уделено попаданию эксплуатационных материалов в моторное масло. Предложены способы экспресс-диагностики моторного масла, позволяющие определить причину изменения его кинематической вязкости в процессе эксплуатации. Получены закономерности изменения кинематической вязкости моторного масла в зависимости от доли попадания в него различного вида эксплуатационных жидкостей.

Ключевые слова: моторное масло, эксплуатационная жидкость, экспресс-метод, кинематическая вязкость, скорость нагрева.

Rinat F. Salikhov, Sergey V. Savelyev, Ivan A. Shutanov

The Siberian State Automobile and Highway University (SibADI), Omsk, the Russian Federation

THERMAL METHOD FOR MONITORING ENGINE OILS DURING THE OPERATION OF TRANSPORT VEHICLES, TRANSPORT AND TECHNOLOGICAL MACHINES

The main types and causes of failures of crank mechanism diesel internal combustion engines of transport and transport-technological machines are considered. The description of changes in the kinematic viscosity of engine oil is given, as well as the factors influencing this process are considered. Special attention is paid to the ingress of operational materials into the engine oil. Methods of rapid diagnostics of engine oil are proposed to determine the cause of changes in its kinematic viscosity during operation. The regularities of changes in the kinematic viscosity of engine oil depending on the proportion of different types of operating fluids entering it are obtained.

Keywords: engine oil, operating fluid, Express method, kinematic viscosity, heating rate.

Данная статья посвящена развитию экспресс-методов контроля моторных масел. В настоящее время одним из актуальных вопросов является сокращение продолжительности поиска причин поломок дизельных ДВС, которые случаются в процессе эксплуатации транспортных и транспортно-технологических машин. Одним из важных мероприятий по выявлению причин выхода из строя ДВС является пробоотбор и лабораторный анализ масла. Как правило, для проведения анализа масла применяются стационарные лаборатории. Это требует потерь времени на его доставку и проведение технического контроля на сложном дорогостоящем оборудовании, что, в свою очередь, приводит к увеличению трудоемкости, продолжительности работы экспертов-техников, при выяснении причин выхода из строя ДВС. Таким образом, увеличивается продолжительность простоя техники, в результате чего предприятия теряют значительную часть прибыли. Для решения данных проблем предлагается устройство для диагностики масел, которое значительно снизит трудоемкость эксперта - техника при определении причин отказа двигателя внутреннего сгорания, что соответственно приведет к снижению простоев техники, финансовых потерь эксплуатационных предприятий.

В результате обработки статистических данных причин поломок ДВС КТТА-19 (производство фирмы «Cummins») самосвалов БелАЗ-7555 был

выявлен наиболее частый вид отказывающихся элементов КШМ ДВС - цилиндро-поршневая группа (рисунок1). Несмотря на данный факт, ущерб от отказа деталей сопряжения «вкладыш-шейка КВ», как правило, выше, по сравнению со стоимостью ремонта ЦПГ. Это связано, с тем, что наиболее частой причиной выхода из строя деталей ЦПГ, является выработка ресурса сопряжения «юбка поршня – стенка гильзы», что приводит к переходу на следующей ремонтный размер, сам ремонт прогнозируем и имеет плановый характер. Хотя в практике эксплуатации нередко случается и внеплановые отказы, связанные с образованием задиров на гильзе блока цилиндров, поршнях. Отказ отдельной ЦПГ может быть устранен ее заменой.

Проворачивание вкладышей относительно шейки КВ (коленчатого вала) приводит к изгибу коленчатого вала, невозстановливаемым задиром на его шейках и замене всего коленчатого вала. Ремонт таких дорогостоящих деталей производится все меньше. Зарубежные производители несмотря на увеличенный ресурс данной детали не предусматривают его ремонт, а только замену.

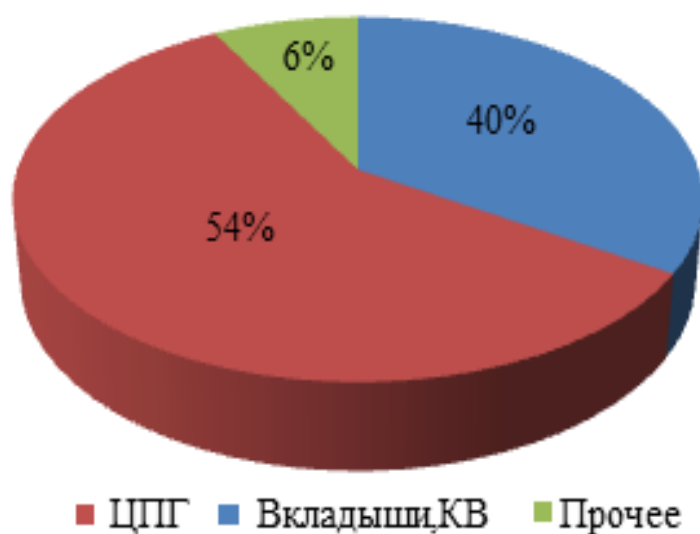


Рисунок 1 – Статистика проведения ремонтов по причине выхода из строя ЦПГ и вкладышей, КВ дизельного ДВС

На рисунке 2 показан износ шатунного подшипника скольжения двигателя марки КТТА-19 (производство фирмы «Cummins») самосвалов БелАЗ-7555 [2].

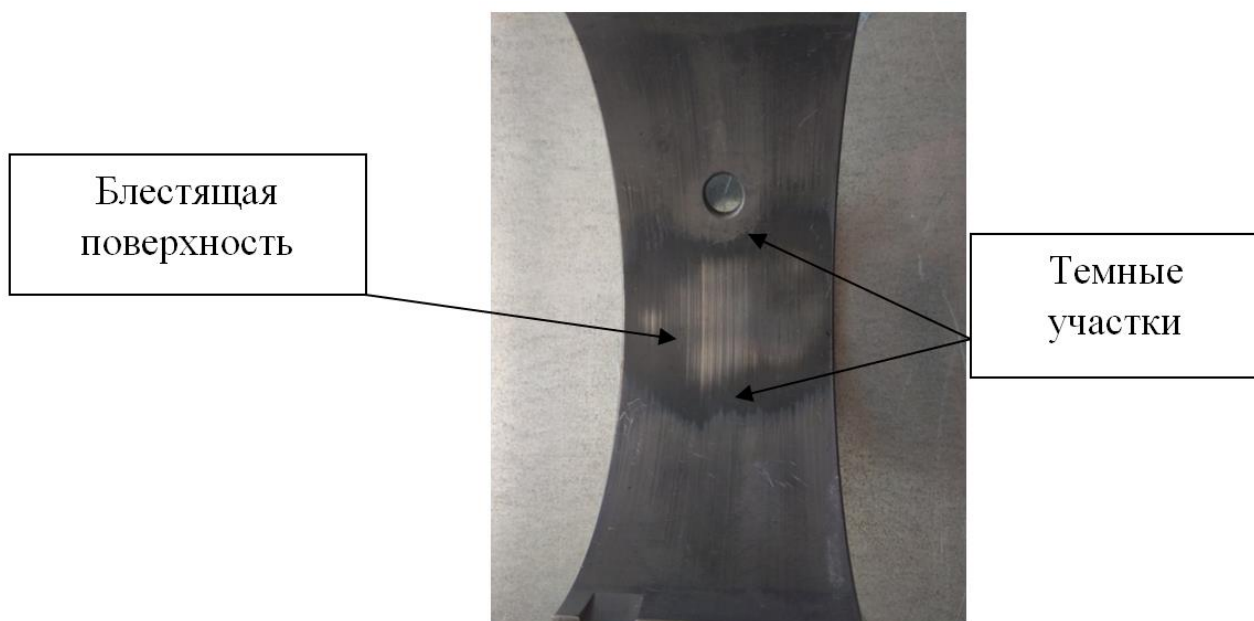


Рисунок 2 – Изнашивание шатунного вкладыша фирмы «Mahle», вызванное попаданием инородных тел в зону трения, снижением кинематической вязкости моторного масла

В данном случае причиной изнашивания подшипника скольжения (вкладыша) является попадание инородных тел в зону трения, падение кинематической вязкости моторного масла на 16 %, в результате чего данный подшипник недополучал смазочный материал в зону трения. Данный процесс носит название «масляное голодание»[4].

На изменение кинематической вязкости моторного масла оказывают попадание в него: антифриза, воды, топлива.

Попадание в моторное масло хотя бы одного из видов жидкости в избыточном количестве ухудшает его свойства. Так как может стать одной из причин интенсивного изнашивания трущихся деталей в двигателе.

Проведение анализа технического состояния моторного масла достаточно важная процедура, которая может дать эксперту информацию о том, что в одной из систем двигателя существует неисправность, которая оказывает существенное влияние на работоспособность агрегата. Если в масло попадало топливо, то эксперт-техник, после проведения анализа моторного масла, уделит особое внимание техническому контролю параметров элементов системы питания. В большинстве случаев попадание топлива в масло, связано с нарушениями в работе форсунок и других элементов системы питания или использованием некачественного топлива[3].

Анализ моторного масла достаточно долгий и трудоемкий процесс. Для сокращения трудоемкости предлагается измерять такой параметр, как скорость (интенсивность) нагрева моторного масла.

На рисунке 3 представлены исследования, которые показывают зависимость скорости нагрева моторного масла от концентрации различных эксплуатационных жидкостей (вода, охлаждающая жидкость, топливо) в масле. Для эксперимента использовалось моторное масло Idemitsu 5w30 с кинематической вязкостью 10,24 сСт при 100°С.

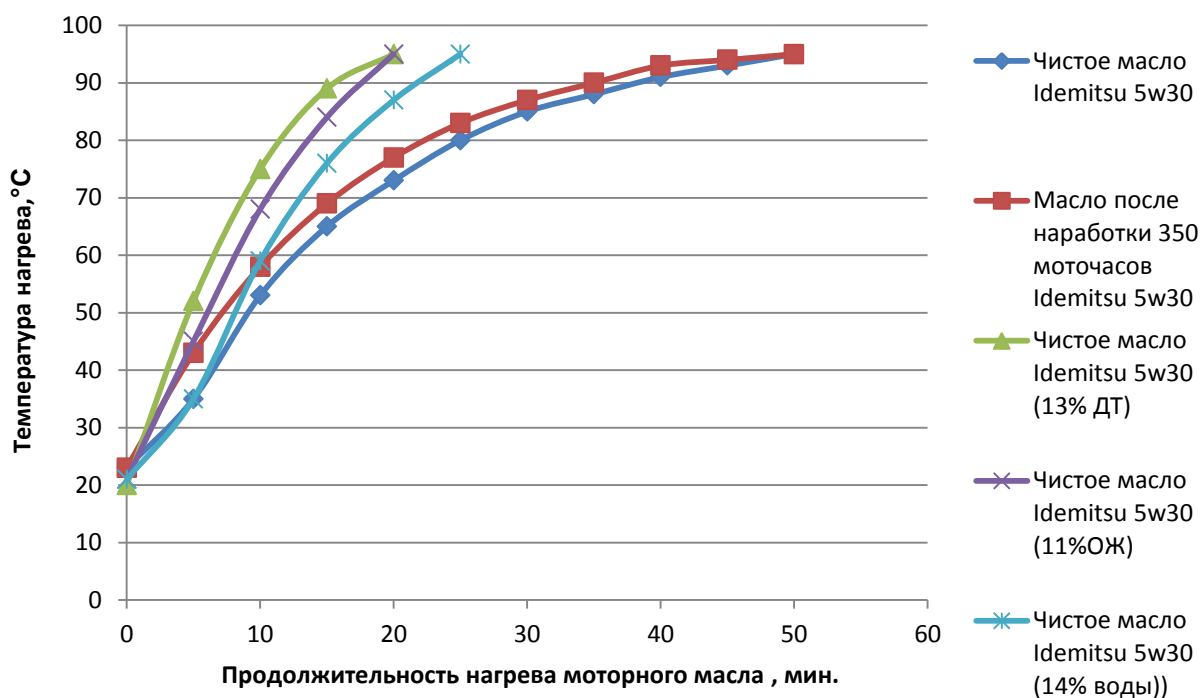


Рисунок 3 – Зависимость продолжительности нагрева моторного масла от его температуры с различной концентрацией эксплуатационных жидкостей (вода, охлаждающая жидкость, топливо)

Проведенные исследования говорят о том, что содержание примесей (топливо, антифриз, вода) в моторном масле оказывает значительное влияние на скорость нагрева моторного масла. Чистое моторное масло нагревается до температуры 95°С, значительно медленнее, чем моторное масло, в котором присутствует топливо, антифриз, вода. Однако масло, в котором присутствует топливо, нагревается намного быстрее, чем масло, в котором присутствует антифриз или вода. Это объясняется тем, что топливо имеет большее значение теплопроводности и поэтому оно начинает более интенсивно нагреваться, чем

моторное масло [5]. При попадании в моторное масло антифриза или воды ситуация обратная. Антифриз и вода имеют более высокое значение теплоемкости, чем топливо, поэтому интенсивность их нагрева будет меньше.

В подтверждении вышесказанного был проведен сравнительный анализ скорости нагрева смеси дизельного топлива (ДТ) и моторного масла с различной долей их соотношения и построена графическая зависимость (рисунок 4).

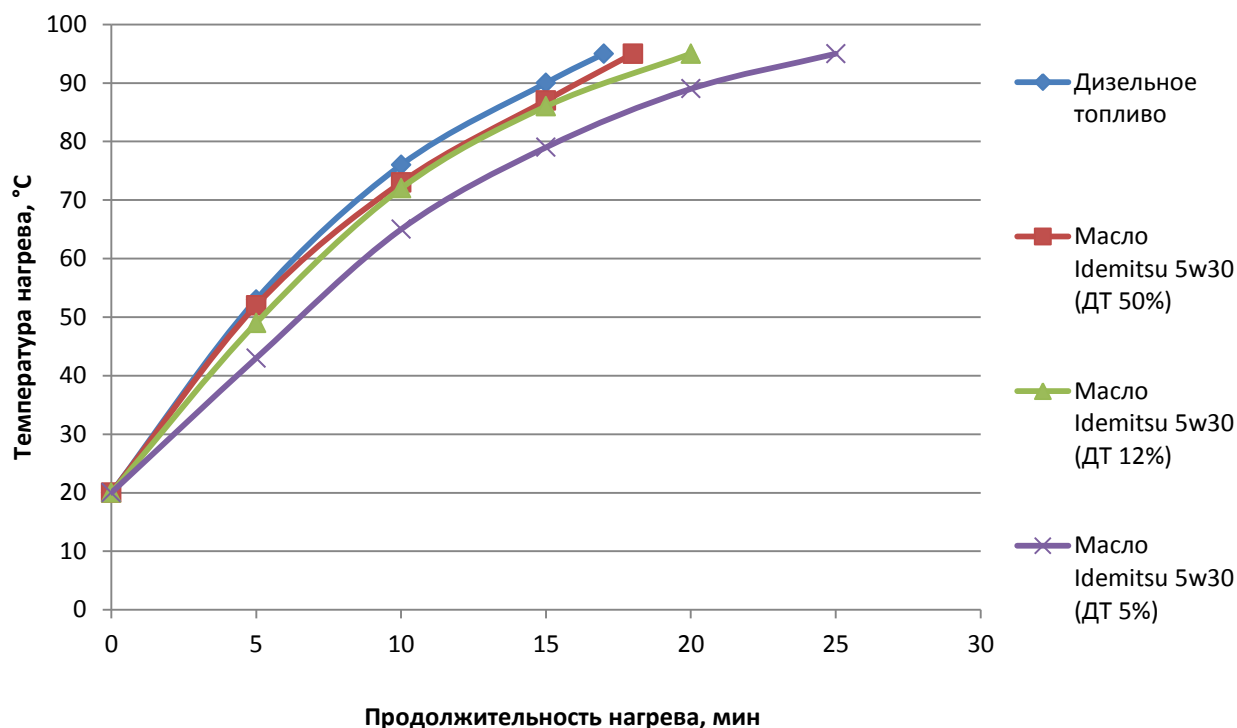


Рисунок 4 – Зависимость продолжительности нагрева от температуры смеси ДТ и моторного масла

По результатам проведенного исследования можно сделать вывод о том, что ДТ резко изменяет интенсивность нагрева при доле попадания его свыше 5% в моторное масло, однако чем меньше доля содержания дизельного топлива в моторном масле, тем меньше скорость (интенсивность) нагрева смеси эксплуатационных жидкостей.

В итоге результаты проведенных исследований и выявленные закономерности свидетельствует о том, что такой параметр, как интенсивность нагрева моторного масла является информативным параметром, внедрение которого позволит сократить трудоемкость по анализу моторного масла и выявлению причины поломки ДВС.

В результате проведенных исследований, выявленные закономерности свидетельствует о том, что для оценки состояния моторного масла, помимо измерения вязкости моторного масла, необходимо проводить замер такого параметра, как интенсивность нагрева моторного масла, который позволит определять наличие эксплуатационных жидкостей в моторном масле. Применение и внедрение предлагаемого устройства позволяет снизить продолжительность поиска причины аварийной поломки и простои транспортно-технологических, транспортных машин.

Список литературы

1. Автомобильные двигатели / под. ред. М. С. Ховаха. – Москва : Машиностроение, 1977. – 591 с. – Текст : непосредственный.
2. Основы теории и конструирования автомобильных двигателей / М. Д. Артамонов [и др.]. – Москва : Высшая школа, 1976. – 132 с. – Текст : непосредственный.
3. Хрулев, А. Э Влияние неисправностей в системе смазки на характер повреждения подшипников ДВС / А. Э Хрулев, М. В. Кротов. – Текст : непосредственный // Двигатели внутреннего сгорания. – 2018. – №1. – С. 74–81.
4. Нигматуллин, Р. Г. Диагностика ДВС по анализу моторного масла / Р. Г. Нигматуллин, В. Р. Нигматуллин, И. Р. Нигматуллин. – Уфа : Уфимский полиграфкомбинат, 2011. – 297 с. – Текст : непосредственный.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Салихов Ринат Фокилевич

Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ).

Мира пр., д. 5, г. Омск, 644001,

Российская Федерация,

Кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Эксплуатация и сервис транспортно-технологических машин и комплексов в строительстве» СибАДИ.

Тел.: +7(3812) 65-07-66.

Email: salikhorinat@yandex.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Salihov Rinat Pokhilevich

The Siberian State Automobile and Highway University (SibADI).

Mira Ave., 5, Omsk, 644001,

the Russian Federation.

Candidate of technical Sciences, associate Professor, associate Professor of the Department "Operation and service of transport and technological machines and complexes in construction" SibADI.

Phone: +7(3812) 65-07-66.

Email: salikhorinat@yandex.ru.

Савельев Сергей Валерьевич

Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ).

Мира пр., д. 5, г. Омск, 644001,

Российская Федерация,

Доктор технических наук, доцент,
профессор кафедры «Эксплуатация и сервис
транспортно-технологических машин и
комплексов в строительстве» СибАДИ.

Тел.: +7(3812) 65-07-66.

Email: saveliev_sergval@mail.ru

Savel'yev Sergey Valer'yevich

The Siberian State Automobile and Highway
University (SibADI).

Mira Ave., 5, Omsk, 644001,

the Russian Federation.

Doctor of technical Sciences, associate Professor,
Professor of the Department "Operation and
service of transport and technological machines
and complexes

in construction" SibADI.

Phone : +7(3812) 65-07-66

Email: saveliev_sergval@mail.ru

Шутанов Иван Александрович

Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ).

Мира пр., д. 5, г. Омск, 644001,

Российская Федерация,

Магистрант кафедры «Эксплуатация
и сервис транспортно-технологических
машин и комплексов в строительстве»
СибАДИ.

Тел.: +79236850315.

Email: temamontana97@mail.ru.

Shatunov Ivan Aleksandrovich

The Siberian State Automobile and Highway
University (SibADI).

Mira Ave., 5, Omsk, 644001,

the Russian Federation.

Master's

student of the Department "Operation and service
of transport and technological machines and
complexes in construction" SibADI.

Phone : +79236850315.

Email: temamontana97@mail.ru.

Секция 2 «Измерения, контроль и диагностирование в системах электроснабжения, энергетике и электротехнических комплексах»

УДК 621.314.212:620.111.3

А. А. Кузнецов, М. А. Волчанина, А. В. Горлов

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

**МОБИЛЬНОЕ УСТРОЙСТВО ИМИТАЦИИ ДЕФЕКТОВ
ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ИЗОЛЯЦИИ**

В статье приведено описание устройства имитации дефектов для совместного использования акустического контроля высоковольтных трансформаторов. Приведена структурная схема устройства имитации дефектов. Предложенное устройство вырабатывает высоковольтные импульсы, имитирующие различные дефекты изоляции высоковольтных трансформаторов.

Ключевые слова: высоковольтные трансформаторы, диагностирование изоляции, акустический метод, устройство имитации дефектов.

Andrey A. Kuznetsov, Maria A. Volchanina, Anton V. Gorlov

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

**MOBILE DEVICE FOR IMITATION DEFECTS OF ELECTRIC
INSULATION**

The article describes a device for simulating defects for joint use of acoustic control of high-voltage transformers. The block diagram of the device for imitation of defects is presented. The proposed device generates high-voltage pulses that simulate various defects in the insulation of high-voltage transformers.

Keywords: high-voltage transformers, traction power supply, insulation parameters diagnostics of high voltage transformers, acoustic method, partial discharges, device for imitation defects.

При диагностировании силовых трансформаторов в системе электроснабжения железных дорог используется достаточно большое

количество методов электрического и неразрушающего контроля. Применение акустических методов позволяет выполнить локацию мест возникновения и наличия дефектов изоляции при работе силовых трансформаторов. Применение средств акустического контроля существенно повышает достоверность и быстродействие применяемого в настоящее время хроматографического метода контроля растворенных газов в трансформаторном масле.

Недостатками применяемых акустических методов при контроле трансформаторов и другого высоковольтного оборудования является распознавание вида контролируемого дефекта и локация места его положения.

При помощи метода акустического контроля возможна регистрация частичных разрядов (ЧР), регистрация их количества в единицу времени, регистрация амплитуд и формы сигналов. По каждому событию возможен визуальный анализ, подтверждающий наличие именно ЧР и их параметров. Кроме того по разности времени прихода сигналов к датчикам акустической антенны, установленных на корпусе трансформатора, возможно установление координат предполагаемого места возникновения ЧР.

Для устранения указанных выше недостатков было предложено использование устройства имитации дефектов в маслонаполненном оборудовании. При использовании устройства имитации дефектов в методике акустического контроля измерения параметров акустических сигналов выполняются в одинаковых условиях на имитаторе и контролируемом оборудовании. Снижаются дополнительные погрешности, вызываемые влиянием окружающей среды и возможные изменения коэффициентов усиления измерительного тракта в различные интервалы времени при проведении контроля.

Структурная схема устройства имитации дефектов представлена на рисунок 1.

Устройство вырабатывает высоковольтные импульсы, имитирующие различные дефекты изоляции высоковольтных трансформаторов. Электронный коммутатор (ЭК) подает на высоковольтный трансформатор (ВТ) постоянное напряжение с задержкой, формируемой конденсатором в его составе. На электрический разрядник (ЭР) поступают высоковольтные импульсы с частотой, вырабатываемой генератором тактовых импульсов (ГТИ) в интервале от 0 до 10 кГц. Электрический разрядник может работать в различных средах – воздух или трансформаторное масло.

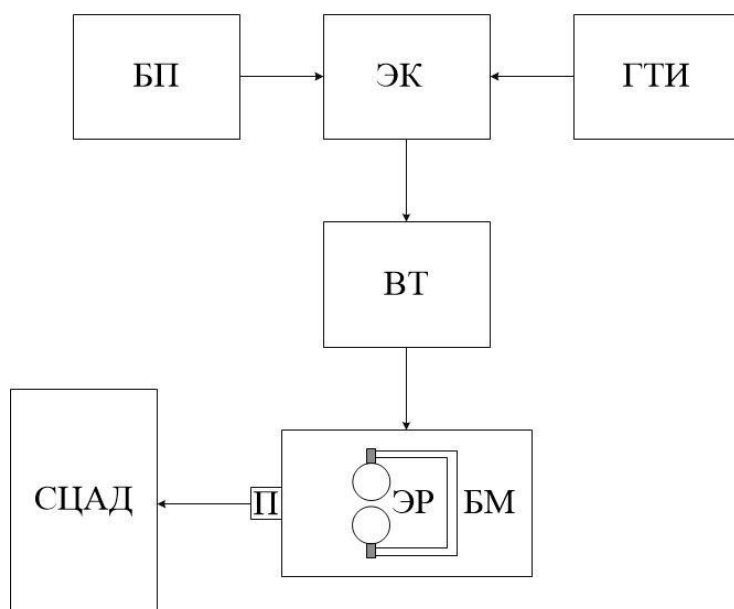


Рисунок 1 – Структурная схема устройства имитации дефектов:

БП – блок питания; ЭК – электронный коммутатор; ГТИ – генератор тактовых импульсов;
 ВТ – высоковольтный трансформатор; СЦАД – система цифровая акустико-эмиссионная
 диагностическая; П – преобразователь акустический; ЭР – электрический разрядник;
 БМ – бак маслonaполненный

На рисунке 2 показана схема расположения электрического разрядника в масляном баке. Для дозирования мощности разряда выполнялось регулирование постоянного напряжения БП и расстояние между электродами ЭР – Δn при помощи регулирующего механизма на кронштейне 4.

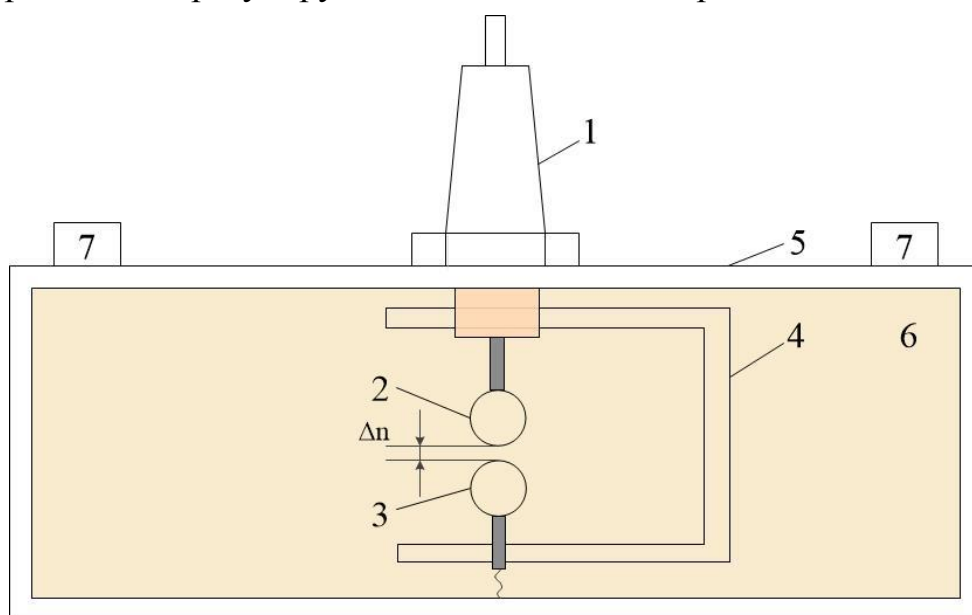


Рисунок 2 – Схема расположения электрического разрядника в масляном баке:

1 – изолятор; 2,3 – электроды; 4 – кронштейн; 5 – корпус маслonaполненного бака;
 6 – трансформаторное масло; 7 – преобразователь акустический

Корпус имитатора дефектов выполнен из стали и к нему подключен один из электродов разрядника ЭР и нулевой потенциал БП. Колебания звуковой волны воспринимают четыре акустических преобразователя П, представляющих собой акустическую антенну.

Схема расположения преобразователей акустических и электрического разрядника на верхней крышке устройства приведена на рисунке 3.

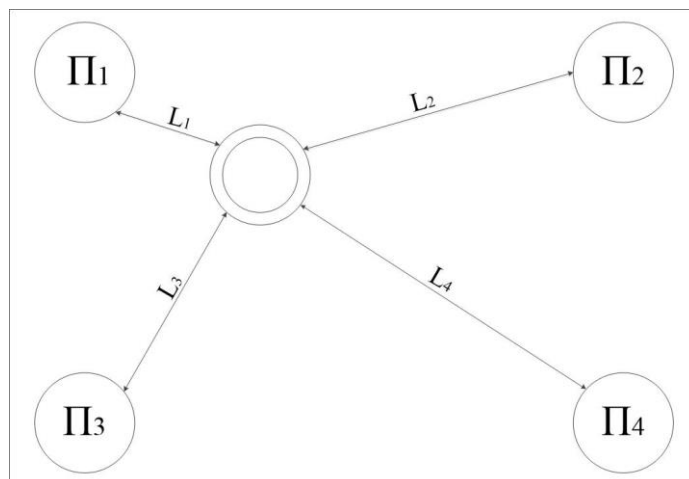


Рисунок 3 – Схема расположения преобразователей акустических и электрического разрядника

Акустические преобразователи $\Pi_1 - \Pi_4$ располагали на верхней крышке устройства имитации дефектов на различном расстоянии $L_1 - L_4$ от ЭР. При помощи системы акустической типа СЦАД-16 были зарегистрированы импульсы различной мощности при различной частоте следования. В программном обеспечении зарегистрированы сигналы, состоящие из двух составляющих – электрические разряды и колебания металлического корпуса от их воздействия. По разности времен прихода импульсов определены координаты источника образцовых импульсов.

Совместное использование имитатора дефектов со средствами контроля позволит с большей достоверностью распознавать тип дефекта и его мощность.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-38-90231.

Список литературы

1. Enhanced partial discharge location determination for transformer insulating oils considering allocations and uncertainties of acoustic measurements / B. M. Tahaab, Sobhy S. Dessouky, N. R. Ghalyd, S. M. Ghoneim. – Text: direct // Alexandria Engineering Journal. – 2020. – №59.

2. МУ 1.3.3.99.0038-2009 Диагностика силовых трансформаторов, автотрансформаторов, шунтирующих реакторов и их вводов : утверждён приказом № 126-ук от 17.01.2009 ОАО «Концерн Росэнергоатом» : принят департаментом инженерной поддержки / разработан ООО «Диагностические комплексы и системы». – Методические указания ОАО «Концерн Росэнергоатом». – 73 с. – Текст : непосредственный.

3. Определение пороговых значений при диагностировании изоляции высоковольтного оборудования методами регистрации частичных разрядов / А. А. Кузнецов, А. Ю. Кузьменко, М. А. Кузнецова, А. В. Симаков. – Текст : непосредственный // Омский научный вестник. – 2019. – № 2 (164). – С. 30–35. – DOI: 10.25206/1813-8225-2019-164-30-35.

4. Повышение точности средств аналитического контроля при обеспечении идентичных условий испытаний / А. А. Кузнецов, А. С. Брюхова, К. В. Усачева, Д. С. Муравьев. – Текст : непосредственный // Омский научный вестник. – 2017. – №6 (156). – С. 116–121.

5. Пат. 134319 Российская Федерация, МПК G 01 J 3/50. Спектрометр с блоком обработки данных влияющих факторов : № 2013104150/28; заявлено 31.01.13; опубликовано 10.11.13 / Кузнецов А. А., Слептерев В. А., Шахов А. В.; панетнообладатель ОмГУПС (ОМИИТ). – Текст : непосредственный.

6. Кузнецов, А. А. Исследование факторов влияющих на результаты измерения интенсивностей при спектральном анализе материалов / А. А. Кузнецов, О. Б. Мешкова, В. А. Слептерев. – Текст : непосредственны // Омский научный вестник. – 2011. – №3 (103). – С. 243–246.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Кузнецов Андрей Альбертович

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046,

Российская Федерация.

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

Тел.: +7 (3812) 31-06-33.

E-mail: kuznetsovaa.omgups@gmail.com.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Kuznetsov Andrey Albertovich

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx st., Omsk, 644046,

the Russian Federation.

Doctor of Technical Science, Professor, head of the department «Theoretical electrical engineering» OSTU.

Phone: +7 (3812) 31-06-33.

E-mail: kuznetsovaa.omgups@gmail.com.

Волчанина Мария Андреевна

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046,

Российская Федерация.

Аспирант кафедры «Подвижной состав электрических железных дорог» ОмГУПС.

Тел.: 8-983-116-10-84.

E-mail: kuznetcova994@gmail.com.

Volchanina Maria Andreevna

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx st., Omsk, 644046,

the Russian Federation.

Postgraduate student of the department «Rolling stock of electric Railways» OSTU.

Phone: 8-983-116-10-84.

E-mail: kuznetcova994@gmail.com.

Горлов Антон Вячеславович

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046,

Российская Федерация.

Аспирант кафедры «Теоретическая электротехника» ОмГУПС.

Тел.: 8-913-655-87-88.

E-mail: anton.gorlov@mail.ru.

Gorlov Anton Vyachaslavovich

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx st., Omsk, 644046,

the Russian Federation.

Postgraduate student of the department «Theoretical electrical engineering» OSTU.

Phone: 8-913-655-87-88.

E-mail: anton.gorlov@mail.ru.

УДК 621.331: 621.311: 621.372.21

Т. В. Ковалева, О. О. Комякова, Н. В. Пашкова

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС),

г. Омск, Российская Федерация

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПРОЦЕССОВ В ТЯГОВОЙ СЕТИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА С УЧЕТОМ РЕЗОНАНСНЫХ ЯВЛЕНИЙ

В статье проведен анализ электромагнитных процессов в электроэнергетических системах при различной нагрузке с учетом распределенного характера параметров тяговой сети, который является одной из причин возникновения резонансных явлений. Анализ полученных зависимостей показывает, что на наличие резонанса влияет длина участка тяговой сети, параметры линии и характер нагрузки.

Ключевые слова: резонансные явления, электромагнитные процессы, тяговая сеть переменного тока, электрические железные дороги.

RESEARCH OF ELECTROMAGNETIC PROCESSES IN AC DRIVE NETWORK TAKING INTO ACCOUNT RESONANT PHENOMENA

The article analyzes the electromagnetic processes in electric power systems at different loads, taking into account the distributed nature of the parameters of the traction network, which is one of the causes of resonance phenomena. An analysis of the obtained dependences shows that the presence of resonance is affected by the length of the section of the traction network, line parameters, and the nature of the load.

Keywords: resonance, electromagnetic processes, traction network of alternating current, electric railways.

Одним из факторов отрицательно влияющим на работу объектов энергетической инфраструктуры железной дороги, является наличие резонансных явлений в тяговой сети переменного тока.

Резонансы в тяговой сети ухудшают качество напряжения и тока, тем самым увеличивают мешающие влияния и могут привести к повреждению электрооборудования. Одной из причин возникновения резонансов является распределенный характер параметров тяговой сети, проявляющийся на частотах выше 500 Гц [1, 2].

Перенапряжения, которые возникают на токоприемнике электровоза, являются одной из причин аварий системы электроснабжения. К режимным перенапряжениям относятся такие, которые вызваны резонансными явлениями, связанными с распределенным характером параметров тяговой сети. Резонансные перенапряжения могут значительно превышать амплитуду питающего синусоидального напряжения. Эти явления приводят к ускоренному старению изоляции электрооборудования электровозов (ЭПС) и могут вызывать нарушения в работе системы управления тиристорного преобразователя. Кроме резонансов напряжений могут наблюдаться резонансы токов, которые приводят к неисправности фильтрокомпенсирующих устройств (ФКУ) и оказывают негативное влияние на работу рельсовых цепей на высоких частотах (более 1 кГц) [3, 4].

Схема замещения тяговой сети, приведенная на рисунок 1, содержит в качестве нагрузки сопротивления электровоза и фильтрокомпенсирующего устройства. Источником несинусоидальной ЭДС является тяговая подстанция.

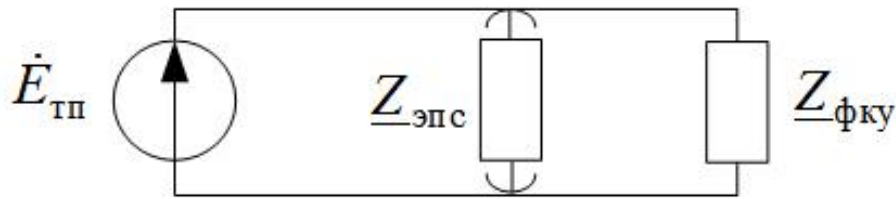


Рисунок 1 – Схема замещения участка тяговой сети

К первичным параметрам тяговой сети относятся r_0 , g_0 , L_0 , C_0 . Поперечная проводимость g_0 зависит от частоты, для линий напряжением меньше 330 кВ принимается равной нулю [1]. Тяговую сеть на высоких частотах (более 500 Гц) обычно рассматривают как линию без потерь ($r_0 = 0$). Как правило, первичные параметры для участков тяговой сети железных дорог определяются экспериментально. В дальнейших расчетах использованы $L_0 = 1,33 \cdot 10^{-3}$ Гн/км; $C_0 = 17 \cdot 10^{-9}$ Ф/км.

Входное сопротивление тяговой сети зависит от частоты гармоник питающего напряжения и определяется по выражению

$$\underline{Z}_{\text{вх}} = \underline{Z}_{\text{в}} \frac{1 + \underline{\rho} e^{-2\gamma l}}{1 - \underline{\rho} e^{-2\gamma l}}, \quad (1)$$

где $\underline{Z}_{\text{в}} = \sqrt{(r_0 + j\omega L_0) / (g_0 + j\omega C_0)}$ – волновое сопротивление;

$\gamma = \sqrt{(r_0 + j\omega L_0)(g_0 + j\omega C_0)} = \alpha + j\beta$ – коэффициент распространения;

α – коэффициент затухания (для линии без потерь $\alpha = 0$);

β – коэффициент фазы;

$\underline{\rho} = \frac{\underline{Z}_{\text{н}} - \underline{Z}_{\text{в}}}{\underline{Z}_{\text{н}} + \underline{Z}_{\text{в}}} = \rho e^{j\psi}$ – коэффициент отражения;

$\underline{Z}_{\text{н}}$ – сопротивление нагрузки.

Входное сопротивления $\underline{Z}_{\text{вх}}$ зависит от длины линии l .

Выражение (1) преобразуем к следующему виду

$$\underline{Z}_{\text{вх}} = \underline{Z}_{\text{в}} \frac{1 + \rho e^{-j(2\beta l - \psi)}}{1 - \rho e^{-j(2\beta l - \psi)}}, \quad (2)$$

Из выражения (2) следует, что $\underline{Z}_{\text{вх}}$ принимает минимальное и максимальное значение при $e^{-j(2\beta l - \psi)}$, равном соответственно -1 и 1. Этим значениям соответствует аргумент функции:

$$2\beta l_p - \psi = \pm n\pi \quad \text{при } e^{-j(2\beta l - \psi)} = -1 \quad (n = 1, 3, 5 \dots);$$

$$2\beta l_p - \psi = \pm 2n\pi \quad \text{при } e^{-j(2\beta l - \psi)} = 1 \quad (n = 0, 1, 2 \dots),$$

где l_p – резонансная длина линии на определенной частоте.

Минимум зависимости $\underline{Z}_{\text{вх}}(l)$ соответствует резонансу напряжений, максимум – резонансу токов [5]. Каждый резонанс возникает на определенной длине линии. Для каждой частоты резонансная длина различная. Значения напряжения или тока в точках соответствующего резонанса превосходят их значения в начале линии.

Зависимость входного сопротивления участка тяговой сети от частоты гармоники питающего напряжения при различной его протяженности (38 км, 50 км) и характере нагрузки (ЭПС; ЭПС и ФКУ) приведены на рисунок 2.

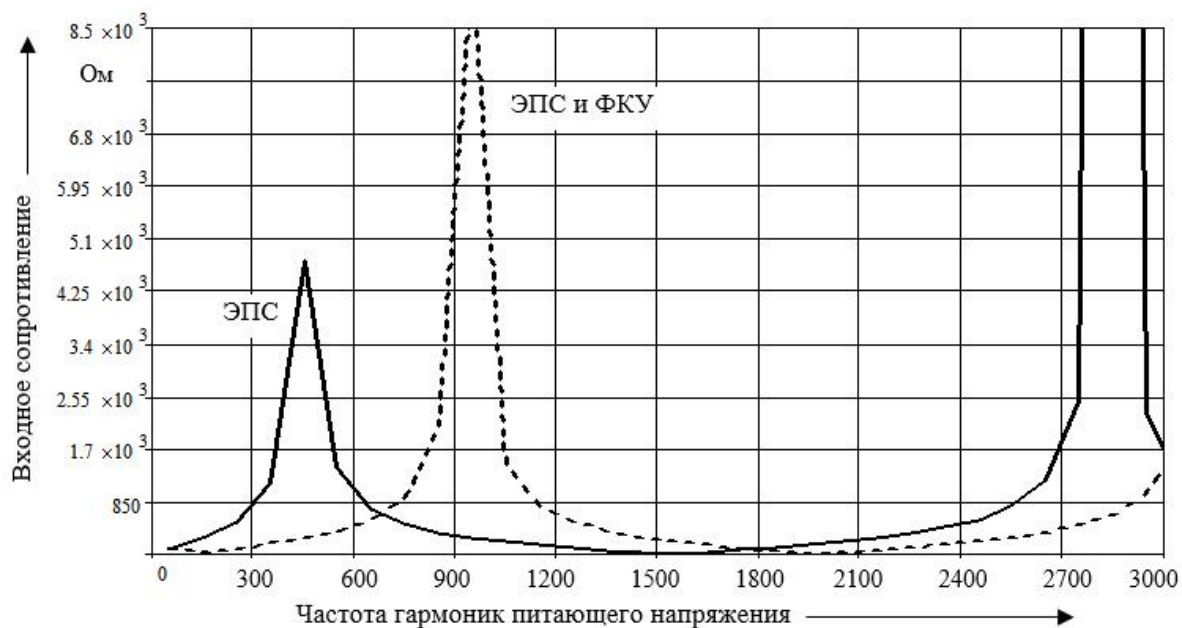
Полученные зависимости имеют локальные минимумы и максимумы. На рисунке 2а при частоте 450 Гц наблюдается первый максимум характеристики $\underline{Z}_{\text{вх}}(f)$ при характере нагрузки электровоз, который соответствует резонансу токов. Если к электровозу подключить дополнительно ФКУ, то этот максимум сдвинется вправо на частоту 1 кГц. Таким образом, характер нагрузки тяговой сети влияет на появление локальных максимумов и минимумов входного сопротивления при определенной частоте.

Локальным минимумам и максимумам входного сопротивления соответствуют резонансные длины $l_{\text{рн}}$ и $l_{\text{рт}}$:

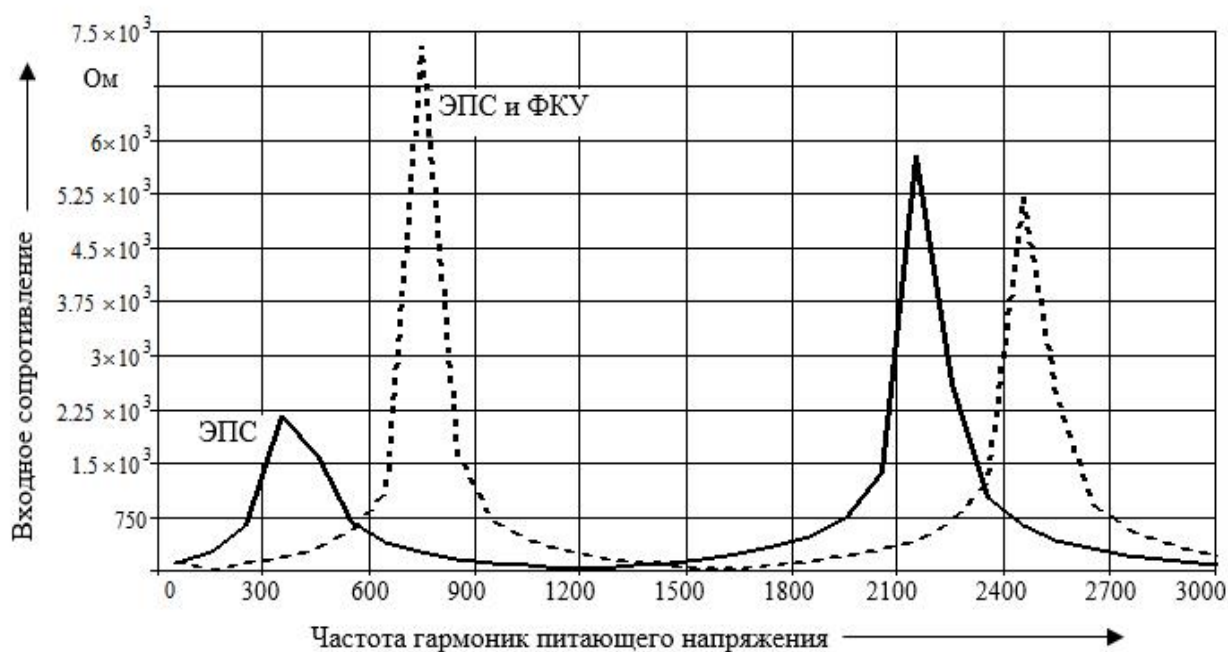
$$l_{\text{рн min}} = \frac{\pi + \psi}{2\beta} \quad \text{– минимальная длина линии при резонансе напряжений;}$$

$$l_{\text{рт min}} = \frac{\psi}{2\beta} \quad \text{– минимальная длина линии при резонансе токов.}$$

Анализ приведенных на рисунке 2 зависимостей показал, что максимумы и минимумы входного сопротивления при одинаковом характере нагрузки тяговой сети сдвигаются в сторону высоких частот при уменьшении резонансных длин $l_{\text{рн min}}, l_{\text{рт min}}$.



а



б

Рисунок 2 – Частотная зависимость входного сопротивления при различном характере нагрузки (а – длина участка тяговой сети 38 км, б – 50 км)

Возможность появления резонансов с повышенными напряжениями и токами на определенной частоте характеризуют соответственно коэффициенты кратности $\eta_{рн}$, $\eta_{рт}$, которые в этом случае подчиняются неравенствам:

$$\begin{cases} \eta_{\text{рн}} = \left| \frac{1 - \underline{\rho} e^{-2j\beta l_{\text{рн min}}}}{1 - \underline{\rho} e^{-2j\beta l_{\text{рн min}}}} \right| \leq 1; \\ \eta_{\text{рт}} = \left| \frac{1 + \underline{\rho} e^{-2j\beta l_{\text{рт min}}}}{1 - \underline{\rho} e^{-2j\beta l_{\text{рт min}}}} \right| \leq 1. \end{cases} \quad (3)$$

При соблюдении неравенств (3) наложение волн напряжения и тока преобладает над их затуханием.

Частотная характеристика коэффициента кратности резонанса напряжений участка тяговой сети, нагруженного на ЭПС, при различной его протяженности (38 км, 50 км) приведена на рисунке 3.

Из анализа частотных характеристик можно сделать вывод о том, что с уменьшением резонансной длины $l_{\text{рн min}}$ участка тяговой сети при неизменной нагрузке, вероятность возникновения резонанса напряжений смещается в сторону высоких частот.

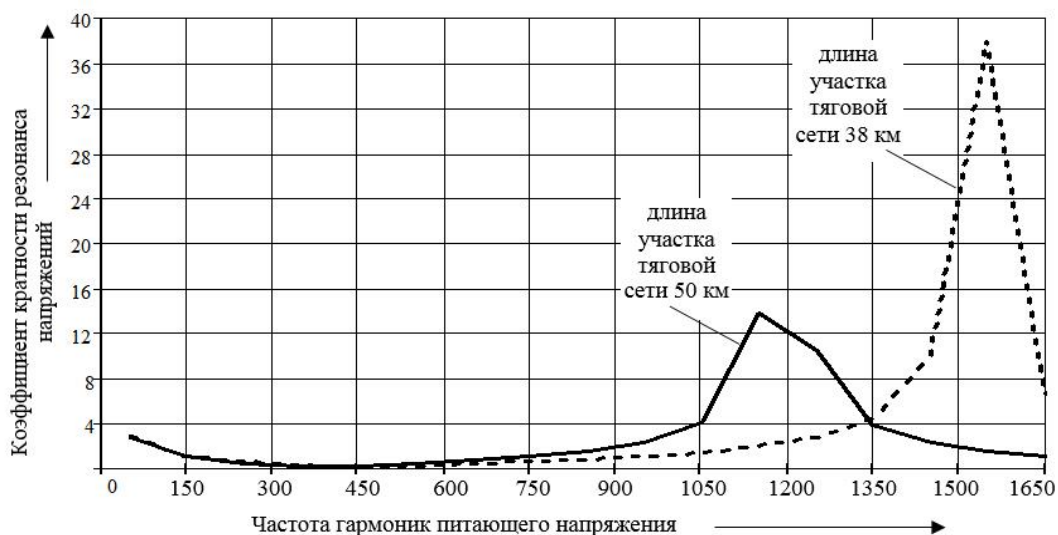


Рисунок 3 – Частотная характеристика коэффициента кратности резонанса напряжений

Проведенные исследования и полученные результаты расчета частотных характеристик входных сопротивлений тяговой сети и коэффициентов кратности напряжения и токов дают возможность проанализировать влияние длины линии и характера нагрузки на наличие резонансов.

Рассмотрение электромагнитных процессов в тяговой сети с учетом волновых явлений позволит определить вероятность возникновения резонансов на определенных частотах и предотвратить их негативное влияние на смежные устройства и работу ЭПС.

Список литературы

1. Ковалева, Т. В. Зависимость волновых процессов в тяговой сети переменного тока от параметров системы электроснабжения / Т. В. Ковалева, О. О. Комякова, Н. В. Пашкова. – Текст : непосредственный // Омский научный вестник. – 2019. – № 3 (165). – С. 23–27.
2. Сташков, И. А. Многофункциональные фильтрокомпенсирующие устройства для повышения качества электроэнергии в электроэнергетических системах с тяговой нагрузкой : специальность 05.14.02 «Электрические станции и электроэнергетические системы» : автореферат диссер. на соискание ученой степени к. т. н. / Сташков Иван Анатольевич ; Красноярский институт железнодорожного транспорта. – Красноярск, 2016. – 21 с. – Текст : непосредственный.
3. Сиромаха, С. С. О необходимости учета режима работы и импеданса системы электроснабжения при моделировании резонанса токов / С. С. Сиромаха, Д. С. Осипов, В. Т. Черемисин. – Текст : непосредственный // Современные проблемы науки и образования. – 2014. – № 5.
4. Бялонь, А. Влияние резонансов в контактной сети на допускаемые параметры помех / А. Бялонь, Д. Адамски, Ю. Фурман // Електрифікація транспорту. – 2016. – № 11. – С. 116–121.
5. Зажирко, В. Н. Некоторые резонансные свойства однородной двухпроводной линии в несинусоидальном периодическом режиме / В. Н. Зажирко // Улучшение качества и снижение потерь электрической энергии в системах электроснабжения железных дорог : межвуз. темат. сб. науч. тр. / Омская гос. акад. путей сообщения. – Омск, 1995. – С. 35–40.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Ковалева Татьяна Владимировна

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046,

Российская Федерация.

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Теоретическая электротехника» ОмГУПС.

Тел.: (3812) 31-06-88.

E-mail: tatevgeniy@list.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Kovaleva Tatiana Vladimirovna

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx st., Omsk, 644046,

the Russian Federation.

Cand. Tech. Sci., the senior lecturer of the department «Theoretical the electrical engineer» OSTU.

Phone: (3812) 31-06-88.

E-mail: tatevgeniy@list.ru

Комякова Ольга Олеговна

Омский государственный университет путей
сообщения (ОмГУПС).

Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046,

Российская Федерация.

Кандидат технических наук, доцент кафедры
«Теоретическая электротехника» ОмГУПС.

Тел.: (3812) 31-06-88.

E-mail: komyakovaoo@mail.ru.

Komyakova Olga Olegovna

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx av., Omsk 644046,

the Russian Federation.

Cand. Tech. Sci., the senior lecturer of the
department «Theoretical the electrical
engineer» OSTU.

Phone: (3812) 31-06-88.

E-mail: komyakovaoo@mail.ru.

Пашкова Наталья Викторовна

Омский государственный университет путей
сообщения (ОмГУПС)

Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046,

Российская Федерация.

Кандидат технических наук, доцент кафедры
«Теоретическая электротехника» ОмГУПС.

Тел.: (3812) 31-06-88.

E-mail: nvp78@mail.ru.

Pashkova Natalia Viktorovna

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx av., Omsk 644046,

the Russian Federation.

Cand. Tech. Sci., the senior lecturer of the
department «Theoretical the electrical
engineer» OSTU.

Phone: (3812) 31-06-88.

E-mail: nvp78@mail.ru.

УДК 621.311.001

С. Н. Чижма, С. В. Молчанов, И. В. Стригин

Балтийский федеральный университет им. И. Канта (БФУ им. И. Канта),

г. Калининград, Российская Федерация

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ЛИНИИ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ С
ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СИНХРОННО-ВЕКТОРНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ**

Развитие технологии синхронно-векторных измерений позволяет контролировать в высокой точностью быстропротекающие процессы в территориально распределенных системах, например, в электроэнергетических системах. В работе приведена технология и алгоритм вычисления параметров линии электропередачи, проведены виртуальный и физический эксперименты по оценке точности определения параметров линии электропередачи.

Ключевые слова: синхронно-векторные измерения, технология, оборудование, алгоритм, виртуальный и физический эксперимент.

DETERMINATION OF THE PARAMETERS OF A TRANSMISSION LINE USING A SYNCHRONOUS VECTOR MEASURING

The development of synchronous vector measurement technology makes it possible to control with high accuracy fast-moving processes in geographically distributed systems, for example, in electric power systems. The paper presents the technology and algorithm for calculating the parameters of the power line, virtual and physical experiments to assess the accuracy of determining the parameters of the power line.

Keywords: synchronous vector measurements, technology, equipment, algorithm, virtual and physical experiment.

В последние годы интеллектуальные системы на основе технологии синхронизированных векторных измерений (СВИ) стали использоваться для решения ряда задач, связанных с повышением надежности и эффективности функционирования энергосистем.

Основные преимущества СВИ связаны с возможностью расчета на базе синхровекторов параметров режима энергосистемы на любом уровне управления, в том числе, токов, напряжений, активных, реактивных и полных мощностей, параметров режима по симметричным составляющим и т.д. На основе шести синхрофазоров тока и напряжения для каждого присоединения может быть рассчитано около сотни параметров, а с помощью синхровекторов тока и напряжения, полученных с различных присоединений сети, могут быть рассчитаны и параметры самой энергосистемы. Это открывает широкие возможности для управления нормальными и аварийными режимами в энергосистемах.

Представленная работа посвящена разработке алгоритма оперативного определения параметров схемы замещения линии электроснабжения и нагрузки на основе СВИ на базе ГЛОНАСС/GPS [1].

Структурная схема системы для определения параметров энергосистемы представлена на рисунке 1. На концах линии устанавливаются измерители токов и напряжений ТПА-02 (рисунок 2), которые синхронизируются от спутников с помощью модулей синхронизации ИСС-1.3 (рисунок 3) [2].

Маркированные по времени значения напряжений и токов передаются на сервер, где вычисляются параметры энергосистемы и режимные параметры.

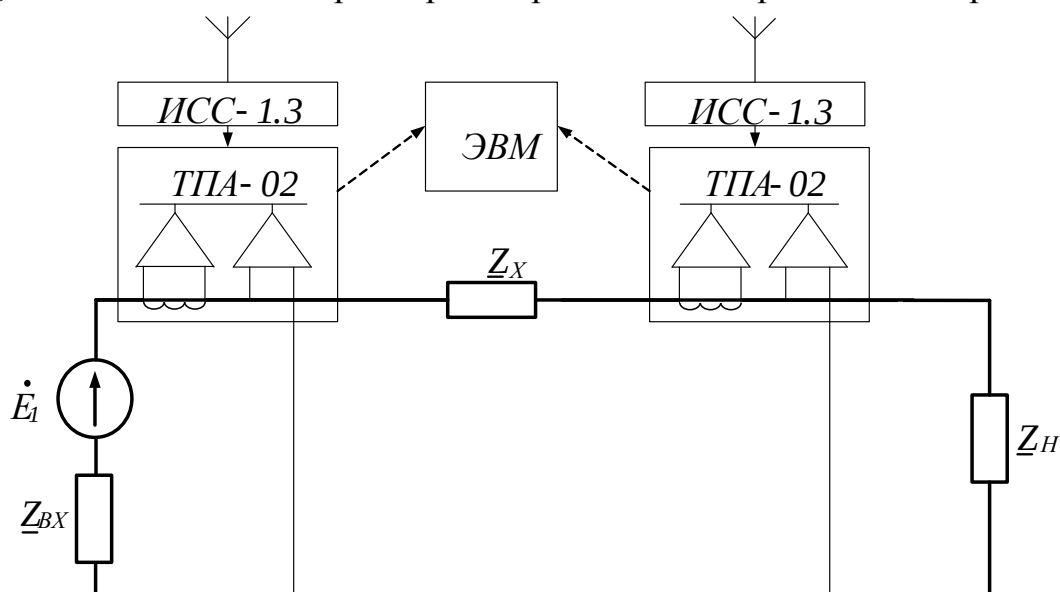


Рисунок 1 – Структурная схема системы для определения параметров линии электропитания и нагрузки

ТПА-02 предназначен для синхронизированных векторных измерений параметров электрического режима в составе систем мониторинга переходных режимов (СМПР) – комплекса технических и программных средств, обеспечивающий измерение, сбор и передачу в диспетчерские центры СВИ параметров электроэнергетического режима.

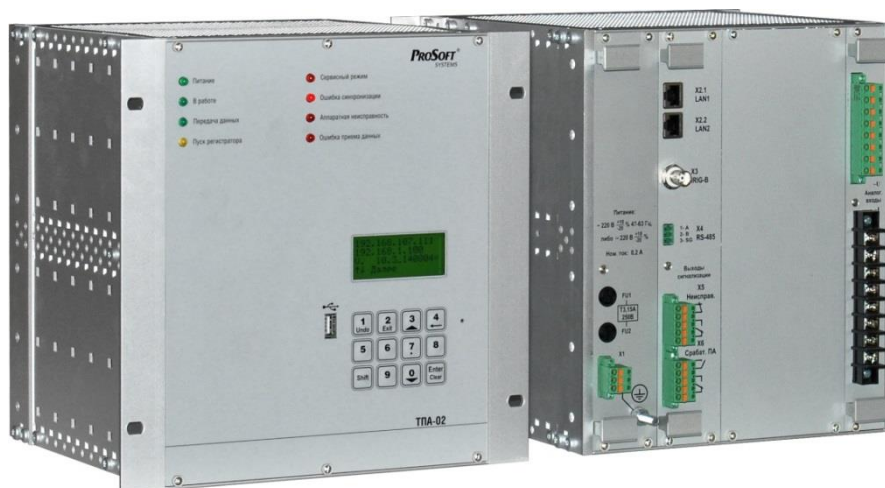


Рисунок 2 – Внешний вид ТПА-02

ТПА-02 выполняет измерение мгновенных значений и фазовых углов напряжений токов и напряжений, вычисление частоты линии, синхронизацию измерений с помощью сигналов единого точного времени и передачу данных в

реальном времени по стандарту С37.118, цикл 20 мс.

Модуль синхронизации ИСС-1.3 осуществляет прием и обработку сигналов от спутников глобальных навигационных систем ГЛОНАСС/GPS, формирование сигналов точного времени на основе полученных данных. Этот блок имеет пределы допускаемых смещений формируемой шкалы времени в режиме «Устойчивая синхронизация» – ± 200 нс.

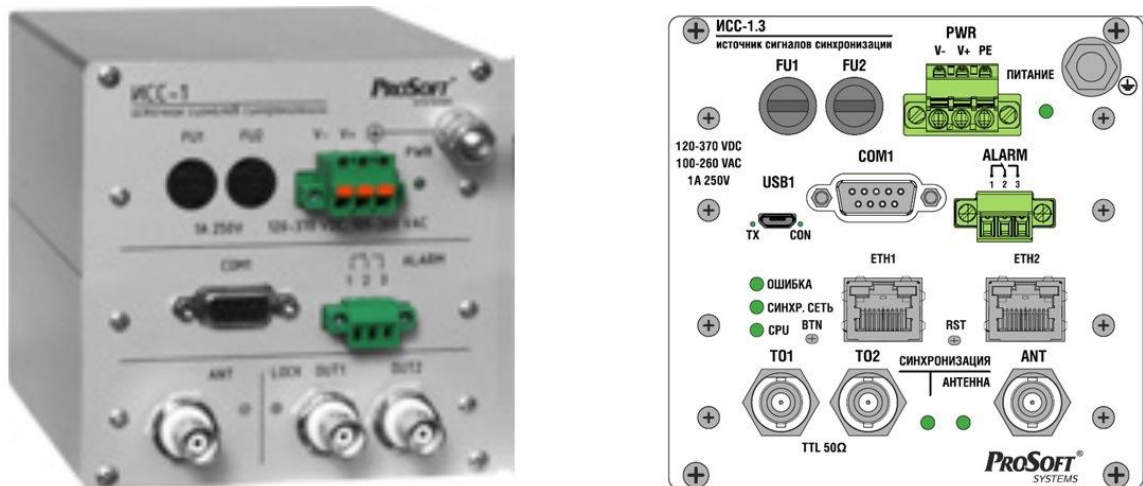


Рисунок 3 – Внешний вид модуля синхронизации ИСС-1.3

Регистратор ТПА-02 подключается к GPS приемнику для приема точного времени и к вторичным обмоткам трансформаторов напряжения и тока. Каждый регистратор одновременно измеряет напряжение и ток (действующее значение и угол) которые синхронизированы с GPS сигналом с точностью 1 мкс. Данные с регистраторов СМПП собираются в концентраторе векторных данных для обработки, архивирования и последующей отправки в диспетчерский центр. Схема подключения ТПА-02 к линии представлена на рисунке 4.

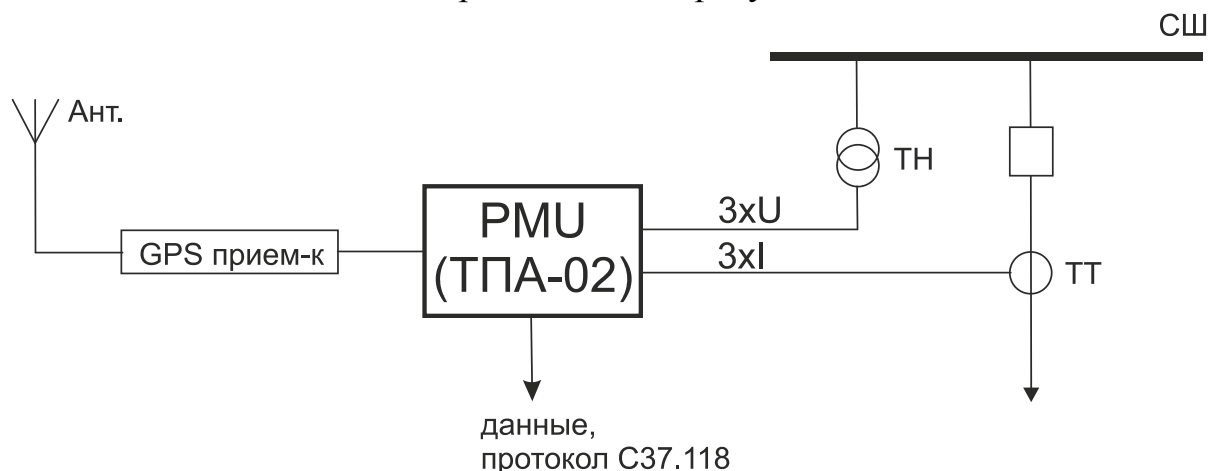


Рисунок 4 – Схема подключения ТПА-02

Рассмотрим возможность определения параметров линии с индуктивной нагрузкой, схема замещения которой представлена на рисунке 5.

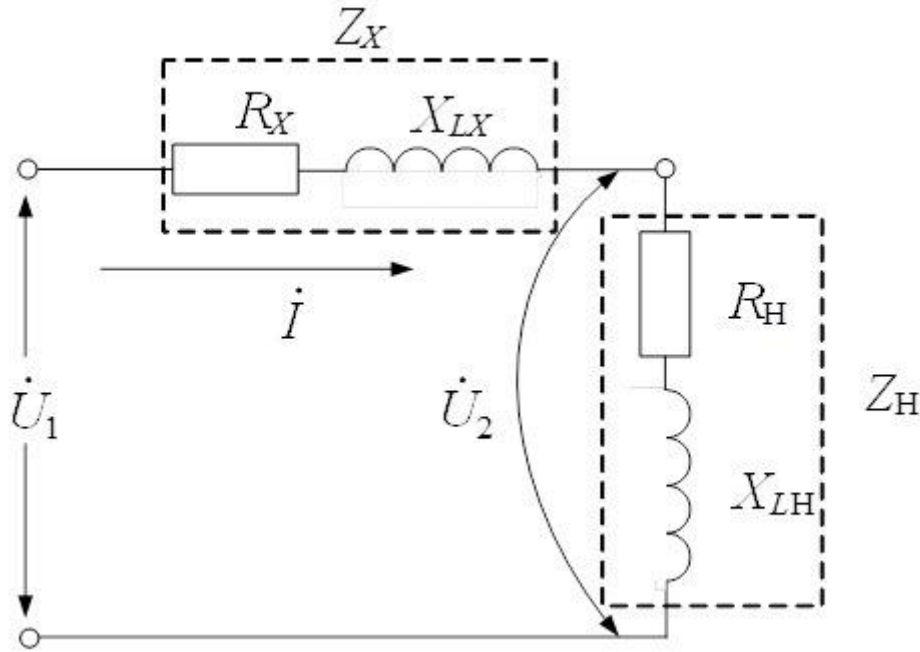


Рисунок 5 – Схема замещения линии электропередач

В общем случае с помощью системы СВИ измеряются все напряжения, токи и их фазы, при этом $\dot{U}_1 = U_1 e^{j\varphi_1}$, $\dot{U}_2 = U_2 e^{j\varphi_2}$, $\dot{I} = I e^{j\varphi}$. Однако, входное напряжение будет приниматься за опорное с нулевой фазой, т.е. $\varphi_1 = 0$, поэтому $\dot{U}_1 = U_1 e^{j0} = U_1$.

Общее сопротивление линии с нагрузкой:

$$\underline{Z}_{\text{общ}} = \frac{U_1}{\dot{I}} = \frac{U_1}{I e^{j\varphi_{\text{общ}}}} = \frac{U_1}{I} e^{-j\varphi_{\text{общ}}} \quad (1)$$

$$\text{Соответственно, } Z_{\text{общ}} = \frac{U_1}{I}, \varphi_{\text{общ}} = \varphi. \quad (2)$$

Отсюда следует, что:

$$R_{\text{общ}} = Z_{\text{общ}} \cdot \cos\varphi, X_{\text{общ}} = \sqrt{Z_{\text{общ}}^2 - R_{\text{общ}}^2}, L_{\text{общ}} = \frac{X_{\text{общ}}}{2\pi \cdot f}. \quad (3)$$

Зная $U_2, \varphi_2, I, \varphi$, можно вычислить параметры нагрузки:

$$\underline{Z}_H = \frac{\dot{U}_2}{\dot{I}} = \frac{U_2}{I} e^{j(\varphi_2 - \varphi)}, Z_H = \frac{U_2}{I}, \varphi_H = \varphi_2 - \varphi, \quad (4)$$

$$R_H = Z_H \cdot \cos\varphi_H, X_{LH} = \sqrt{Z_H^2 - R_H^2}, L_H = \frac{X_H}{2\pi \cdot f}. \quad (5)$$

Полное сопротивление линии электропередач определим как $\underline{Z}_x = (\dot{U}_1 - \dot{U}_2) / \dot{I}$.

Используя преобразование Лапласа, запишем:

$$\begin{aligned} \dot{U}_1 - \dot{U}_2 &= U_1(\cos\varphi_1 + j\sin\varphi_1) - U_2(\cos\varphi_2 + j\sin\varphi_2) = \\ &= U_1\cos\varphi_1 - U_2\cos\varphi_2 + j(U_1\sin\varphi_1 - U_2\sin\varphi_2). \end{aligned} \quad (6)$$

Примем, что $A = U_1\cos\varphi_1 - U_2\cos\varphi_2$; $B = U_1\sin\varphi_1 - U_2\sin\varphi_2$.

Учитывая, что $\varphi_1=0$, $\sin\varphi_1=0$, $\cos\varphi_1=1$:

$$A = U_1 - U_2\cos\varphi_2; B = -U_2\sin\varphi_2. \quad (7)$$

В таком случае запишется:

$$\begin{aligned} \dot{U}_{12} = \dot{U}_1 - \dot{U}_2 &= A + jB = \sqrt{A^2 + B^2} e^{j\arctg\frac{B}{A}}. \\ \underline{Z}_x = \frac{\dot{U}_1 - \dot{U}_2}{\dot{I}} &= \frac{\sqrt{A^2 + B^2}}{I} e^{j\left(\arctg\left(\frac{B}{A}\right) - \varphi\right)}. \end{aligned} \quad (8)$$

Модуль и фаза полного сопротивления линии равны:

$$Z_x = \frac{\sqrt{A^2 + B^2}}{I} = \frac{\sqrt{U_1^2 - 2U_1U_2\cos\varphi_2 + U_2^2}}{I}, \quad (9)$$

$$\varphi_x = \arctg\left(\frac{B}{A}\right) - \varphi = \arctg\left(\frac{-U_2\sin\varphi_2}{U_1 - U_2\cos\varphi_2}\right) - \varphi. \quad (10)$$

Активное, реактивное сопротивление линии и индуктивность определяется как:

$$R_x = Z_x \cos\varphi_x, X_{LX} = \sqrt{Z_x^2 - R_x^2}, L_x = \frac{X_{LX}}{2\pi \cdot f}. \quad (11)$$

Проведем моделирование процессов, происходящих в представленной линии электропередач с помощью пакета схемотехнического моделирования Multisim (рисунок 6).

С помощью виртуальных измерительных приборов определяются напряжения, токи и их фазы, на основе которых вычисляются параметры линий по представленным формулам.

На втором этапе была создана схемная модель линии электропередач и подключены два измерительных комплекта на ТПА-02 (рисунок 1), проведены синхронные измерения токов, напряжений и их фаз, после чего по приведенным формулам проведены вычисления параметров линии.

Результаты физического и виртуального моделирования токов показали практически полное совпадение.

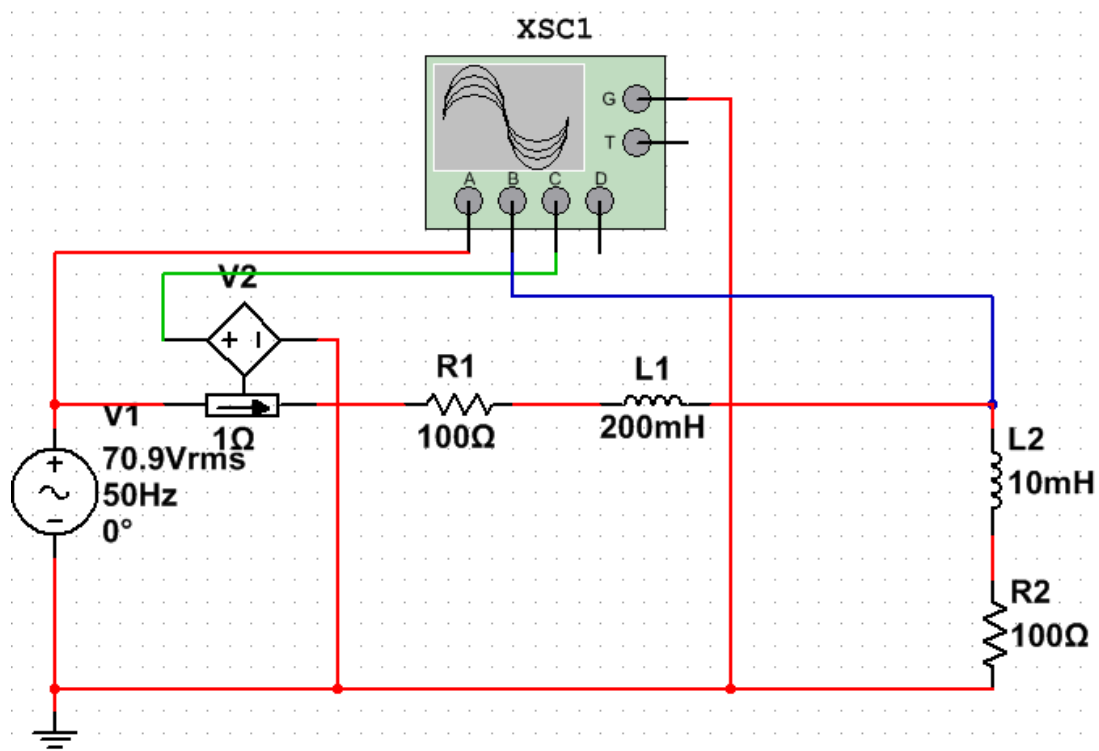


Рисунок 6 – Модель линии электропередач в пакете Multisim

Таблица 1

Сравнительные результаты экспериментов

Параметр	Обозначение	Модель в Multisim	Физический эксперимент
Амплитуда входного напряжения, В	U_{m1}	100	100
Фаза входного напряжения, град	φ_{U1}	0	0
Амплитуда выходного напряжения, В	U_{m2}	47,51	47,52
Фаза выходного напряжения, град.	φ_{U2}	-16,86	-16,87
Амплитуда тока, мА	I_m	0,47	0,46
Фаза тока, град.	φ_I	-18,0	-18,1
Активное сопротивление линии, Ом	R_X	100,2	100,1
Индуктивность линии, мГн	L_X	200,0	199,9

Закключение: используя современные спутниковые системы синхронизации на базе ГЛОНАСС/GPS и современное оборудование для синхронно-фазовых измерений, а также используя методику, описанную в настоящей работе, можно контролировать в режиме реального времени параметры линий электропередач и оперативно определять их критические отклонения от номиналов.

Список литературы

1. Phadke, A. G. Synchronized Phasor Measurements and Their Applications / A. G. Phadke, J. S. Thorp. – Springer, 2008. – 254 p. – Text: direct.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Чижма Сергей Николаевич

Балтийский федеральный университет
им. И Канта (БФУ им. И. Канта).

ул. А. Невского, д.14, г. Калининград,
246029, Российская Федерация.

Доктор технических наук, доцент, профессор
института физико-математических наук и
информационных технологий.

Тел. 8-963-295-0841.

E-mail: chisn@yandex.ru

Молчанов Сергей Васильевич

Балтийский федеральный университет
им. И Канта (БФУ им. И. Канта).

ул. А. Невского, д.14, г. Калининград,
246029, Российская Федерация.

Кандидат физико-математических, доцент,
доцент института физико-математических
наук и информационных технологий.

Тел. 8-909-775-4635.

E-mail: SMolchanov@kantiana.ru.

Стригин Игорь Валентинович

Балтийский федеральный университет
им. И Канта (БФУ им. И. Канта),

ул. А. Невского, д.14, г. Калининград,
246029, Российская Федерация.

Аспирант института физико-математических
наук и информационных технологий.

Тел. 8-911-483-8864.

E-mail: IStrigin@kantiana.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Chizhma Sergey Nikolaevich

Baltic Federal University
of Immanuel Kant (IKBFU).

14, A. Nevskogo, Kaliningrad, 246029,
the Russian Federation

Doctor of Technical Science, docent, professor
of Institute of physical and mathematical
Sciences and information technologies.

Phone: 8-963-295-0841.

E-mail: chisn@yandex.ru.

Molchanov Sergey Vasilievich

Baltic Federal University
of Immanuel Kant (IKBFU).

14, A. Nevskogo, Kaliningrad, 246029,
the Russian Federation.

Candidate of physical and mathematical
Sciences, docent, docent of Institute of physical
and mathematical Sciences and information
technologies.

Phone: 8-909-775-4635.

E-mail: SMolchanov@kantiana.ru.

Strigin Igor Valentinovich

Baltic Federal University
of Immanuel Kant (IKBFU).

14, A. Nevskogo, Kaliningrad, 246029,
the Russian Federation.

Post-graduate student of Institute of physical and
mathematical Sciences and information
technologies.

Phone: 8-911-483-8864.

E-mail: IStrigin@kantiana.ru.

М. П. Бадёр, В. В. Лобынцев

Российский университет транспорта (РУТ (МИИТ)), г. Москва, Российская Федерация

ДИАГНОСТИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТИ СИСТЕМЫ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ И ТРАНСПОРТНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ

Проведенные исследования с помощью современных компьютерных технологий позволили применить методы, ранее недоступные, и обосновать ещё один эффективный способ борьбы с высокочастотными помехами. А именно, разработать и спроектировать многоступенчатый цифровой режекторный заградительный фильтр, позволяющий бортовому компьютеру или сигнальному процессору электроподвижного состава эффективно подавлять помехи гектометрового диапазона программным методом, и таким образом, обеспечить электромагнитную совместимость системы тягового электроснабжения и транспортной инфраструктуры при нарушении токосъема на высокоскоростных участках движения.

Ключевые слова: система тягового электроснабжения, электромагнитная совместимость, высокоскоростные магистрали, электромагнитные процессы в электрических схемах с полупроводниковыми преобразователями, многоступенчатый цифровой режекторный заградительный фильтр.

Michail P. Badjor, Vladimir V. Lobyntsev

Russian University of Transport (RUT (MIIT)), Moscow, the Russian Federation

DIAGNOSIS OF ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY OF THE TRACTION POWER SUPPLY SYSTEM AND TRANSPORT INFRASTRUCTURE

The investigations with using modern computer technologies are complete. These investigations allowed us to apply previously unavailable methods and justify another effective way to deal with high frequency interference. The multi-stage digital cut-off barrier filter that allows the onboard computer or signal processor of an electric moving train to effectively suppress interference in the hectometer range using a software method, and thus ensure electromagnetic compatibility of the traction power supply system and transport infrastructure in case of current loss in high-speed sections of traffic are developed and design.

Keywords: Traction power supply system, electromagnetic compatibility, high speed railroads, electromagnetic process in electric circuits with rectifiers, multi-stage digital cutting barrier filter.

При высокоскоростном движении и неблагоприятных зимних погодных условиях нередко происходит нарушение токосъема. Возникающая при нарушении токосъема электрическая дуга сопровождается электромагнитным излучением в диапазоне до сотен мегагерц. Электромагнитному влиянию и промышленным помехам подвержены практически любые электрические линии (как воздушные, так и кабельные), проложенные вблизи от электрической железной дороги: линии связи, телеуправления и телесигнализации, рельсовые цепи автоблокировки, низковольтные электрические сети и линии электропередачи, эстакады, трубопроводы, системы поездной радиосвязи. Уровень радиоизлучения контактной сети рассматривается как часть промышленных помех.

Электроподвижной состав (ЭПС) постоянного и переменного тока имеет устройства, создающие различные по природе и интенсивности помехи. Наибольшую опасность для радиосвязи имеют помехи, которые распространяются в виде электромагнитного поля. Импульсный характер имеют помехи, вызванные искрением токоприёмника ЭПС, а также помехи, обусловленные грозовой деятельностью атмосферы. Все источники помех на ЭПС можно объединить в две группы: возникающие при работе внутреннего электрооборудования и обусловленные нарушением контакта между токоприёмником и контактным проводом. Импульсные помехи от тяговой сети представляют собой последовательность кратковременных электромагнитных колебаний, возникающих при дуговом токосъеме, интенсивность, форма и повторяемость которых в общем виде носят случайный характер.

Импульсные помехи (ИП) являются основной причиной, ограничивающей дальность и снижающей качество поездной радиосвязи железнодорожного транспорта. Они в большинстве случаев определяют реализуемую чувствительность приемного устройства, которая оказывается намного хуже номинальной чувствительности. Большинство источников создают помехи, которые характеризуются широким спектром, захватывающим диапазоны гектометровых, метровых и дециметровых волн.

Нарушение токосъема при скоростном движении и гололёдообразовании, резкие изменения тока в тяговой сети при дугообразовании вызывают в окружающем пространстве электромагнитные возмущения, интенсивность которых определяется множеством факторов, в том числе, значением и скоростью изменения тока, его частотой и излучающей способностью

помехонесущих сетей. Каждый из факторов в свою очередь является следствием ряда причин, изменяющихся во времени и в пространстве случайным образом и обуславливающих вероятностную природу ИП.

На уровень радиопомех влияет скорость расхождения контактирующих поверхностей, момент отрыва токоприемника по отношению к фазе перехода тока через нулевое значение, электрические параметры разрываемой цепи, состояние и материал рабочих поверхностей контактирующих элементов, наличие гололеда.

Для исследования такого рода радиопомех применимы только статистические методы. В основе статистической модели лежат аналитические выражения для магнитного и электрического полей и метод линейного многоуровневого регрессионного анализа (расчет взаимосвязи между зависимой переменной и несколькими переменными факторами). В качестве зависимых переменных используются величины напряженностей магнитного и электрического полей. Факторы характеризуют основные параметры, влияющие на свойства электромагнитного поля при дуговом токосъеме.

На рисунке 1 приведена эквивалентная схема электровоза, как источника помех.

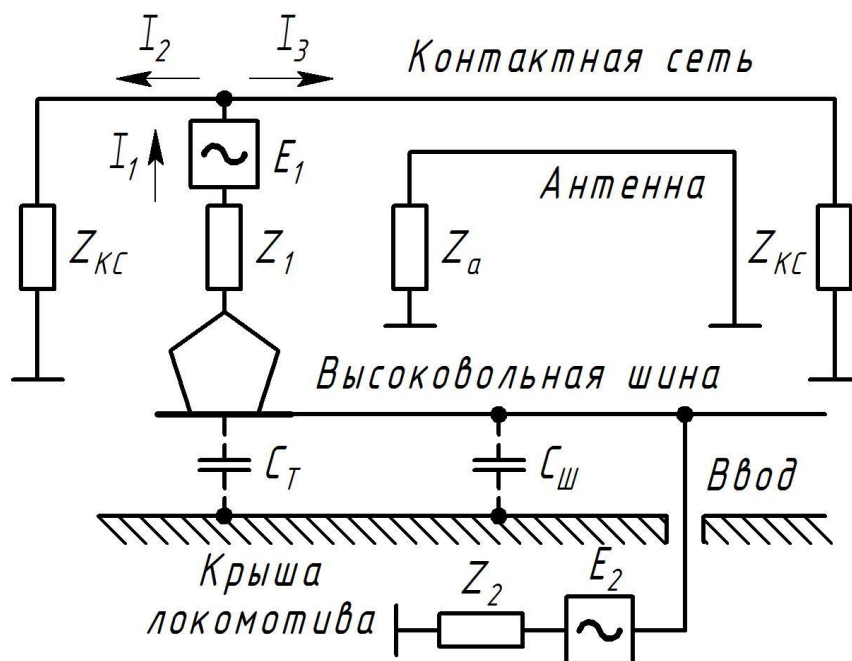


Рисунок 1 – Эквивалентная схема электровоза

На этой схеме приняты следующие обозначения: E_1 - э. д. с. помех, возникающих при нарушении токосъема; E_2 - э. д. с. помех, создаваемых

агрегатами, расположенными внутри кузова электровоза; Z_1, Z_2 - сопротивления внутреннее и подводящих проводов соответствующих источников помех; $Z_{\kappa c}$ - входное сопротивление контактной сети; $Z_{\kappa c}$ - нагрузка антенны; $I_1 - I_2$ токи помех; C_T - емкость, состоящая из емкости токоприемника относительно крыши и проходной емкости опорных изоляторов, на которых установлен токоприемник; $C_{ш}$ - емкость соединительных шин относительно корпуса ЭПС.

Источник E_1 появляется только при движении электровоза. Создаваемые им токи помех проходят по проводам контактной сети и возвращаются обратно через землю, корпус электровоза и емкости C_T и $C_{ш}$, сопротивление, которых на частоте поездной радиосвязи составляет десятки Ом. Токи помех, распространяясь по высоковольтным шинам электровоза и контактному проводу, оказывают наиболее сильное воздействие на локомотивную антенну.

Уровень помех от источника E_1 определяется условиями токосъема, скоростью движения, током потребляемым электровозом, а в зимний период - наличием инея и гололёда на контактном проводе. В свою очередь, условия токосъема зависят от механических характеристик токоприемника, эластичности подвески контактной сети, материала контактирующих пластин полоза токоприемника. При применении угольных пластин нарушение токосъема происходит реже, чем при медных пластинах. Это объясняется улучшением состояния контактирующей поверхности контактного провода.

На высоких скоростях движения (250 км/ч и выше) уровень помех, вызванных нарушением токосъема, не зависит от материала пластин, а определяется только эластичностью подвески контактной сети и механическими характеристиками токоприемника. Нарушение токосъема происходит в моменты, когда электровоз проходит изолирующие вставки и места достаточно жесткого крепления контактного провода, то есть мимо опор, анкерных сопряжений и стрелок. При этом возникают полные или неполные отрывы токоприемника от контактного провода, вызывающие резкие изменения тока, потребляемого электровозом. В результате появляются импульсные радиопомехи, квазипиковое значение которых на входе радиостанции может достигать (69 – 72) дБ (3 – 4) мВ. Нарушение токосъема сопровождается появлением помех в виде нескольких пачек импульсов (от 2 до 7), продолжительность отдельной пачки составляет (100 – 450) мс. Помехи от токосъема в виде выбросов фиксируются на ленте самопишущего прибора, подключенного к измерителю помех.

Источник E_2 воздействует на локомотивную антенну также через высоковольтные шины и контактную сеть, куда токи помех проникают через главный ввод из кузова электровоза. Помехи источника являются в основном помехами, вызываемыми искрением щеток на коллекторах электрических машин. Помехи имеют высокую частоту и сравнительно постоянную амплитуду. Измерителями радиопомех они фиксируются в виде устойчивого уровня с отдельными редкими импульсами, обусловленными работой пускорегулирующей аппаратуры.

Несмотря на то, что в преобразователях ЭПС возможно большое разнообразие методов и способов импульсной модуляции, входные токи и напряжения во всех случаях могут быть представлены в виде суммы гармонических составляющих с частотами, кратными частоте основной гармоники и комбинационными частотами. Гармоники тока, генерируемые в тяговую сеть, на низкой частоте, могут усиливаться за счет резонансных явлений в тяговой сети и оказывать повышенное электромагнитное влияние на окружающую среду и находящиеся в ней коммуникации, в том числе на сигнализацию, централизацию и блокировку (СЦБ) и автоматическую локомотивную сигнализацию (АЛС), которые призваны обеспечить безопасность движения поездов.

На ЭПС есть фильтр - пробка гектометрового диапазона, включенный последовательно, в цепь высоковольтного питания. Он служит защитой от радиопомех только по цепи питания. Канал радиосвязи он не защищает, так как ИП проникают в канал радиосвязи через приемную антенну в виде радиоизлучения, минуя фильтр – пробку.

Для определения величин напряженностей H и E использованы следующие математические выражения

$$H = 10^{\alpha_0} \cdot f^{\alpha_1} \cdot d^{\alpha_2} \cdot v^{\alpha_3} I^{\alpha_4}, \text{ А/м;} \quad (1)$$

$$E = 10^{\beta_0} \cdot f^{\beta_1} \cdot d^{\beta_2} \cdot v^{\beta_3} I^{\beta_4}, \text{ В/м,} \quad (2)$$

где f – частота в кГц; d – расстояние от токоприемника до приемной антенны в м.; v – скорость электровоза в км/ч; I – ток электровоза в А.

Для определения коэффициентов α_i и β_i ($i=0,1,\dots,4$) полученной системы уравнений требуется провести анализ экспериментальных данных, полученных при измерениях на действующем участке. Измерения проводились на электрифицированных участках Октябрьской железной дороги. Скорости

поездов варьировались от 110 км/ч до 250 км/ч, потребляемый ток составлял до 1600 А при различных типах электровозов (в том числе Сапсан).

Для измерений электромагнитного поля, возникающего при дуговом токосъеме, в диапазоне 9 кГц – 1 ГГц применялись различные типы приемных антенн, установленных на определенном расстоянии от тяговой сети.

Подставляя значения полученных в результате расчетов коэффициентов α_i и β_i , получаем:

$$H_{cp} = 10^{-6,379} \cdot f^{-0,52} \cdot d^{-0,948} \cdot v^{1,166} \cdot I^{-0,172}, A/m; \quad (3)$$

$$E_{cp} = 10^{-2,347} \cdot f^{-0,417} \cdot d^{-0,298} \cdot v^{0,247} \cdot I^{-0,036}, B/m. \quad (4)$$

Результаты расчетов показывают убывание напряженностей магнитного и электрического полей с увеличением частоты, расстояния до тяговой сети и снижении тока, потребляемого электровозом на участке (здесь $\alpha_i < 0$ и $\beta_i < 0, i = 1, 2, 4$). Следует учитывать, что основным источником электромагнитного поля является не сама электрическая дуга, а ее последовательные возникновения и гашения при пробое воздушного промежутка между контактным проводом и токоприемником. Протеканию данных процессов способствует малый ток дуги; дуговой токосъем при небольшом потребляемом электровозом токе сопровождается большими электромагнитными помехами, в том числе и в диапазоне радиочастот. В режиме выбега электрическая дуга становится неустойчивой, уровень радиоизлучения увеличивается на 1 дБ.

Уровень электромагнитного поля находится в прямой зависимости от величины потребляемого тока и скорости поезда. При высоких скоростях возрастает риск нарушения скользящего контакта между токоприемником электровоза и контактным проводом. Это предположение подтверждается статистической моделью (положительные значения коэффициентов α_3 и β_3).

Математическое моделирование дуговых процессов на ЭВМ требует предварительного выбора модели электрической дуги. Известные модели Майра и Касси основаны на упрощенном описании потерь мощности и накопления энергии в столбе дуги. Модель Майра представляет собой пример полуэмпирической динамической модели электрической дуги, в основе которой лежит зависимость проводимости дуги от времени, описываемая следующим уравнением:

$$\frac{1}{R} \frac{dR}{dt} = \frac{1}{\theta} \left(1 - \frac{u_a^2}{u_0^2} \right), \quad (5)$$

где u_a - напряжение дуги, а u_0 - установившееся значение напряжения дуги;

θ - постоянная времени дуги.

Величины удельного сопротивления и накопленной в объеме канала дуги энергии можно считать постоянными.

Сравнивая приведенные аналитические методы, можно сделать вывод, что модели Майра и Касси позволяют получить наиболее точное описание динамических процессов при возникновении дугового разряда. Они требуют экспериментального определения некоторых параметров дуги, так как исследования показывают, что теоретические допущения при расчете постоянных величин не всегда корректны. Наиболее применимым представляется использование временных зависимостей для расчетных параметров вместо констант, хотя все равно остается необходимость определения некоторых из них путем измерений.

Так как объектом изучения является уровень радиопомех, возникающий при дуговом токосъеме ЭПС с контактного провода, проведенный анализ показывает целесообразность использования аналитической модели, совпадающей по форме с существующей моделью Майра, для описания динамических параметров электрической дуги, сопровождающей нарушения токосъема. Применение модели не требует проведения экспериментальных исследований на действующем участке, а некоторые, используемые в дальнейшем расчетные величины, приведены в технической литературе.

В основе этой концепции лежит общая термодинамическая модель электрической дуги:

$$\frac{dG'}{dt} = A_1 \cdot G'^{(1+n\gamma)} + A_2 \cdot G'^{n(\gamma-1)} \cdot i^2, \quad (6)$$

где i – ток дуги, а

G' – удельная проводимость дуги,

n, γ - термодинамические параметры, зависящие от температуры (для электрической дуги с температурой до 12000 К, принимаем $n = 0,32$; $\gamma = 0,67$).

A_1, A_2 - коэффициенты, зависящие от линейной функции распределения удельного теплового потока $\eta(r)$ для характерного поперечного сечения плазменного канала дуги.

Зависимость тока дуги $i_a(t)$ от времени на основании результатов обратного преобразования Фурье:

$$i_a(t) = j(t) - \int_0^t y_N(t-\tau) \left[\left(\frac{l_a(\tau)}{G_a(\tau)} + R_t \right) i_a(\tau) + L_t \frac{di_a}{dt} \Big|_{t=\tau} \right] d\tau, \quad (7)$$

где R_t и L_t – эквивалентное сопротивление и индуктивность ЭПС;

$l_a(\tau)$ - величина воздушного промежутка между токосъемной накладкой токоприемника и контактном проводом.

В данном случае величина мешающего тока $j(t)$ определяется как:

$$j(t) = i_{sc}(t) - \int_{-\infty}^0 y_N(t-\tau) u(\tau) d\tau, \quad (8)$$

где $u(\tau)$ - напряжение между контактном проводом и рельсовой сетью перед возникновением дуги.

Уравнения (7) и (8) составляют интегрально-дифференциальную систему как основу рассматриваемой аналитической модели. Для численного решения исходных уравнений использован метод Рунге – Кутты при заданных начальных условиях для параметров i_a , G_a и di_a/dt . Отдельные блоки соединены последовательно, а их количество определяется длиной рассматриваемой межподстанционной зоны и требуемой точностью расчетов. В приведенном примере использованы четыре одинаковых блока для межподстанционной зоны. В расчетах использованы параметры контактной подвески ПБСМ 95+МФ-100 и автотрансформатор АОМЖ-10000/27×2.

На рассматриваемых частотах тяговая сеть и смежные линии необходимо рассматривать как линии с распределенными параметрами.

При моделировании на переменном токе, при переходе тока через ноль, ток в цепи не прекращается, на это влияют следующие факторы: постоянная времени термодинамической модели и постоянная времени тяговой сети.

В практике оценки мешающего действия ИП используют два основных метода: энергетический и вероятностный. В основу энергетического метода, который применяется при оценке воздействия помех на прием аналоговой информации, положено отношение сигнал/помеха, то есть отношение эффективного значения полезного сигнала к усредненному значению помехи на входе приемника в полосе пропускания. К усредненным значениям радиопомех относят среднее квазипиковое значение, представляющее собой интегральный

эффект на выходе инерционного детектора от потока импульсов помех на его входе, и среднее эффективное значение (усредненное значение энергии импульсной последовательности за определенное время).

Вероятностный метод оценки основан на использовании статистических параметров помех при приеме дискретной информации, причем в качестве параметра для оценки качества приема берется средняя вероятность ошибки. Данный параметр однозначно связан с амплитудными и временными характеристиками потоков импульсов помех и средним эффективным значением. Вероятностный метод позволяет в ряде случаев определить вероятность искажения элементов сигнала.

В самом общем случае, модель канала связи (радиосвязи) можно представить в виде четырехполюсника, для которого входной и выходной сигналы связаны интегралом Дюамеля:

$$S(t) = \int_{-\infty}^t S(\tau)g(t, t-\tau)d\tau, \quad (9)$$

где — выходной сигнал; $S(\tau)$ - входной сигнал; $g(t, t-\tau)$ - импульсная характеристика четырехполюсника, представляющая собой реакцию системы на входной сигнал в виде дельта - функции.

Канал можно также задать комплексной частотной характеристикой, связанной с преобразованием Фурье:

$$\dot{K}(j\omega) = \int_0^{\infty} g(\tau^*)e^{-j\omega\tau^*}d\tau = \left| \dot{K}(j\omega)e \right| - j\varphi(\omega), \quad (10)$$

где $\left| \dot{K}(j\omega) \right| = K(\omega)$ - соответственно амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) и $\varphi(\omega) = \arg \dot{K}(j\omega)$ - фазочастотная (ФЧХ) характеристика канала.

Разработана математическая модель дугового токосъема средствами программного обеспечения EWB Multisim 10 на ЭВМ и предложена статистическая модель токосъема с использованием системы нелинейных уравнений для определения количественных характеристик электромагнитных излучений помех в данном диапазоне. На основе этой математической модели предложена методика расчета электромагнитной совместимости тягового электроснабжения с поездной радиосвязью с применением специализированных компьютерных средств моделирования.

Исследованиями доказано, что ИП в каналах поездной радиосвязи представляют собой случайный процесс и имеют нестационарный характер.

Поэтому они описываются системой статистических характеристик, в которую входят кратковременные характеристики и характеристики изменчивости.

Предельный уровень радиопомех в соответствии с нормативами ОАО РЖД принимается не более 60 дБ, (для скоростного движения, нормальные погодные условия, тяговая сеть постоянного тока без инея и наледи). В режиме выбега уровень радиоизлучения увеличивается на 1 дБ. Теоретические расчеты показывают, что в гектометровом диапазоне в зимних условиях радиосвязь не соответствует нормативным требованиям ОАО «РЖД» и нуждается в модернизации.

Особое внимание посвящено метрологическому обеспечению применяемой аппаратуры, методам обработки экспериментальных данных. Требования, предъявляемые к аппаратуре: автономное питание, возможность записи информации в звуковом формате для дальнейшей обработки на компьютере, возможность проведения эксперимента в вагоне пассажирского поезда или в вагоне электропоезда, рабочий диапазон частот (2 - 150) МГц. Для того, чтобы подсчитать амплитуду ИП, необходимо определить усиление (чувствительность) на частоте 2,13 МГц в дБ радиоприёмного устройства.

Уровень радиоизлучения рассчитан с помощью метода линейного многоуровневого регрессионного анализа, позволяющего выделить основные факторы, влияющие на уровень радиоизлучения, при нарушении токосъема. Компьютерное моделирование уровня радиоизлучения выполнено с помощью пакета программирования MULTISIM 10.

По результатам статистической обработки было сделано заключение, что все ИП имеют нормальное распределение.

Проведенные исследования позволили определить степень влияния скорости движения и величины тока, потребляемого электровозом, на интенсивность электромагнитного излучения. Максимальный уровень помех даёт дуга при отрыве токоприёмника ЭПС от контактной сети, а длительность искрения дуги может составлять до двадцати секунд. Уровни помех в метровом диапазоне (150 МГц) значительно ниже, чем в гектометровом (2,13 МГц). Фурье – анализ ИП, выполненный программным методом, с помощью программы Sony Sound Forge 7, а также цифровым измерительным комплексом голландской фирмы Velleman Instruments, показал, что ИП имеют большое количество гармоник с частотами в полосе пропускания канала радиостанции от 200 Гц до 3000 Гц, а наибольшая их амплитуда находится в гектометровом диапазоне. Реализуемая чувствительность приемника в зависимости от вида тяги в гектометровом диапазоне составляет (50-800) мкВ, а в метровом диапазоне (1,5 - 5) мкВ.

С целью снижения уровня радиопомех в гектометровом диапазоне необходимо увеличить напряжённость электромагнитного поля путём установки дополнительных волноводов, перейти на более высокий диапазон поездной радиосвязи 150 МГц или перейти на более перспективный вариант, но более затратный стандарт GSM – R.

Наиболее эффективным методом борьбы с ИП представляется разработка и проектирование цифрового многоступенчатого режекторного фильтра. В задачу проектирования входит выбор структуры фильтра с учетом конечной точности вычислений расчета АЧХ проектируемого фильтра. Это особенно актуально при реализации фильтров с использованием специализированных интегральных микросхем или цифровых сигнальных процессоров. Спроектированный фильтр можно использовать в бортовом компьютере ЭПС для эффективного подавления ИП из низкочастотного спектра. В режиме реального времени происходит «очистка» канала радиосвязи от любых видов помех.

При помощи программы Sony Sound Forge 7 получены исходные данные для расчёта цифрового фильтра гектометрового диапазона. Для расчета коэффициентов цифрового фильтра применён проектировщик цифровых фильтров – Filter Design & Analysis Tool из пакета Signal Processing прикладных программ MATLAB 6.5. С помощью окна программы выбран заградительный многоступенчатый режекторный фильтр Чебышева гектометрового диапазона второго типа с порядком 50 и полосой непрозрачности $f_{\text{нп}} f_{2\pi}$. Этот фильтр имеет очень большую крутизну АЧХ 50-го порядка и благодаря большой крутизне эффективно вырезает помеху.

Заключение

Проведенные исследования с помощью современных компьютерных технологий позволили применить методы, ранее недоступные, и обосновать ещё один эффективный метод борьбы с ИП. А именно, разработать и спроектировать многоступенчатый цифровой режекторный заградительный фильтр, позволяющий бортовому компьютеру или сигнальному процессору ЭПС эффективно подавлять ИП в каналах поездной радиосвязи гектометрового диапазона программным методом, и таким образом, обеспечить электромагнитную совместимость системы тягового электроснабжения и поездной радиосвязи при нарушении токосъема на высокоскоростных участках движения в условиях гололёдообразования.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ 17-20-05167/17.

Список литературы

1. Бадёр, М. П. Электромагнитная совместимость: учебник для студентов высших технических учебных заведений / М. П. Бадёр. – Москва : УМК МПС РФ, 2002. – 640 с. – Текст : непосредственный.
2. Бадер, М. П. Повышение эффективности системы тягового электроснабжения постоянного тока / М. П. Бадер, В. В. Лобынцев // Электротехника. – 2020. – № 9. – С.14–19. – Текст : непосредственный.
3. Горевой, И. М. Обеспечение электромагнитной совместимости систем поездной радиосвязи при воздействии импульсных помех контактной сети железнодорожного транспорта / И. М. Горевой // Естественные и технические науки. – 2008. – №2. – С. 510–514.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Лобынцев Владимир Васильевич

Российский университет транспорта
(РУТ (МИИТ)).

ул. Образцова 9, стр. 9, г. Москва, 127994,
Российская Федерация.

Кандидат технических наук, доцент
кафедры «Электроэнергетика транспорта»
РУТ (МИИТ).

Тел.: +79161782477.

E-mail: lobzik-v@yandex.ru.

Бадёр Михаил Петрович

Российский университет транспорта
(РУТ (МИИТ)).

ул. Образцова 9, стр. 9, г. Москва, 127994,
Российская Федерация.

Доктор технических наук, профессор
кафедры «Электроэнергетика транспорта»
РУТ (МИИТ).

Тел.: +8-919-765-23-81.

E-mail: BADJOR@mail.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Lobyntsev Vladimir Vasilyevich

Russian University of Transport
(RUT (MIIT)).

Obrazcova 9, Moscow, 127994,
the Russian Federation.

Candidate of Technical Science,
Associate Professor of «Electrical energy
transport» department RUT (MIIT).

Phone: +79161782477.

E-mail: lobzik-v@yandex.ru.

Bader Michail Petrovich

Russian University of Transport
(RUT (MIIT)).

Obrazcova 9, Moscow, 127994,
the Russian Federation.

Doctor of Technical Science, Professor
department «Electrical energy transport»
RUT (MIIT).

Phone: +8-919-765-23-81.

E-mail: BADJOR@mail.ru.

В. Л. Незевак

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

ВЛИЯНИЕ РЕЖИМОВ РАБОТЫ НАКОПИТЕЛЕЙ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ НА ПОКАЗАТЕЛИ РАБОТЫ СИСТЕМЫ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

В настоящей статье рассмотрены вопросы оценки эффективности работы систем накопления электроэнергии на основе изменения энергетических показателей работы системы тягового электроснабжения. На основе результатов имитационного моделирования работы систем накопления электроэнергии для одного из действующих участков сети железных дорог построены зависимости изменения напряжения в контактной сети и межпоездного интервала. Показано влияние тока разряда системы накопления электроэнергии на минимальный межпоездной интервал. Представлены графики изменения энергетических показателей системы тягового электроснабжения в зависимости от напряжений стабилизации накопителей электроэнергии в режимах заряда и разряда. Для условий рассматриваемого участка определена мощность и энергоемкость системы накопления.

Ключевые слова: система тягового электроснабжения, накопитель электроэнергии, режимы работы, напряжение на шинах, средний ток, коэффициент нагрузки, силовое оборудование, температура нагрева, напряжение стабилизации, заряд, разряд, межпоездной интервал, пропускная способность.

Vladislav L. Nezevak

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

THE INFLUENCE OF THE MODES OF OPERATION OF DRIVES IMPACT ON SYSTEM PERFORMANCE TRACTION POWER SUPPLY

This article discusses the issues of evaluating the efficiency of power storage systems based on changes in the energy performance of the traction power supply system. Based on the results of simulation modeling of the operation of power storage systems for one of the existing sections of the railway network, the dependences of voltage changes in the contact network and the inter-train interval are constructed. The effect of the discharge current of the power storage system on the minimum inter-train interval is shown. Graphs of changes in the energy parameters of the traction power supply system depending on the stabilization voltages of power storage devices in charge and discharge modes are presented. For the conditions of the site under consideration, the capacity

and energy intensity of the storage system are determined.

Keywords: traction power supply system, power storage, operating modes, tire voltage, average current, load factor, power equipment, heating temperature, stabilization voltage, charge, discharge, inter-train interval, throughput.

Введение

Системы накопления электроэнергии позволяют решать широкий круг задач по управлению показателями работы электроэнергетических систем. К указанным задачам относятся: выравнивание графика электрической нагрузки, повышение качества напряжения, резервное электроснабжение, обеспечение работы возобновляемой энергетики, повышение эффективности работы электрических сетей, обеспечение эффективной работы распределенной генерации и возобновляемых источников электроэнергии и др. В области наземного транспорта системы накопления электроэнергии нашли применение в качестве как бортовых, так и стационарных систем.

Характеристики систем накопления электроэнергии позволяют рассматривать их с целью повышения эффективности работы систем тягового электроснабжения железнодорожного транспорта при взаимодействии с электроподвижным составом [1]. Потенциальное преимущество применения систем накопления в области тягового электроснабжения заключается в возможности решения задач по улучшению энергетических показателей работы систем тягового электроснабжения. Рассматриваемая проблематика вопросов в области транспортных систем является актуальной и соответствует приоритетным направлениям развития науки и техники.

Постановка задачи

Системе тягового электроснабжения для целей расчета энергетических показателей можно поставить в соответствие схему замещения, элементы которой учитываются с некоторой степенью детализации и точности. В большинстве случаев расчет энергетических показателей выполняется на основе последовательного расчета множества электрических схем с изменяемой электротяговой нагрузкой для условий установившегося режима. Данный подход позволяет упростить решение задачи (не учитываются переходные процессы при коммутациях на электроподвижном составе и в системе тягового электроснабжения, аварийные режимы) по определению уровней напряжения в ключевых узлах и токов в ветвях схемы, потерь напряжения и электроэнергии [2-4].

Работа систем накопления электроэнергии на участках с преобладанием пассажирского движения характеризуется выраженными циклами нагрузками и пиковой мощностью, зависящей от интенсивности движения. В качестве примера участка с преобладанием пассажирского движения можно привести Московское центральное кольцо [5-8], особенностью которого является эксплуатация однотипного мотор-вагонного подвижного состава, высокая интенсивность перевозок и цикличность тяговой нагрузки. Показатели работы системы тягового электроснабжения зависят от расписания движения, в частности от эффективности применения рекуперативного торможения, влияющего на уровень тягового электропотребления и потерь электроэнергии [9-10]. Решение указанной задачи показано на примере одного из участков Октябрьской железной дороги ОАО «Российские железные дороги», который характеризуется преобладанием грузового движения.

Характеристика объекта исследования

Участок железной дороги, на котором рассматривается внедрение систем накопления электроэнергии, включает в себя 12 тяговых подстанций с 12-пульсовыми схемами выпрямления, большинство из которых подключены к линии электропередач напряжением 110 кВ. В границах участка находится 10 постов секционирования. Эксплуатационная длина двухпутного участка составляет 233,9 км. Профиль пути относится ко второму типу, расчетный подъем в четном направлении составляет 7 ‰, в нечетном направлении – 6,1 ‰. На участке имеется три лимитирующие зоны, на которых по критерию необходимого уровня напряжения на токоприемнике электроподвижного состава ограничивается пропускная и провозная способности участка. Унифицированные массы поездов, обращающихся на участке, не превышают 8000 т. Эксплуатируемые серии локомотивов – ВЛ10, ВЛ15, 2ЭС4К, 3ЭС4К и 2ЭС6.

Расчеты выполняются со следующими допущениями: отсутствуют задержки или остановки поездов; среднее напряжение на токоприемниках локомотивов принято на уровне 3100 В; вождение локомотивов выполняется без «подталкивания»; для расчетов учитываются серии локомотивов 2ЭС4К и 2ЭС10; в расчетах массы поездов в нечетном направлении составляют 6000 и 9000 т, в четном – 4500 т; коэффициенты надежности подстанций, контактной сети по нагреву и устройств по уровню напряжения в контактной сети приняты равным 0,999; продолжительность окна – 150 мин; коэффициенты съема в пассажирском движении для четного и нечетного направлений – 1,65 и 1,56 соответственно, в пригородном сообщении – 1,56 и 1,54.

Расчет показателей работы системы тягового электроснабжения для условий применения накопителя электроэнергии

Наличие лимитирующих межподстанционных зон, ограничивающих пропускную способность по уровню напряжения на токоприемнике, обуславливает приоритетную задачу оценки эффекта работы систем накопления на них. Снижение напряжения на ординатах, близких к существующим постам секционирования, делает целесообразным проведение расчетов при установке накопителей в указанных местах.

С целью оценки мощности и энергоемкости накопителя электроэнергии и его влияния на пропускную способность на межподстанционной зоне в расчетах рассматривается вариант установки накопителей электроэнергии на постах секционирования. Продолжительность времени, в течение которого напряжение снижается до минимального уровня и ниже находится в диапазоне 4 – 6 мин. Требуемая величина компенсации падения напряжения в контактной сети составляет около 100 – 200 В. Указанные особенности позволяют использовать системы накопления электроэнергии на посту секционирования с ограниченной мощностью и энергоемкостью.

При переходе системы накопления в режим подзаряда создается нагрузочный режим для тяговой сети, что приводит к падению напряжения в контактной сети. Максимальное значение тока заряда $I_{з \max}$ проверяется по величине допустимого падения напряжения по формуле:

$$I_{з \max} \leq \frac{\Delta U_{\text{доп}}}{r_{\text{к.с}}} = \frac{U_{\max} - U_{\min}}{r_{\text{к.с}}}, \quad (1)$$

где $U_{\max}$ – максимальное напряжение на шинах поста секционирования с учетом рекуперативного торможения электроподвижного состава;

$U_{\min}$ – минимальное допустимое напряжение на шинах поста секционирования по условиям пропуска поездов;

$r_{\text{к.с}}$ – сопротивление секции контактной сети от тяговой подстанции до поста секционирования.

После выбора значения $I_{з \max}$ ток подзаряда $I_з$ накопителя для условий поддержания минимального напряжения на шинах поста секционирования в i -й момент времени (при условии, что при $U_{\text{ПС}i} < U_{\min}$ принимается $I_з = 0$) определяется по формуле:

$$I_{зi} = \frac{U_{\text{ПС}i} - U_{\min}}{U_{\max} - U_{\min}} \cdot I_{з \max}, \quad (2)$$

где $U_{ПС i}$ – фактическое напряжение на шинах поста секционирования в i -й момент времени.

Выбор напряжения включения накопителя электроэнергии для режима разряда

Изменение условий включения накопителя электроэнергии на разряд оказывает влияние на пропускную способность лимитирующих межподстанционных зон. Уменьшение напряжения стабилизации (включения накопителя в режим разряда) приводит к снижению влияния на межпоездные интервалы и наоборот. Для оценки влияния напряжения включения рассмотрим вариант, в котором при напряжении стабилизации 3200 В максимальный ток накопителя принимается равным 1000 А, а напряжение включения изменяется в диапазоне от 2800 до 3200 В.

Результаты расчетов для интенсивного режима работы системы тягового электроснабжения при схеме пропуска поездов повышенной массы «Н-с-Н-с» показывают, что изменение интервала движения при изменении напряжения включения на разряд для рассматриваемых трех межподстанционных зон происходит в относительно узком диапазоне, ограниченном 1 мин, что объясняется заданным ограничением мощности устройства. При увеличении напряжения включения для условий постов секционирования ПС1 и ПС3 снижение минимального интервала наблюдается с 9 до 8 мин, для ПС 2 – с 8 до 7 мин (рисунок 1).

Для условий ограниченной мощности накопителя напряжение стабилизации оказывает ограниченное влияние на изменение межпоездного интервала рассматриваемых межподстанционных зон. Для рассмотренного диапазона изменение интервала составило 1 мин. Аналогичное влияние на межпоездной интервал оказывает максимальный ток. При рассмотрении варианта, для которого напряжение включения составляет 3200 В, а напряжение стабилизации 3400 В, при котором ток устройства максимальное значение тока изменяется в диапазоне от 500 до 1000 А наблюдается снижение межпоездного интервала на 1 мин (рисунок 2).

Сокращение минимального межпоездного интервала связано с повышением минимального напряжения на токоприемниках локомотивов на лимитирующих межподстанционных зонах. Для условий рассматриваемых лимитирующих зон для напряжения стабилизации 3200 В повышение напряжения на токоприемнике локомотива в диапазоне увеличения номинальных токов накопителей от 500 до 1000 А носит линейный характер (рисунок 2Рисунок 2).

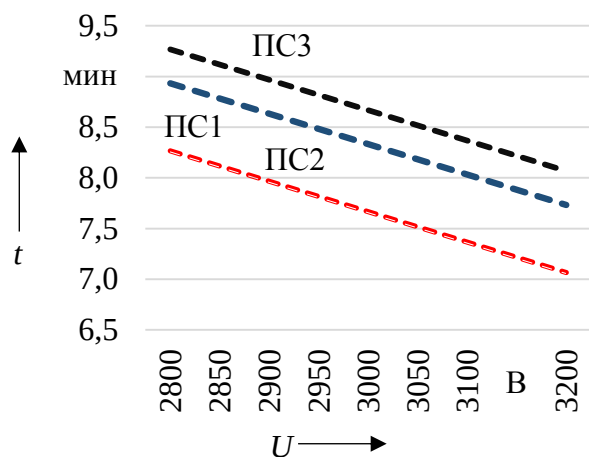


Рисунок 1 – График изменения минимального межпоездного интервала при изменении напряжения включения

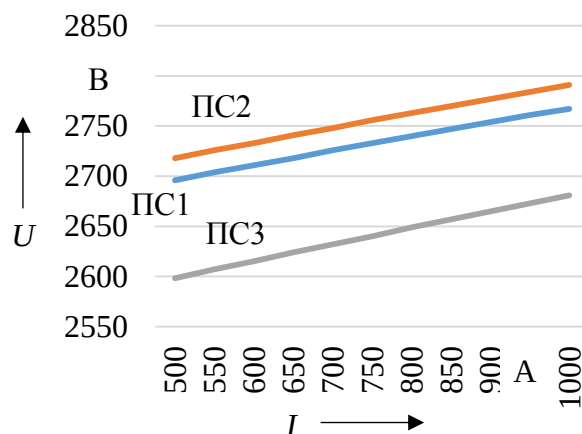


Рисунок 2 – График изменения минимального напряжения на токоприемниках локомотивов на лимитирующих межподстанционных зонах

Сокращение минимальных интервалов при увеличении напряжения стабилизации происходит в диапазоне токов от 700 до 1000 А. Снижение напряжения стабилизации систем накопления до уровня 2800 В приводит к снижению влияния на минимальное напряжение на токоприемнике и минимальный интервал. Увеличение напряжения стабилизации требует увеличения мощности и энергоемкости накопителей и приводит к сокращению времени, которое доступно для восстановления заряда накопителя.

Заключение

Сокращение минимальных межпоездных интервалов для рассматриваемого участка происходит в диапазоне токов разряда системы накопления на посту секционирования от 700 до 1000 А. Регулирование напряжения включения накопителя в режим разряда оказывает влияние на уровень напряжения на токоприемнике и пропускную способность. Понижение уровня напряжения включения до уровня 2800 В приводит к снижению влияния системы накопления на минимальное напряжение на токоприемнике электроподвижного состава.

Баланс параметров накопителя и настройки алгоритма его работы для рассматриваемого участка определены следующим образом: номинальная мощность в режиме разряда не менее 3,0 МВт, в режиме заряда не менее 1,5 МВт, номинальная энергоемкость не менее 1,6 МВт·ч, напряжение включения на разряд 3000 В, на регулируемый заряд – от 3100 В. Применение систем накопления с такими параметрами на трех постах секционирования

рассматриваемого участка позволяет сократить межпоездной интервал на 4 мин. Условия работы системы накопления в расчетном режиме характеризуются восстановлением степени заряженности, при регулируемая глубина разряда для обеспечения максимального срока службы аккумуляторной батареи не превышает 30 %.

Материалы подготовлены при поддержке проекта № 17-20-01148 офи_м_РЖД «Совершенствование системы тягового электроснабжения постоянного тока на полигонах обращения тяжеловесных и длиннооставных поездов путем использования накопителей электрической энергии» по гранту РФФИ и ОАО «РЖД».

Список литературы

1. Improving the technology of operating electric locomotives using electric power storage device / K. Domanov, A. Shatohin, V. Nezevak, V. Cheremisin. – Text: direct // E3S Web of Conferences : International Science Conference SPbWOSCE-2018 “Business Technologies for Sustainable Urban Development”. – EDP Sciences, 2019. – V. 110. – DOI:10.1051/e3sconf/201911001033/.

2. Cheremisin, V. T. Increase of energy efficiency of electric traction system in operating condition of sectioning posts with electric energy storage units / V. T. Cheremisin, V. L. Nezevak, A. P. Shatokhin. – Text: direct // Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. – 2015. – V. 326. – PP. 54–64.

3. Nezevak, V. Interaction’s Simulation Modeling of Electric Rolling Stock and Electric Traction System / V. Nezevak, A. Shatokhin. – Text: direct // The International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon 2019) / South Ural State University. – Chelyabinsk, 2019. – DOI:10.1109/uralcon.2019.8877672.

4. Nezevak, V. Assessment of energy intensity of the drive for traction power supply system / V. Nezevak, V. Cheremisin, A. Shatokhin. – Text: direct // International Scientific Conference Energy Management of Municipal Facilities and Sustainable Energy Technologies EMMFT 2018. – Code 226339. Advances in Intelligent Systems and Computing. – V. 982, 2020. – PP. 524–538.

5. Nezevak, V. Electric energy storage units applicability assessment of different kinds in the conditions of Moscow central ring / V. Nezevak, V. Cheremisin, A. Shatokhin. – Text: direct // Advances in Intelligent Systems and Computing : 8th International Scientific Siberian Transport Forum (TransSiberia 2019). – Novosibirsk; 2019. – Code 235799. – V. 1115. – AISC, 2020. – PP. 42–51.

6. Nezevak, V. Operating modes of electric energy storage systems on the Moscow Central Ring / V. Nezevak, V. Cheremisin, A. Shatokhin. – Text: direct // E3S Web of Conferences : Innovative Technologies in Environmental Science and Education (ITESE-2019). EDP Sciences, 2019. – V. 135. – DOI:10.1051/e3sconf/201913501063.

7. Черемисин, В. Т. Эффективность применения систем накопления электроэнергии на Московском центральном кольце / В. Т. Черемисин, В. Л. Незевак. – Текст : непосредственный // Мир транспорта. – 2019. – Т. 17. – № 5 (84). – С. 58–77.

8. Черемисин, В. Т. Перспективы применения систем накопления электроэнергии на Московском центральном кольце / В. Т. Черемисин, В. Л. Незевак. – Текст : непосредственный // Бюллетень результатов научных исследований. – 2020. – № 2. – С. 33–44.

9. Незевак, В. Л. Моделирование процессов электропотребления на тягу при изменении параметров графика движения поездов на электрифицированных участках с III и IV типом профиля пути / В. Л. Незевак. – Текст : непосредственный // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2019. – № 1 (61). – С. 156–166.

10. Незевак, В. Л. Совершенствование модели влияния параметров графика движения поездов на тяговое электропотребление на участках постоянного и переменного тока с I и II типом профиля пути при помощи регрессионных моделей и нейронных сетей / В. Л. Незевак. – Текст : непосредственный // Вестник транспорта Поволжья. – 2017. – № 6 (66). – С. 34–44.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Незевак Владислав Леонидович
Омский государственный университет
путей сообщения (ОмГУПС).
Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046,
Российская Федерация.
Кандидат технических наук, доцент, доцент
кафедры «Электроснабжение
железнодорожного транспорта», старший
научный сотрудник научно-
исследовательской части ОмГУПС.
Тел.: (3812) 31-34-46.
E-mail: NezevakWL@mail.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Nezevak Vladislav Leonidovich
Omsk State Transport University (OSTU).
35, Marx st., Omsk, 644046,
the Russian Federation.
PhD in Engineering, Associate Professor,
“Electric Supply of Railway Transport”
Department, Senior Researcher, Research
Division OSTU.
Phone: (3812) 31-34-46.
E-mail: NezevakWL@mail.ru.

В. Л. Незевак, С. С. Самолинов

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

АСПЕКТЫ ПРИМЕНЕНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК И СИСТЕМ НАКОПЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ ДЛЯ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

В статье рассматриваются ключевые аспекты применения энергетических установок и систем накопления электроэнергии для тягового электроснабжения. Выполнен обзор отечественных и зарубежных систем накопления электроэнергии, предназначенных для приема и возврата энергии рекуперации поезда, в составе системы электроснабжения рельсового транспорта. Рассмотрены показатели эффективности различных схемных решений, определены их основные преимущества и недостатки.

Ключевые слова: системы накопления электроэнергии, энергетическая установка, тяговое электроснабжение.

Vladislav L. Nezevak, Svyatoslav S. Samolinov

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

ASPECTS OF APPLICATION OF POWER PLANTS AND POWER STORAGE SYSTEMS FOR TRACTION POWER SUPPLY

The article discusses the key aspects of the use of power plants and power storage systems for traction power supply. A review of domestic and foreign electric power storage systems designed for receiving and returning energy from train recovery as part of the metro power supply system is performed. The efficiency indicators of various circuit solutions are considered, their main advantages and disadvantages are determined.

Keywords: power storage systems, power plant, traction power supply.

Устойчивое и бесперебойное электроснабжение является важным фактором любого производственного процесса. Постепенный рост интенсивности движения поездов, а также повышение масс составов привело к увеличению числа лимитирующих участков по пропускной способности из-за дефицита мощности в тяговой сети. В связи со сложностями реконструкции

тяговой сети, большими капитальными вложениями в энергетическую инфраструктуру и рассредоточением тяговой нагрузки на большом расстоянии перспективным считается внедрение систем накопления электроэнергии (СНЭ) и автономных энергетических установок.

В настоящее время накопители электрической энергии представлены электрохимическими батареями, суперконденсаторами (ионисторы), кинетическими накопителями (маховики). Зарубежная практика применения накопителей в метрополитене показывает их высокую эффективность, например, в метро г. Осака (Япония), где применяется накопитель электрохимического типа емкостью около 500 кВт·ч на напряжение 750 В. Устройство накопления, поставленная фирмой Tesla на ст. Осака в 2019 году, имеет емкость 7 000 кВт·ч [1]. Внешняя характеристика указанного накопителя близка к характеристике неуправляемого выпрямителя с коэффициентом статизма $k = -0,05$:

$$k = \frac{\Delta U}{U_{x.x}} \cdot \frac{I_{\text{ном}}}{\Delta I} \quad (1)$$

Проблематика вопросов по применению СНЭ, связанная с решением задач по снижению электропотребления, покрытию пиковых нагрузок, стабилизации напряжения, повышению энергетической эффективности является актуальной в электроэнергетике и на транспорте, в частности, для систем тягового электроснабжения железнодорожного транспорта.

Применительно к системам тягового электроснабжения 3,3 кВ постоянного тока вопросы применения СНЭ рассматривались многими зарубежными исследователями, в частности, польскими исследователями для условий Польской транспортной компании выполнена оценка эффективности СНЭ [2].

Сравнение свинцово-кислотных, никель-металлгидридных и литий-ионных аккумуляторов, суперконденсаторов и кинематических накопителей для условий Польских железных дорог показало, что на 10-летнем интервале эксплуатации наиболее рентабельным является применение суперконденсатора (оцениваемый экономический эффект от экономии электроэнергии составляет \$1,9 млн), далее в порядке убывания рентабельности – свинцово-кислотный аккумулятор (\$2,5 млн), кинетический накопитель (\$3,5 млн), литий-ионный аккумулятор (\$4,8 млн) и никель-металлгидридный (\$5,1 млн). Основные характеристики накопителей электроэнергии приведены в таблице 1 [3].

Таблица 1

Основные характеристики накопителей электроэнергии

Параметр	Батарея Hitachi LL1500-WS (Pb)	Kawasaki Gigacell (NiMh)	Hitachi CH-75-6 (Li-Ion)	Maxwell BMOD0063 P125 b08 (CK)	Vycon VDC (маховик)
Кол-во элементов / напряжение элемента, В	1650 / 2	91 / 36	148 / 22,2	27 / 125	6 / 600
Энергоемкость, А·ч / кВт·ч	1500 / 3	1800 / 5,4	75 / 5,0	– / 39	– / 0,52
Максимальный ток одной цепи, А	900	750	225 (3С)	100 (100×10)	150 (150×6)
Максимальная мощность, МВт	3,0	2,5	4,9	4,9	3,0
Кол-во циклов для разряда DOD	70 % – 4500	1,8 % – 367000	75 % – 4000	106	–
Стоимость, \$/кВт·ч	300	1412	900	5100 / на 1СК	6000 / на 1 маховик
Ориентировочная стоимость системы управления, \$	500000	500000	500000	500000	500000
Итоговая стоимость, \$млн	2,5	5,1	4,8	1,9	3,5

На отечественных железных дорогах системы хранения электроэнергии пока не нашли применение. Для участка Московского центрального кольца разработан экспериментальный образец инерционного накопителя мощностью 5 – 10 МВт и энергоемкостью 100 – 150 МДж (28 – 42 кВт·ч) [4, 5].

Возможность применения систем накопления энергии рассматривалась для одного из лимитирующих участков постоянного тока на Западно-Сибирской железной дороге [6]. Работа накопителя моделировалась в программном комплексе «Комплекс расчетов тягового электроснабжения», по

результатам которой были получены графики разряда/заряда. График тока и напряжения системы накопления электроэнергии, установленной на посту секционирования тяговой сети постоянного тока приведен на рисунке 1.

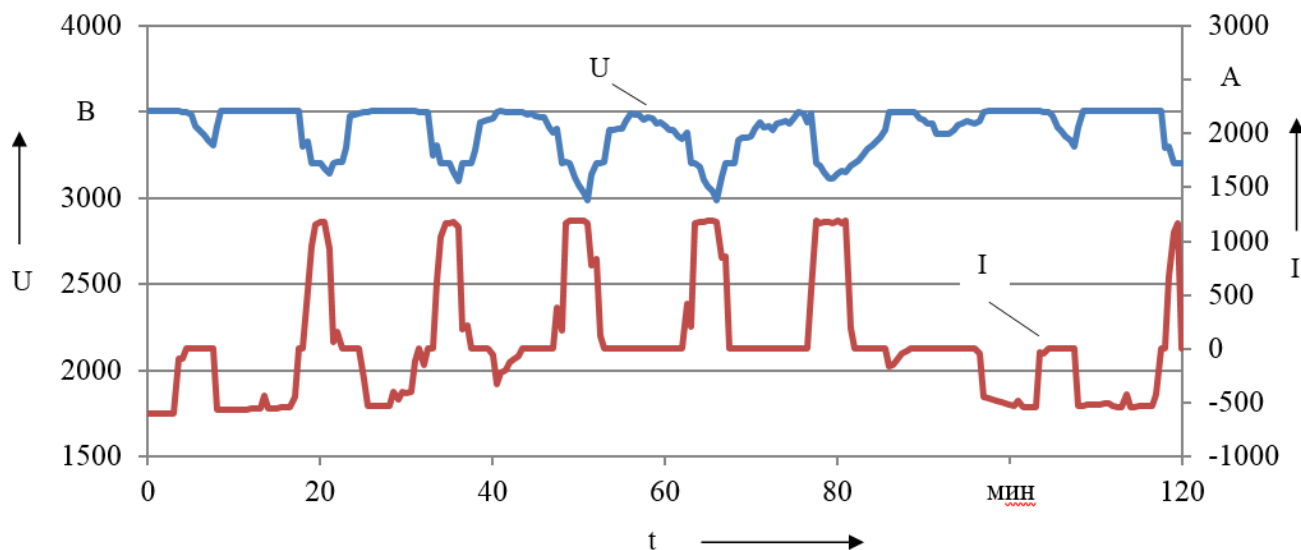


Рисунок 1 – График тока и напряжения СНЭ на посту секционирования

Имитационное моделирование взаимодействия СНЭ с электроподвижным составом позволяет оценить требуемые параметры. Особенность режима работы накопителя электроэнергии заключается в кратковременности режимов заряда/разряда и чередовании эпизодов работы.

Литий-ионные аккумуляторы при глубине разряда до 80% позволяют сохранить свой ресурс до 2000 циклов заряда/разряда. В условиях расчетного участка цикличность работы заряд/разряд оценивается для заданных размеров движения на уровне 12 циклов в сутки, в результате чего исчерпание ресурса работы аккумуляторов произойдет менее чем через половину года. Если глубина разряда не будет превышать 15 – 25 %, то ресурс литий-ионных аккумуляторов будет определяться условиями эксплуатации и может составить от 15 до 20 лет.

Производители литий-ионных аккумуляторов рекомендуют ток заряда/разряда батареи при её эксплуатации на уровне 20 % от номинальной емкости. Применительно к условиям расчетного участка с неравномерной электротяговой нагрузкой это требует стабилизации тока в режиме заряда/разряда на заданном уровне. В данном случае режим работы СНЭ с литий-ионными батареями предполагает работу в буферном режиме, который в условиях расчетного участка оказывается невостребованным.

Применение литий-ионных аккумуляторов в условиях работы СНЭ на расчетном участке имеет свои преимущества и недостатки. К первым относится достаточная продолжительность процессов заряда/разряда в условиях расчетного участка. Ко вторым – малый ресурс работы. С целью увеличения ресурса работы накопителя необходимо поддерживать ток разряда на уровне 0,2 С, так при токе разряда в 1200 А номинальная ёмкость батареи составит 6000 А·ч, а полезная емкость будет меньше номинальной в 5 раз.

Суперконденсаторы (ионисторы) обладают достаточно высокими энергетическими характеристиками и большим сроком службы, являются промежуточным звеном по энергоемкости между обычными конденсаторами и электрохимическими аккумуляторами. Суперконденсаторы производителя Maxwell работают в нормальном режиме при напряжении до половины от номинального, что позволяет использовать до 75% располагаемой энергии [7].

Суперконденсаторы характеризуются типовой постоянной времени, равной примерно 1 с. Данное время показывает продолжительность заряда суперконденсатора с 0 % до 63,2 % или разряда с уровня полного заряда до 36,8 % уровня разряда.

Суперконденсаторы подвержены деградации емкости, выражающейся в том, что снижение номинальной емкости на 30 % для суперконденсатора, поддерживаемого при напряжении 2,7 В, произойдет после 5 500 часов при температуре 65 °С, после 11 000 часов – при температуре 55°С, после 22 000 часов – при температуре 45 °С, после 44 000 часов – при температуре 35 °С, после 88 000 часов – при температуре 25 °С [8].

Продолжительность цикла заряд/разряд для рассматриваемого случая не превышает значений, находящихся в пределе 1 – 5 минут. Количество циклов за год составляет свыше 500 000. Данные характеристики хорошо согласуются с особенностями тяговой нагрузки расчетного участка. Мощность и энергоемкость накопителя на суперконденсаторах может изменяться в широком диапазоне путем набора модулей при последовательно-параллельном соединении.

Применение суперконденсаторов в СНЭ для условий рассматриваемого участка имеет свои преимущества и недостатки. К первым относятся: возможность снизить номинальную емкость накопителя по сравнению с литий-ионными аккумуляторами; высокий ресурс работы (по заявленным характеристикам уровень деградации будет определяться нагревом

суперкондесатора); продолжительность и количество циклов заряд/разряд хорошо согласуется с режимами работы накопителя, в совокупности это позволяет реализовать частоту энергообменных процессов с существующим графиком движения поездов. К недостаткам относят относительно высокую стоимость батарей суперконденсаторов при наборе заданной энергоемкости.

Инерционные накопители электроэнергии, представленные на отечественном рынке, обладают достаточно низким уровнем удельной энергоемкости – 0,55 кВт·ч/т, что ограничивает их применение в системах накопления электроэнергии тягового электроснабжения [9] в связи с необходимостью выделения достаточных по площади подготовленных площадок.

Мобильные газотурбинные электрогенерирующие станции в качестве мобильного источника энергии могут найти применение как отдельно, так и в комплексе с СНЭ. Мобильный вариант позволяет использовать вариант совместной работы мобильного источника энергии и СНЭ на передвижной платформе для решения задач обеспечения устойчивой работы систем тягового электроснабжения в вынужденных режимах (например, при проведении ремонтных работ на тяговых подстанциях или в условиях капитального ремонта пути). Система регулирования скорости вращения турбины позволяет работать в диапазоне нагрузки от 10 до 100%, что предпочтительно для тяговой нагрузки, которая обусловлена резко переменным характером [10].

Возможные варианты реализации СНЭ и рассмотренные характеристики обуславливают рассмотрение гибридных систем накопления электроэнергии. Комбинации элементов накопителей и источников энергии позволяет реализовать требуемую внешнюю характеристику устройства, совместимую с внешними характеристиками тяговых подстанций. Решение указанной задачи требует проработки вопроса по выбору соотношения энергоемкости различных видов накопителей в составе устройства и выбора мощности мобильного источника энергии или другого на основе возобновляемых источников энергии.

Список литературы

1. Tesla Powerpack // Tesla : сайт. – URL: <https://www.tesla.com/powerpack> (дата обращения: 27.09.2020). – Текст: электронный.
2. Radu, P. V. Analysis of wayside energy storage devices for DC heavy rail transport / P. V. Radu, Z. Drazek. – Text: direct // MATEC Web of Conferences :

13th International Conference Modern Electrified Transport. – EDP Sciences, 2018 – V.180. – DOI: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201818004001>.

3. Nezevak, V. Electric energy storage units applicability assessment of different kinds in the conditions of Moscow central ring / V. Nezevak, V. Cheremisin, A. Shatokhin. – Text: direct // Advances in Intelligent Systems and Computing : VIII International Scientific Siberian Transport Forum. Novosibirsk, 2020. – Т. 1115. – PP. 42–51. – DOI: 10.1007/978-3-030-37916-2.

4. Незевак, В. Л. Характеристика тяговой нагрузки для определения параметров накопителя электрической энергии / В. Л. Незевак, А. П. Шатохин. – Текст : непосредственный // Мир транспорта. – 2018. – Т. 16. – № 2 (75). – С. 84–94.

5. Черемисин, В. Т. Перспективы применения систем накопления электроэнергии на Московском центральном кольце / В. Т. Черемисин, В. Л. Незевак. – Текст : непосредственный // Бюллетень результатов научных исследований. – 2020. – № 2. – С. 33–44.

6. Незевак, В. Л. Применение накопителей электроэнергии в системе тягового электроснабжения с целью повышения пропускной способности на лимитирующих участках / В. Л. Незевак, С. С. Самолинов. – Текст : непосредственный // Транспорт Урала. – 2020. – № 1 (64). – С. 104–109.

7. Обзор суперконденсаторов BOOSTCAP // Titan Power Solution: сайт – URL: <https://www.titanps.ru/files/obzor-superkondensatorov-maxwell.pdf>. – Текст : электронный.

8. Попель, О. С. Современные виды накопителей электрической энергии и их применение в автономной и централизованной энергетике / О. С. Попель, А. Б. Тарасенко. – Текст : непосредственный // Теплоэнергетика. – 2011. – № 11. – С. 2–11.

9. ИБП на основе накопителя кинетической энергии // Русский сверхпроводник: сайт – URL: <http://rhsc.ru/portfolio/ибп-на-основе-накопителя-кинетическо/> (дата обращения 13.06.2019). – Текст : электронный

10. Загитов, С. Г. Газотурбинные электростанции на нефтегазовых промыслах / С. Г. Загитов. – Текст : непосредственный // Наука и мысль. – 2017. – № 1. – С. 11–18.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Незевак Владислав Леонидович

Омский государственный университет
путей сообщения (ОмГУПС).
Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046,
Российская Федерация.
Кандидат технических наук, доцент, доцент
кафедры «Электроснабжение
железнодорожного транспорта», старший
научный сотрудник научно-
исследовательской части ОмГУПС.
Тел.: (3812) 31-34-46.
E-mail: NezevakWL@mail.ru.

Самолинов Святослав Сергеевич

Омский государственный университет
путей сообщения (ОмГУПС).
Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046,
Российская Федерация.
Аспирант кафедры «Подвижной состав
электрических железных дорог» ОмГУПС.
Тел.: (3812) 3-27-61.
E-mail: samolinov97@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Nezevak Vladislav Leonidovich

Omsk State Transport University (OSTU).
35, Marx st., Omsk, 644046,
the Russian Federation.
PhD in Engineering, Associate Professor,
“Electric Supply of Railway Transport”
Department, Senior Researcher, Research
Division OSTU.
Phone: (3812) 31-34-46.
E-mail: NezevakWL@mail.ru.

Samolinov Svyatoslav Sergeevich

Omsk State Transport University (OSTU).
35, Marx st., Omsk, 644046,
the Russian Federation.
Postgraduate student at the Department of
«Rolling stock of electric Railways» OSTU.
Phone: 3812) 3-27-61.
E-mail: samolinov97@mail.ru.

УДК 621.331:621.311.4:621.314

Е. Ю. Салита, С. С. Самолинов, Е. Ю. Прищепа

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

ОЦЕНКА СОСТОЯНИЯ И СРЕДСТВА ДИАГНОСТИКИ СИЛОВЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ НА ЗАПАДНО-СИБИРСКОЙ ЖЕЛЕЗНОЙ ДОРОГЕ

На тяговых подстанциях постоянного тока Западно-Сибирской железной дороги эксплуатируются различные статические преобразователи, вентильные конструкции которых выполнены из силовых диодов и тиристоров штыревой и таблеточной конструкции. Многообразие применяемых полупроводниковых приборов, а также большой

срок службы вентильных конструкций актуализирует проблему диагностики технического состояния и прогнозирования возможных отказов в работе преобразователя.

Ключевые слова: силовые полупроводниковые приборы, вентильные конструкции, преобразователь, средства диагностики, постоянный ток.

Eugene Yu. Salita, Svyatoslav S. Samolinov, Eugene Yu. Prishchepa

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

STATE ASSESSMENT AND DIAGNOSTICS OF POWER SEMICONDUCTOR DEVICES OF CONVERTERS ON THE WEST SIBERIAN RAILWAY

At DC traction substations of the West Siberian railway various static converters are operated, the valve structures of which are made of power diodes and thyristors of a pin and tablet design. The variety of semiconductor devices used, as well as the long service life of valve structures, actualizes the problem of diagnosing the technical condition and predicting possible failures in the operation of the Converter.

Keywords: power semiconductor devices, valve structures, Converter, diagnostic tools, direct current.

На тяговых подстанциях постоянного тока Западно-Сибирской железной дороги (ЗСЖД) в 2020 году эксплуатируются 322 выпрямительных и 11 выпрямительно-инверторных преобразователей. В составе преобразователей используются вентильные конструкции типа УВКЭ-1, ПВКЕ-2, ПВЭ-3, ПВЭ-5, ТПЕД, В-ТПЕД, БСЕ, ТПДЕ-Ж, В-МППД, ВИПЭ, И-ПТП и другие, созданные с использованием силовых вентилей (диодов или тиристоров) различных типов и классов. Распределение вентильных конструкций на штыревых и таблеточных диодах по сроку службы на ЗСЖД приведены на рисунке 1.

Более 95 % выпрямителей на штыревых диодах отработывают третий и четвертый нормативный срок службы (при норме в 15 лет), 72,4 % выпрямителей на таблеточных вентилях отработывают второй нормативный срок (при норме в 25 лет). Кроме того, несоответствие текущих параметров полупроводниковых приборов паспортным данным, отсутствие полного объема информации о техническом состоянии и измерительных комплексов и методов позволяющих оценить и спрогнозировать дальнейшую работу выпрямителя

актуализирует проблему выбора прибора для проведения испытаний силовых диодов и тиристоров [1].

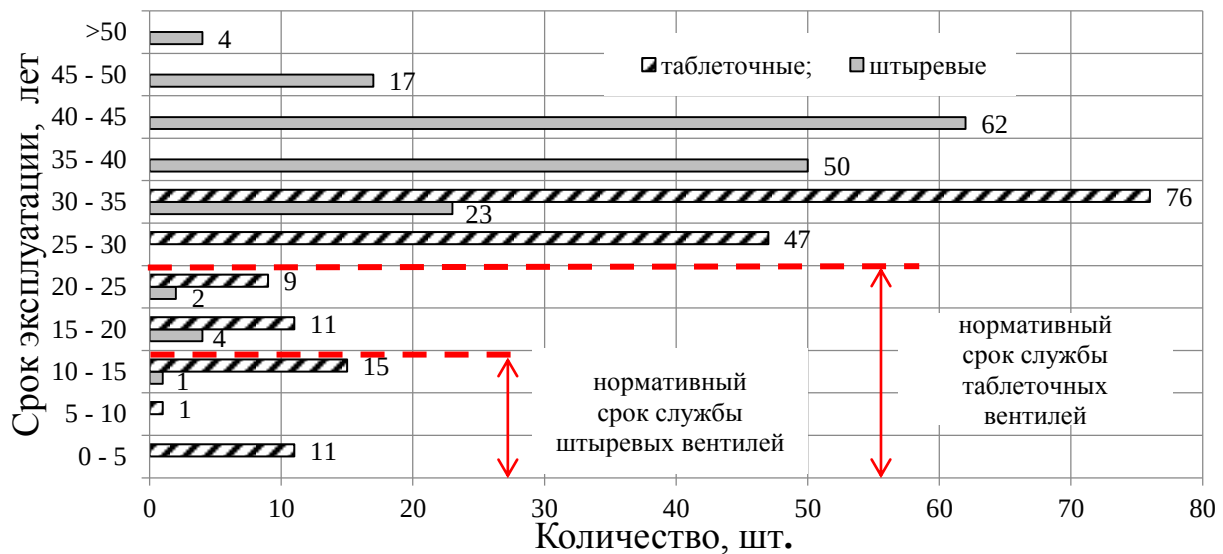


Рисунок 1 – Распределение преобразователей на штыревых и таблеточных вентилях по срокам эксплуатации

Методы и технологии диагностических испытаний вентилях должны соответствовать регламентирующей документации, государственным и отраслевым инструкциям. В соответствии с ГОСТ 24461-80 и Правилами содержания тяговых подстанций и линейных устройств системы тягового электроснабжения (ПСТП) [2] штыревые и таблеточные вентилях должны проверяться по импульсному обратному току I_{RRM} [3].

Значение импульсного обратного тока соответствует мгновенному значению обратного тока в момент времени, который соответствует амплитуде максимально допустимого повторяющегося импульсного обратного напряжения. Формы импульсов подаваемого напряжения и измеряемого тока, обусловленные указанным ГОСТ, представлены на рисунке 2 [4].

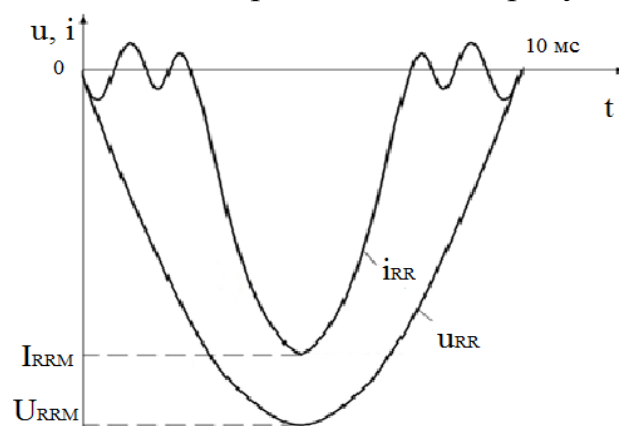


Рисунок 2 – Формы импульсов подаваемого напряжения и измеряемого тока

Существующие методы контроля технического состояния вентилях полупроводниковых выпрямителей тяговых подстанций (проверка распределения тока между параллельными ветвями диодов или тиристоров, обратного напряжения между последовательно соединенными вентилями), регламентируемые ПСТП и стандартом ГОСТ 24461-80, не позволяют спрогнозировать их надёжность.

Для штыревых вентилях предусмотрена диагностика по тепловому сопротивлению, т.к. тепловое сопротивление начинает возрастать после пяти лет эксплуатации, вследствие чего возможны отказы в результате их перегрева («теплового старения»). Московским электромеханическим заводом в 1978 г. был разработан прибор ИТСВ-1 для измерения теплового сопротивления вентилях, которым раньше были оснащены все дистанции электроснабжения [5]. Данные приборы в настоящее время не производятся, аналоги на рынке отсутствуют.

Диагностика силовых полупроводниковых приборов по обратному импульсному току позволяет оценить вентиляную прочность, тем самым выявить их предотказное состояние. В вентилях конструкциях с таблеточными диодами их число в последовательной части сведено к минимуму благодаря использованию вентилях высокого класса. Стоит отметить, что в результате потери класса вентиля и уменьшения обратного сопротивления происходит перераспределение обратного напряжения между вентилями, включенными последовательно, что в конечном итоге увеличивает их интенсивность старения. Приборы для диагностики диодов и тиристоров по обратному импульсному току и их технические характеристики приведены в таблице 1.

В 1997 году по рекомендации сотрудников ОмГУПС и ЗСЖД электрические параметры вентилях в блоках БСЕ и методика контроля обратного импульсного тока была внесена в инструкцию по эксплуатации заводом-изготовителем и групповой паспорт диодов. Допустимые значения повторяющегося импульсного обратного тока диодов приведены в таблице 2.

Выпускаемые отечественной промышленностью приборы для диагностики силовых вентилях в большинстве случаев не отвечают требованию мобильности, поэтому их использование для диагностики преобразователей тяговых подстанций ограничено.

Таблица 1

Приборы для диагностики диодов и тиристоров

Название	АДИП-1	Крона-902.02	ДТСД	ЭГПС-4000-01	ПОИТ
Производитель	НПЦ «Альфа – Ритм»	НПК «Крона»	НПП «Энергия»		ДЭЛ ЗСЖД, ОмГУПС
$U_{D(R)RM}$, кВ – амплитуда испытательного напряжения	до 8	до 4	до 2	до 4,1	до 4
$I_{D(R)RM}$, мА – диапазон измеряемого тока	0,03 – 200	0 – 75	0,002 – 2,5	0 – 100	0,1 – 70
Габаритные размеры, мм.	750х 600х 600	480х 240х 340	220х 110х 40	450х 530х 470	410х 130х 360
Масса не более, кг.	35	18	0,5	11	5

Таблица 2

Допустимые значения повторяющегося импульсного обратного тока

Диод	ВК2-200	ВЛ-200			ДЛ161-200	ДЛ133-500	ДЛ153-2000	Д453-2000
класс	8	8	10	12	12	14	20	24
U_{RRM} , кВ	0,8	0,8	1	1,2	1,2	1,4	2	2,4
I_{RRM} , мА при T корпуса $(25 \pm 10) ^\circ C$	2						5	

В 2006 году сотрудниками Дорожной электротехнической лаборатории (ДЭЛ) ЗСЖД и кафедры «Электроснабжение железнодорожного транспорта» ОмГУПСа был изготовлен макетный образец прибора для диагностики диодов и тиристоров, а в последствие – и сам прибор для измерения импульсных обратных токов (ПОИТ), и разработана инструкция по его эксплуатации [1].

Прибор создан на микроэлектронной элементной базе, отличается низкой стоимостью, простотой в применении, имеет небольшие габариты (410×130×360 мм), массу не более пяти килограммов. С целью снижения массы прибора и удобства транспортировки используются внешние регулировочный

автотрансформатор (типа ЛАТР) и высоковольтный трансформатор типа (ОЛ-0,63/6У1) или аналогичные им другого типа, которые имеются на каждой подстанции.

Прибор позволяет производить испытания согласно ПСТП и ГОСТ 24461-80, т.е. измеряет обратный импульсный ток в момент времени, при котором амплитуда обратного импульсного напряжения максимальна.

Относительная погрешность измерений устройства в диапазоне от 500 до 3000 В составляет не более 1,6 %.

Метод диагностирования исправного состояния вентилях путем измерения импульсных обратных токов имеет высокую эффективность. Своевременная проверка вентилях обратным импульсным током повысила качество диагностики преобразователей, дала возможность проследить динамику ухудшения характеристик диодов в зависимости от времени наработки, что позволило своевременно принять меры по предупреждению повреждений.

В 2013 году изготовлен второй экземпляр прибора ПОИТ, который используется для диагностики силовых вентилях преобразовательных агрегатов в дистанциях электроснабжения без привлечения работников ДЭЛ ЗСЖД [6].

За все время эксплуатации прибора ПОИТ была проведена диагностика 248 преобразовательных агрегатов (71329 диодов), в результате отбраковано 1934 силовых вентилях (2,71 %), взято на контроль 563 (0,79 %). За 2020 год проверено 12 выпрямителей (3900 вентилях), выявлено 341 шт. неисправных диодов (8,74 %), 107 деградирующих (2,74 %). Результаты проверки силовых вентилях преобразователей тяговых подстанций ЗСЖД по обратным импульсным токам по типам вентилях приведены в таблице 3.

Таблица 3

Общий процент отказов вентилях по типам

Тип вентиля	Всего, шт.	На контроле, шт.	Отбраковано	
			шт.	%
ДЛ153-2000	1393	1	3	0,2
ДЛ161-200	1080	6	12	1,1
ВЛ-200	45000	322	930	2,1
ВК-200	516	3	18	3,5
ДЛ133-500	20880	159	759	3,6
Д453-1600	528	31	36	6,8
Д453-2000	1512	41	121	8,0

В настоящее время прибор ПОИТ не отвечает требованиям, предъявляемым к современным цифровым средствам диагностики, необходима его модернизация.

Данный прибор позволяет производить диагностику вентилях только до 40 класса, тогда как на Западно-Сибирской железной дороге эксплуатируются диоды 50-го класса (например, выпрямитель БЛ-В-МПП-Д-3,15к-3,3к УХЛ4, диод Д163-1600-50).

Необходимо привести технические характеристики ПОИТ к следующим показателям:

- формирование испытательного импульса напряжения с амплитудой, соответствующей установленному напряжению класса (плавное регулирование до 8,0 кВ);
- использование импульсного блока питания, соответствующего техническим условиям, вместо ЛАТР-2М и ОЛ-0,63/6У1;
- формирование одиночного испытательного импульса длительностью 1 мс;
- подключение к персональному компьютеру для автоматической обработки статистических данных.

Также следует произвести декларирование по ТР ТС 004 «О безопасности низковольтного оборудования», ТР ТС 020 «Электромагнитная совместимость ТС», и сертификацию утверждения типа средств измерения.

Список литературы

1. Салита, Е. Ю. Результаты диагностики силовых вентилях преобразователей на тяговых подстанциях / Е. Ю. Салита, Т. В. Ковалева, Н. В. А. В. Никонов. – Текст : непосредственный // Транспорт Урала. – 2019. – № 1 (60). – С. 97–100.

2. Правила содержания тяговых подстанций, трансформаторных подстанций и линейных устройств системы тягового электроснабжения : утверждены распоряжением ОАО «РЖД» от 05.08.2016 г. № 1587р в редакции распоряжения ОАО «РЖД» от 14.04.2020 № 838/р. – 440с. – Текст : непосредственный.

3. Гапанович, В. А. Энергетическая стратегия и электрификация российских железных дорог / В. А. Гапанович, С. Н. Елифанцев, В. А. Овсейчук ; под ред. Г. П. Кутового. – Москва : Эко-Пресс, 2012. – 196 с. – Текст : непосредственный.

4. ГОСТ 24461–80. Приборы полупроводниковые силовые. Методы измерений и испытаний = Power semiconductor devices. Test and measurement

methods : национальный стандарт Российской Федерации : издание официальное : утвержден и введен в действие постановлением Государственного комитета СССР по стандартам от 18.12.80 № 5877 : переиздание : дата введения 1982-01-01 / разработчики А. Н. Ильичев, В. П. Белотелов, В. Б. Братолубов, Б. П. Курбатов; В. В. Сажина. – Москва : Изд-во стандартов, 1990. – 64 с.

5. Силовые преобразователи тяговых подстанций и электроподвижного состава : учебное пособие / Е. Ю. Салита, Г. С. Магай, Т. В. Комякова, Т. В. Ковалева. – Омск : Омский гос. ун-т путей сообщения, 2013. – 131 с. – Текст : непосредственный.

6. Салита, Е. Ю. Анализ состояния вентильных конструкций преобразователей железнодорожного транспорта / Е. Ю. Салита, Т. В. Ковалева, А. В. Никонов. – Текст : непосредственный // Приборы и методы измерений, контроля качества и диагностики в промышленности и на транспорте : материалы второй всероссийской научно-технической конференции с международным участием / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2016. – С. 213–220.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Салита Евгений Юрьевич

Омский государственный университет
путей сообщения (ОмГУПС).
Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046,
Российская Федерация.
Кандидат технических наук, доцент, доцент
кафедры «Электроснабжение
железнодорожного транспорта» ОмГУПС.
Тел.: (3812) 31-34-46.
E-mail: tatevgeniy@list.ru.

Самолин Святослав Сергеевич

Омский государственный университет
путей сообщения (ОмГУПС).
Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046,
Российская Федерация.
Аспирант кафедры «Подвижной состав
электрических железных дорог» ОмГУПС.
Тел.: (3812) 3-27-61.
E-mail: samolinov97@mail.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Salita Evgeniy Yuryevich

Omsk State Transport University (OSTU).
35, Marx st., Omsk, 644046,
the Russian Federation.
PhD in Engineering, Associate Professor,
“Electric Supply of Railway Transport”
Department OSTU.
Phone: (3812) 31-34-46.
E-mail: tatevgeniy@list.ru.

Samolinov Svyatoslav Sergeevich

Omsk State Transport University (OSTU).
35, Marx st., Omsk, 644046,
the Russian Federation.
Postgraduate student at the Department of
“Rolling stock of electric Railways” OSTU.
Phone: (3812) 3-27-61.
E-mail: samolinov97@mail.ru.

Прищепа Евгений Юрьевич

Омский государственный университет
путей сообщения (ОмГУПС).
Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046,
Российская Федерация.
Аспирант кафедры «Подвижной состав
электрических железных дорог» ОмГУПС.
Тел.: (3812) 3-27-61.
E-mail: prishcha95@mail.ru.

Prishchepa Evgeniy Yuryevich

Omsk State Transport University (OSTU).
35, Marx st., Omsk, 644046,
the Russian Federation.
Postgraduate student at the Department of
“Rolling stock of electric Railways” OSTU.
Phone: (3812) 68-03-01.
E-mail: prishcha95@mail.ru.

УДК 629.423:06

П. Г. Колпахчян

Ростовский государственный университет путей сообщения (РГУПС),
г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

ИДЕНТИФИКАТОР СОСТОЯНИЯ СИНХРОННОГО ТЯГОВОГО ДВИГАТЕЛЯ С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ НА РОТОРЕ

В статье рассмотрены синхронные тяговые двигатели с постоянными магнитами на роторе, которые являются одним из перспективных видов тяговых электрических машин. Их применение на тяговом подвижном составе позволяет создавать тяговый электропривод с высокими технико-экономическими показателями.

Ключевые слова: синхронный тяговый двигатель с постоянными магнитами, система управления, идентификатор состояния.

Pavel G. Kolpakhchyan

Rostov State Transport University (RSTU), Rostov-on-Don, the Russian Federation

STATE OBSERVER OF THE SYNCHRONOUS TRACTION MOTOR WITH PERMANENT MAGNETS ON THE ROTOR

The article discusses synchronous traction motors with permanent magnets on a rotor, which are one of the most promising types of traction electric machines. Their use on traction rolling stock makes it possible to create a traction electric drive with high technical and economic indicators.

Keywords: synchronous traction motor with permanent magnets on the rotor, control system, state observer.

Синхронные тяговые двигатели с постоянными магнитами на роторе (СТДПМ) являются одним из перспективных видов тяговых электрических машин благодаря своим высоким удельным показателям. Их применение на тяговом подвижном составе позволяет создавать тяговый электропривод с высокими технико-экономическими показателями [1-3]. К преимуществам СТДПМ относятся наличие возбуждения на роторе, отсутствие необходимости подвода энергии к ротору, малые потери на роторе, высокие показатели мощности на единицу массы и объема.

Достижение высоких показателей тягового электропривода с СТДПМ требует учета особенностей конструкции и способов управления такого типа тяговых двигателей. Одной из них является отсутствие возможности регулирования возбуждения. Это приводит к тому, что поток от постоянных магнитов (ПМ) рассчитывается из условия равенства величины ЭДС холостого хода при максимальной частоте вращения тягового двигателя максимальному напряжению статора. В составе тягового электропривода СТДПМ работает в двух зонах регулирования – до номинальной скорости с постоянством момента, выше номинальной скорости – с постоянством мощности. К концу первой зоны, в точке номинального режима, напряжение на обмотке статора достигает предельного значения и при дальнейшем росте скорости не изменяется. Поэтому при номинальной частоте вращения возбуждения от ПМ оказывается недостаточно для того, чтобы создать номинальный момент без увеличения тока статора выше номинального. Для решения этой проблемы ротор СТДПМ выполняется с углубленным, V-образным расположением ПМ [1,2]. В результате указанного расположения ПМ появляется разница в индуктивностях по продольной и поперечной осям тягового двигателя и становится возможным использование реактивной составляющей момента. За счет оптимизации размеров и расположения ПМ доля реактивной составляющей момента в номинальном режиме может быть доведена до 60% от полного момента [1,3].

Одним из существенных преимуществ бесколлекторных тяговых двигателей является возможность более эффективного использования сцепления в месте контакта «колесо-рельс». Это достигается за счет возможности быстрого подавления возникающего боксования [4]. Для этого необходимо, чтобы регулирование момента тягового двигателя выполнялось с высокой точностью и быстродействием. Для существующих локомотивов и

моторвагонного подвижного состава требуется, чтобы некомпенсированная постоянная времени регулирования момента составляла величину 5 – 6 мс [4].

Регулирование момента СТДПМ с указанным быстродействием требует применения системы управления на основе принципов векторного регулирования [5,6]. При создании такой системы необходимо учитывать, что результирующий момент СТДПМ создается как за счет магнитоэлектрической, так и реактивной составляющей, то есть требует формирования проекций тока статора на продольную и поперечную оси с высокой точностью. Поэтому точность определения положения ротора оказывает значительное влияние на величину и характер изменения момента двигателя. Наличие ошибки в определении положения ротора приводит к ухудшению точности и быстродействию регулирования, появлению нежелательных колебаний момента. Поэтому разработка идентификатора состояния СТДПМ, позволяющего с достаточной точностью определять положение ротора, является одним из условий создания эффективного тягового электропривода на основе тяговых двигателей такого типа.

Эффективность применения векторного регулирования для управления СТДПМ во многом определяется точностью работы идентификатора состояния. Изменение параметров синхронной электрической машины, в отличие от асинхронной, в меньшей степени влияет на правильность определения положения ротора. Однако для повышения точности регулирования, все же, необходимо контролировать активное сопротивление обмотки статора и потокосцепление, создаваемое постоянными магнитами, так как они могут меняться в зависимости от температуры и ряда других факторов. Поэтому идентификатор состояния СТДПМ должен строиться с использованием адаптационных алгоритмов. Для этого возможно применение идентификаторов состояния построенных на основе метода наименьших квадратов, наблюдателя Люенбергера, фильтров Калмана или сигма-фильтров. В случае создания наблюдателя состояния для СТДПМ, с учетом особенностей объекта регулирования и требований к управлению, рациональным является применение фильтра Калмана в дискретном варианте [5-7].

Для создания фильтра Калмана используется математическое описание СТДПМ как явнополюсной синхронной электрической машины без демпферной клетки. Уравнения состояния записаны во вращающейся системе координат $d - q$ совмещенной с ротором. Расположенные на роторе ПМ создают

потокосцепление статора. Их действие аналогично действию обмотки возбуждения. Потокосцепление ротора Ψ_f представляется пространственным вектором, расположенным вдоль продольной оси d . Входящие в уравнения пространственные векторы представляются через их проекции на оси координат:

$$\vec{U}_s = U_{sd} + jU_{sq}; \quad \vec{I}_s = I_{sd} + jI_{sq}; \quad \vec{\Psi}_s = \Psi_{sd} + j\Psi_{sq},$$

где $\vec{U}_s$, $\vec{I}_s$, $\vec{\Psi}_s$ – пространственные вектора напряжения, тока и потокосцепления статора и их проекции на оси системы координат $d - q$.

Система координат $d - q$ вращается в электрическом пространстве с синхронной скоростью $p\omega = \omega_{эл}$, где p – число пар полюсов СТДПМ, ω – угловая скорость вращения ротора, $\omega_{эл}$ – угловая частота напряжения приложенного к обмотке статора. Процессы в СТДПМ описываются системой уравнений относительно проекций токов статора [3]:

$$\begin{cases} L_d \frac{dI_{sd}}{dt} = U_{sd} - R_s I_{sd} + L_{sq} p\omega I_{sq}; \\ L_q \frac{dI_{sq}}{dt} = U_{sq} - R_s I_{sq} - L_{sd} p\omega I_{sd} - p\omega \Psi_f, \end{cases} \quad (1)$$

где R_s – активное сопротивление обмотки статора.

Электромагнитный момент СТДПМ определяется с использованием выражения:

$$M_{эм} = \frac{3}{2} p (\Psi_f I_{sq} + \Delta L_s I_{sd} I_{sq}), \quad (2)$$

Для использования математического описания СТДПМ в алгоритме фильтра Калмана необходимо записать дифференциальные уравнения в форме Коши в матричном виде:

$$\frac{d}{dt}[I] = ((p\omega[D]([I] + [\Psi]) - [R])[I] + [U])[L]^{-1}, \quad (3)$$

где $[R]$ – диагональная матрица активных сопротивлений обмоток;

$[U]$ – вектор напряжений приложенных к обмоткам.

$[D] = \begin{bmatrix} 0 & L_{sq} \\ -L_{sd} & 0 \end{bmatrix}$ – матрица, учитывающая ЭДС вращения;

$[L] = \begin{bmatrix} L_{sd} & 0 \\ 0 & L_{sq} \end{bmatrix}$ – матрица индуктивностей обмоток статора;

$$[\Psi] = \begin{bmatrix} 0 \\ -\Psi_f \end{bmatrix} - \text{матрица потокосцеплений создаваемых ПМ.}$$

Наблюдатель состояния на основе расширенного фильтра Калмана создается на основе уравнений, описывающих СТДПМ (3). В рассматриваемом случае переменными состояния объекта являются проекции векторов тока статора на оси системы координат $d-q$. Управляющим воздействием являются фазные напряжения обмоток статора, измеряемыми величинами являются фазные токи. Уравнения состояния имеют следующий вид:

$$\begin{cases} \frac{d}{dt}[I] = (p\omega[D]([I] + [\Psi]) - [R] \cdot [I])[L]^{-1} + [B][U_{f_{изм}}][L]^{-1}; \\ [I_{f_{изм}}] = [C][I], \end{cases} \quad (4)$$

где $[B]$ и $[C]$ – матрицы управления и измерения;

$[U_{f_{изм}}]$ – вектор фазных напряжений (управляющих воздействий).

Матрица управления осуществляет преобразование фазных напряжений в проекции на оси системы координат $d-q$ (прямое преобразование Парка - Кларка). Матрица измерения осуществляет обратное преобразование Парка – Кларка (переход от проекций на оси системы координат $d-q$ к фазным токам).

Вектор переменных состояния дополняется двумя переменными – активным сопротивлением статора и потокосцеплением, создаваемым ПМ.

Фильтр Калмана, как было указывается выше, используется в дискретной постановке. В процессе работы фильтра на каждом временном шаге выполняется прогноз и коррекция. Прогноз состояния системы на $k+1$ шаге осуществляется с использованием одного из методов численного решения дифференциальных уравнений (явного метода Эйлера):

$$[\Psi]_{k+1}^* = f(t_k, [\Psi]_k) = [\Psi]_k + \Delta T \cdot \frac{d}{dt}[\Psi]_k, \quad (5)$$

где ΔT – шаг дискретизации по времени.

Для повышения точности прогноза могут использоваться более точные методы численного интегрирования.

Прогнозируемая матрица ковариации ошибок вектора состояния:

$$[P]_{k+1}^* = [F]_k [P]_k [F]_k^T + Q, \quad (6)$$

где $[F]_k = \frac{\partial f(t_k, [I]_k)}{\partial [I]_k}$ – матрица эволюции системы для момента времени t_{k+1} ,

$[Q]$ – матрица ковариации процесса.

На этапе коррекции рассчитывается ковариационная матрица для вектора отклонения (вектора ошибки) и оптимальная по Калману матрица коэффициентов усиления:

$$\begin{aligned} [S]_k &= [C][P]_{k+1}^*[C]^T + [R], \\ [K]_k &= [P]_{k+1}^*[C]^T [S]_k^{-1} \end{aligned} \quad (7)$$

где $[R]$ – матрица ковариации ошибок измерения.

Затем определяются вектор оценки состояния системы и его ковариационная матрица на шаге $k+1$:

$$\begin{aligned} [I]_{k+1} &= [I]_{k+1}^* + [K]_{k+1}([I]_{f \text{ изм}} - [C][I]_{k+1}^*), \\ [P]_{k+1} &= ([I] - [K]_{k+1}[C])[P]_{k+1}^* \end{aligned} \quad (8)$$

где $[I]_{f \text{ изм}}$ – вектор фазных токов (измеряемых величин).

Матрица ковариации процесса определяется на основании информации о структуре уравнений математической модели СТДПМ и точности, с которой известны параметры тягового двигателя. Матрица ковариации ошибок измерений зависит от точности измерений и наличия информации и помехах.

В отличие от асинхронного тягового двигателя, для управления СТДПМ необходимо иметь информацию о начальном положении ротора. Учитывая специфику работы тягового двигателя в составе тягового электропривода, в пусковых режимах точность регулирования момента должна быть не хуже, чем при движении. Поэтому необходимо определять начальное положение ротора до начала процесса регулирования момента. Поскольку в системе управления СТДПМ датчиков положения ротора, как правило нет и изменяется частота вращения (угловая скорость вращения) ротора, необходимо использовать для этой цели косвенный методы. Одним из таких методов является метод тестовых импульсов, аналогичный применяемому для вентильно-индукторных электрических машин [8]. Этот метод основан на косвенном измерении индуктивности электрической машины. Применительно к СТДПМ, который является явнополюсной синхронной электрической машиной, этот метод может быть реализован следующим образом. С помощью трехфазной обмотки статора формируется серия тестовых импульсов с различным пространственным расположением. Величина возникающих в качестве отклика импульсов тока определяется индуктивностью электрической машины. После анализа серии импульсов тока может быть определено положение ротора относительно

статора (например, угол между системой координат $d-q$ связанной со статором и осью обмотки А статора).

Исследование описанного подхода к созданию идентификатора состояния СТДПМ на основе расширенного фильтра Калмана был выполнен с использованием математической модели тягового электропривода. Анализ работы в различных режимах показал, что идентификатор состояния позволяет определять необходимые для работы системы управления переменные состояния СТДПМ с точностью, достаточной для регулирования тягового электропривода с требуемыми динамическими показателями.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 17-20-05033\17-офи_м).

Список литературы

1. Синхронные тяговые двигатели с возбуждением от постоянных магнитов // Железные дороги мира. – 2011. – № 6. – С. 38– 42. – Текст : непосредственный.

2. Колпахчян, П. Г. Особенности применения синхронных тяговых двигателей с постоянными магнитами на электроподвижном составе / П. Г. Колпахчян, Г. И. Колпахчян. – Текст : непосредственный // Вестник всероссийского научно-исследовательского и проектно-конструкторского института электровозостроения. – 2010. – № 2. – С. 199–212.

3. Колпахчян, П. Г. Особенности управления синхронными тяговыми двигателями с постоянными магнитами на роторе на электроподвижном составе / П. Г. Колпахчян, М. С. Подберезная, А. Р. Шайхиев. – Текст : непосредственный // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2018. – № 2 (70). – С. 132–137.

4. Kolpakhchyan, P. Systems approach to the analysis of electromechanical processes in the asynchronous traction drive of an electric locomotive / P. Kolpakhchyan, A. Zarifian, A. Andruschenko. – Text: direct / Studies in Systems, Decision and Control. – 2017. – №87. – С. 67–134.

5. Базылев, Д. Н. Алгоритм адаптивного бессенсорного управления синхронным двигателем / Д. Н. Базылев, А. А. Пыркин, А. А. Бобцов. – Текст : электронный // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2018. – №1. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/algoritm-adaptivnogo-bessensornogo-upravleniya-sinhronnym-dvigatелем> (дата обращения: 04.10.2020).

6. Воронин, С. Г. Векторное управление синхронными двигателями с возбуждением от постоянных магнитов / С. Г. Воронин, Д. А. Курносов, А. С. Кульмухаметова. – Текст : непосредственный // Электротехника. – 2013. – № 10. – С. 50–54.

7. High-speed induction motor state observer based on an extended kalman filter / P. G. Kolpakhchyan, A. E. Kochin, B. N. Lobov [et al.]. – Text: direct // Advances in Intelligent Systems and Computing. – 2020. – Vol. 1156 AISC. – P. 633–644.

8. The rotor initial position determination of the hi-speed switchreluctance electrical generator for the steam-microturbine / P. G. Kolpakhchyan, V. I. Parshukov, B. N. Lobov [et al.]. – Text: direct // Lecture Notes in Electrical Engineering. – 2020. – Vol. 554. – P. 628–638.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Колпахчян Павел Григорьевич

Ростовский государственный университет
путей сообщения (РГУПС).

пл. Ростовского Стрелкового Полка
Народного Ополчения, д. 2, г. Ростов-на-
Дону, 344038, Российская Федерация.

Доктор технических наук, доцент,
заведующий кафедрой «Электрические
машины и аппараты» РГУПС.

Тел.: + 7 (863) 272-65-12.

E-mail: kolpahchyan@mail.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Kolpakhchyan Pavel Grigorievich

Rostov State Transport University (RSTU).

2, Rostovskogo Strelkovogo Polka Narodnogo
Opolcheniya sq., Rostov-on-Don, 344038,
the Russian Federation.

Doctor of Technical Science, Docent,
head of the department «Electrical machines
and apparatus » RSTU.

Phone: +7 (863) 272-65-12.

E-mail: kolpahchyan@mail.ru.

УДК 621.316

В. С. Петровнин, С. С. Горобей, А. А. Кузнецов

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС),

г. Омск, Российская Федерация

СПОСОБЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ МОЩНОСТИ НА ОТОПЛЕНИЕ ПАССАЖИРСКИХ ВАГОНОВ

В статье представлен обзор схематических решений и описаны элементы системы электроснабжения пассажирского вагона. Описана комбинированная система отопления пассажирского вагона. Представлены технические решения способов регулирования электрической мощности, которые могут быть применены в системе отопления

пассажирского вагона с целью снижения электропотребления и упростить техническое обслуживание и ремонт систем электроснабжения пассажирских вагонов.

Ключевые слова: Электроснабжение, пассажирский вагон, отопление, регулятор напряжения, электроэнергия, способы регулирования электрической мощности.

Sergei S. Gorobei, Vladislav S. Petrovnin, Andrey A. Kuznetsov

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

METHODS FOR REGULATING ELECTRIC POWER FOR HEATING PASSENGER RAILWAY CARS

The article provides an overview of schematic solutions and describes the elements of the passenger railway car power supply system. A combined heating system for a passenger car is described. The technical solutions of electric power control methods that can be applied in the heating system of a passenger car in order to reduce power consumption and simplify maintenance and repair of power supply systems for passenger cars are presented.

Keywords: Power supply, passenger railway carriage, heating, voltage regulator, electricity, methods for regulating electrical power.

Комбинированная система отопления пассажирского вагона модели 61-4170 постройки ОАО «ТВЗ», в соответствии с рисунком 1, включает в себя: котел отопительный с дополнительной ёмкостью на расширителе; запасной бак; разводящие и отопительные трубопроводы; ручной насос и электронасос; наливную трубу; обогреватели наливных труб системы водоснабжения; возвратную трубу с пробкой; калориферы кондиционера и трубопроводы, соединяющие их с отопительным котлом; трубопроводы для выпуска воздуха; контрольные приборы, арматуру для регулировки и управления системой.

Отопление вагона осуществляется нагревом теплоносителя в котле отопительном высоковольтными электронагревателями или твердым топливом.

Теплоноситель поступает через коллектор в верхние разводящие трубы сети отопления и стояки, затем в нижние отопительные оребрѐнные трубы, где, отдавая тепло окружающему воздуху, охлаждается и, вследствие разности температур в котле и стояках, возвращается обратно в котел. Образующийся пар отводится по трубопроводу через коллектор в расширитель котла.[1]

Для нагрева теплоносителя при помощи электроэнергии в котел

вертикально вмонтированы двадцать четыре высоковольтных нагревательных элементов, мощностью по 2 кВт каждый при номинальном напряжении 500 В (максимальное напряжение 670 В) [2].

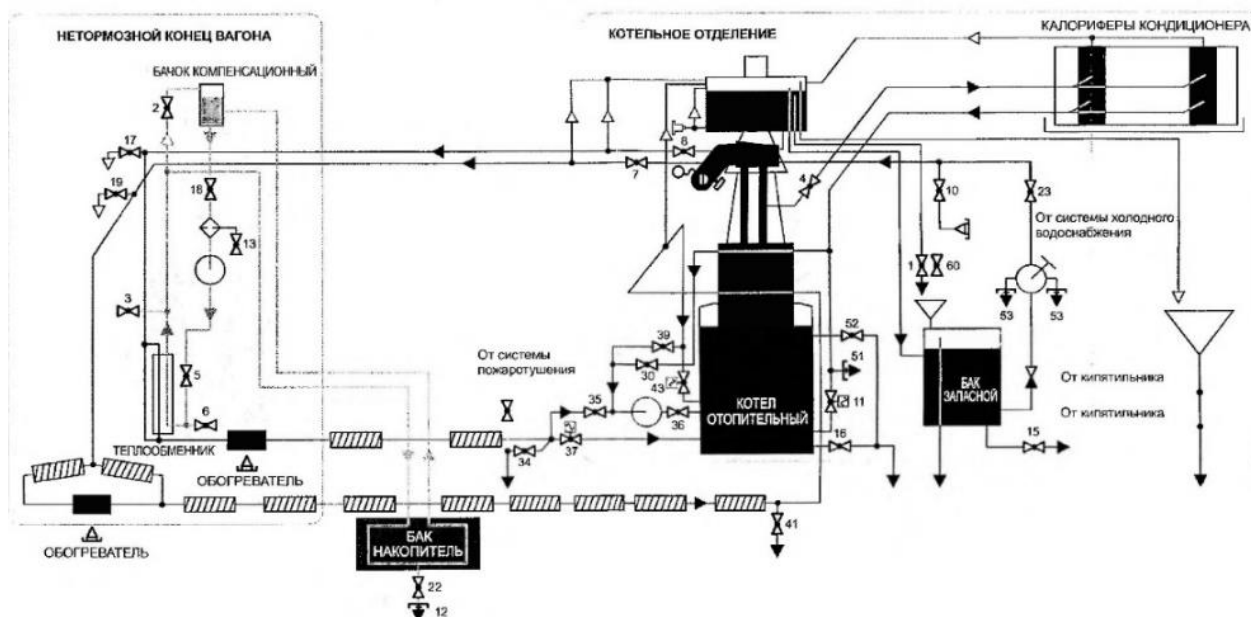


Рисунок 1 – Схема комбинированной системы отопления пассажирского вагона

Все нагревательные элементы соединены в две параллельные группы (по 12 шт.), в соответствии с рисунком 2, управляемые контакторами К1 и К2 и защищенные каждая своим предохранителем. Группы в свою очередь состоят из двух параллельных подгрупп по шесть последовательно соединенных элементов [3].

Техническим результатом является повышение коэффициента мощности устройства во всем диапазоне регулирования мощности нагрузки, снижение нелинейных искажений тока, напряжения в питающих сетях, снижение коэффициента пульсаций тока в нагрузке, повышение функциональных возможностей устройства, питающегося от источников энергии переменного и постоянного тока с одновременным преобразованием характера полного входного электрического сопротивления устройства [4].

В способе и устройстве регулирования мощности нагрузки регулирование мощности выполняют плавным изменением входного электрического сопротивления устройства с одновременным преобразованием характера электрического входного сопротивления в активную составляющую данного сопротивления.

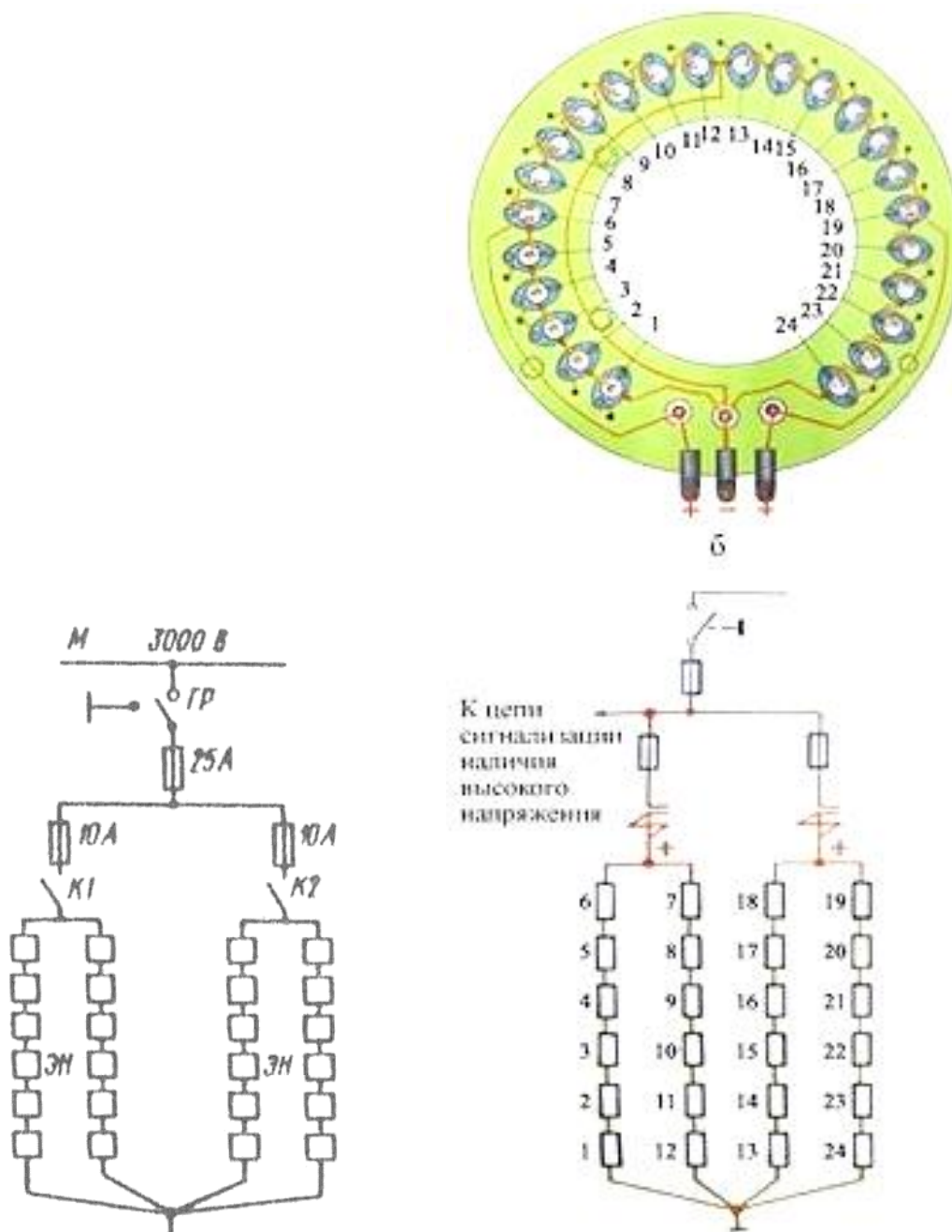


Рисунок 2 – Схема соединения нагревательных элементов

Предлагаемый способ и устройство регулирования мощности нагрузки имеют следующие преимущества:

- 1) коэффициент мощности устройства близок к единице на всем диапазоне регулирования мощности нагрузки;
- 2) от источника энергии переменного тока потребляется практически синусоидальный ток, а от источника энергии постоянного тока потребляется практически постоянный ток, поэтому устраняются нелинейные искажения напряжения в питающих сетях во время работы устройства;

3) снижается коэффициент пульсаций тока в нагрузке;

4) повышаются функциональные возможности устройства, питающегося от источников энергии переменного и постоянного тока с одновременным преобразованием характера полного входного электрического сопротивления устройства в активную составляющую этого сопротивления.

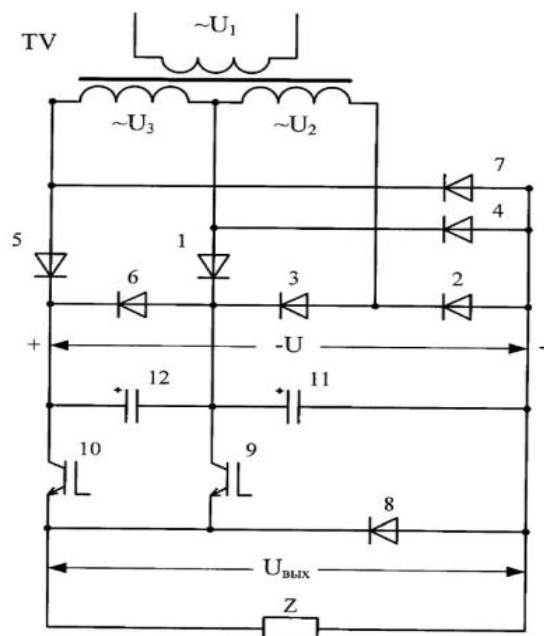


Рисунок 3 – Устройство регулирования мощности нагрузки

Известно техническое решение регулирования мощности с управляемыми инверторами [5]. Техническим результатом является повышение коэффициента мощности и снижение нелинейных искажений тока и напряжения в сети переменного тока, коэффициента пульсаций тока на входе инвертора. В способе регулирования мощности и устройстве однофазного инвертора, в соответствии с рисунком 4, в плечах инвертора полупроводниковые приборы запираются с минимальными углами опережения выключения приборов.

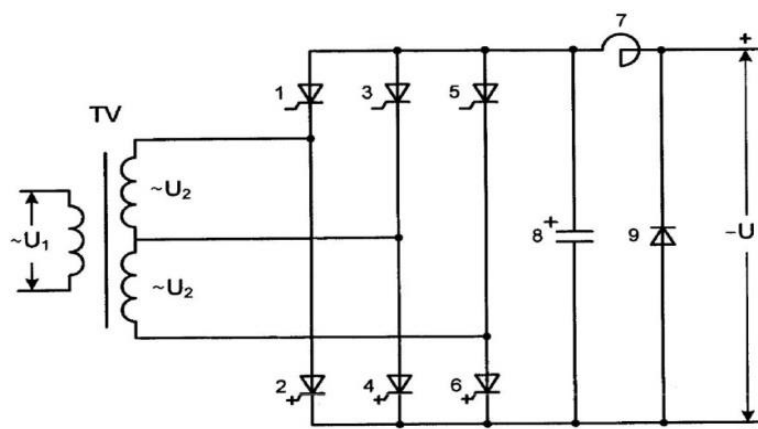


Рисунок 4 – Устройство однофазного инвертора

В зоне регулирования мощности инвертора указанный угол опережения выключения изменяется при увеличении мощности инвертора до минимального угла, а при уменьшении мощности инвертора – увеличивается до 180 градусов. Регулируемая составляющая мощности инвертора суммируется с нерегулируемой составляющей. Выходы плеч инвертора подключены к отпайкам секций вторичной обмотки трансформатора. Анодная группа плеч инвертора собрана на однооперационных приборах, а катодная группа плеч инвертора – на двухоперационных приборах. Параллельно входу инвертора включены накопители электрической энергии большой емкости. Обратный диод катодом соединен с плюсовой шиной, а анодом – с минусовой шиной сети постоянного тока.

Представленные технические решения способов регулирования электрической мощности, могут быть применены в системе отопления пассажирского вагона с целью снижения электропотребления. Инновационные методы и технические решения, после конструктивных, аналитических, систематических и экономических расчётов, позволят значительно повысить эффективность обогрева пассажирского вагона и обеспечат энергосберегающее управление устройствами обогрева воды, что, в результате, значительно снизит потребление электрической энергии на отопление пассажирских вагонов.

Список литературы

1. Вагон пассажирский некупейный модель 61-4447 (Заводской №111). Руководство по эксплуатации 4447.00.00.000 РЭ : утверждено 14.03.2008. – ОАО «Тверской вагоностроительный завод», 2008. – 153 с. – Текст : непосредственный.
2. Болотин З. М. Проводник пассажирских вагонов : учебник начального профессионального образования / З. М. Болотин, Н. Л. Травина, В. В. Соломатин. – Москва : Академия, 2004. – С. 168–175. – ISBN 5-7695-1476-0. – Текст : непосредственный.
3. Егоров В. П. Устройство и эксплуатация пассажирских вагонов (для проводников) : учебное пособие / В.П. Егоров. – Изд. 2-е. – Москва : УМЦ МПС России, 2004. – С. 214–216. – Текст : непосредственный.

4. Электронные преобразователи / Л.А. Астраханцев, Н.Л. Рябченко, В.А. Тихомиров [и др.]. – Текст : непосредственный // Железнодорожный транспорт. – 2008. – № 10. – С. 54.

5. Основы энергосберегающего управления электрифицированными технологическими установками / Л. А. Астраханцев, Н. Л. Рябченко, В. А. Тихомиров [и др.]. – Текст : непосредственный // Энергосберегающие технологии и окружающая среда : труды междунар. конференции / Иркутский гос. ун-т путей сообщения. – Иркутск, 2004. – С. 122–128.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Петровнин Владислав Сергеевич

Омский государственный университет
путей сообщения (ОмГУПС).
Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046,
Российская Федерация.
Аспирант кафедры «Теоретическая
электротехника» ОмГУПС.
E-mail: vladpetrovnin@mail.ru

Кузнецов Андрей Альбертович

Омский государственный университет
путей сообщения (ОмГУПС).
Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046,
Российская Федерация.
Доктор технических наук, профессор,
Заведующий кафедрой «Теоретическая
электротехника» ОмГУПС.
E-mail: kuznetsovaa.omgups@gmail.com.

Горобей Сергей Сергеевич

Омский государственный университет
путей сообщения (ОмГУПС).
Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046,
Российская Федерация.
Аспирант кафедры «Теоретическая
электротехника» ОмГУПС.
E-mail: gorobei.florist@yandex.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Petrovnin Vladislav Sergeevich

Omsk State Transport University (OSTU).
35, Marx av.m, Omsk, 644046,
the Russian Federation.
Post-graduate student of the department
"Theoretical electrical engineering" OSTU.
E-mail: vladpetrovnin@mail.ru.

Kuznetsov Andrey Albertovich

Omsk State Transport University (OSTU).
35, Marx av.m, Omsk, 644046,
the Russian Federation.
Doctor in Technical Sciences, Professor,
the head of the department «Theoretical
electrical engineering» OSTU.
E-mail: kuznetsovaa.omgups@gmail.com.

Gorobei Sergei Sergeevich

Omsk State Transport University (OSTU).
35, Marx av.m, Omsk, 644046,
the Russian Federation.
Post-graduate student of the department
"Theoretical electrical engineering" OSTU.
E-mail gorobei.florist@yandex.ru.

П. К. Шкодун, А. В. Долгова

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

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДИКИ АНАЛИЗА ПРОФИЛОГРАММ КОЛЛЕКТОРА ТЯГОВЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ ПОДВИЖНОГО СОСТАВА

Целью данной статьи является разработка методики обработки данных профилограмм коллектора тяговых электродвигателей подвижного состава. В статье приведена четырехэтапная методика формирования данных для анализа профилограмм, включающая фиксацию мгновенных значений высот коллекторных пластин за несколько оборотов якоря электрической машины в виде профилограмм при одинаковой частоте вращения якоря электродвигателя, формирование «усредненного» профиля коллектора и разностных реализаций профиля коллектора, а также обработки условно «истинного» профиля коллектора и разностных реализаций. Подтверждена возможность использования условно «истинного» профиля коллектора в холодном и горячем состоянии для оценки качества формовки коллектора, а разностных реализаций - для оценки вибрационных составляющих.

Ключевые слова: электродвигатель, профиль коллектора, вибрация.

Pavel Konstantinovich Shkodun, Dolgova Anna Vladimirovna

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

IMPROVEMENT OF THE ANALYSIS PROCEDURE ROLLING STOCK TRACTION MOTOR COLLECTOR PROFILE

The purpose of this article is to develop a method for processing the profilograms of the collector of traction electric motors of rolling stock. The article presents a four-stage technique for generating data for analyzing profilograms, including fixing the instantaneous values of the heights of the collector plates for several revolutions of the armature of an electric machine in the form of profilograms at the same frequency of rotation of the electric motor armature, the formation of an "averaged" profile of the collector and differential realizations of the collector profile, as well as processing conditionally Of the "true" collector profile and differential realizations. The possibility of using the conditionally "true" profile of the collector in the cold and hot state has been confirmed

to assess the quality of the reservoir formation, and differential realizations - to assess the vibration components.

Keywords: *electric motor, collector profile, vibration.*

Эксплуатация подвижного состава железных дорог России осуществляется в различных климатических зонах, при этом функционирование тяговых электродвигателей (ТЭД) подвижного состава определяется комплексным воздействием ряда факторов, в том числе механических. Стратегия научно-технологического развития холдинга «Российские железные дороги» на период до 2020 года и на перспективу до 2025 года предполагает разработку и внедрение инновационных диагностических систем, а также систем мониторинга подвижного состава [1]. На работу коллекторно-щеточного узла ТЭД значительное влияние оказывает как состояние подшипников, так и профиль коллектора, причем в процессе эксплуатации возможно значительное отклонение формы коллектора от цилиндрической из-за влияния температуры и механических усилий, приложенных к пластинам коллектора [2].

В настоящее время технологическая документация по ремонту ТЭД предусматривает оценку состояния профиля коллектора в холодном и горячем состоянии путем определения значения биения в указанных состояниях и вычисления разности между биением в холодном и горячем состоянии [3]. Принимая во внимание тот факт, что профиль коллектора, оцениваемый путем измерения расстояния между плоскостью коллекторной пластины и уровнем щеткодержателя и применяемый в приборе ПКП-4М (разработан на кафедре «Электрические машины и общая электротехника» ОмГУПС) [4], наиболее полно характеризует воздействие профиля коллектора на щетку и обуславливает работу коллекторно-щеточного узла, тем не менее, остается проблема объективной оценки влияния на работу указанного узла как «истинного» профиля коллектора, так и подшипников в собранной машине, а также разделение степени влияния составляющих и оценка качества динамической формовки коллектора. Совместно с прибором используется программа *Profilometr*, внешний вид которой представлен на рисунке 1.

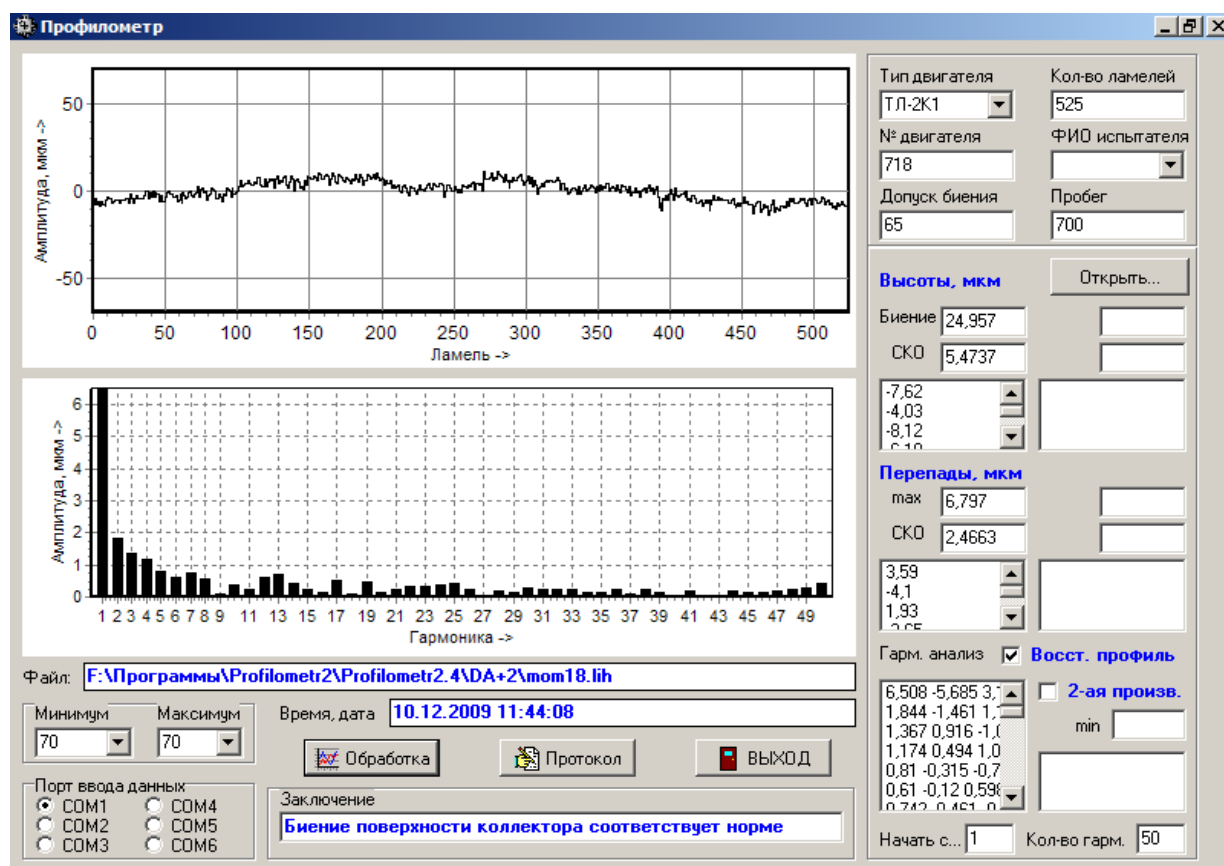


Рисунок 1 – Рабочий экран программы *Profilometr*

Для достижения указанной цели авторами предлагается сформировать методику анализа зафиксированных профилограмм коллектора в холодном и горячем состоянии за несколько оборотов вращения якоря ТЭД с одинаковой частотой. Разрабатываемая методика заключается в том, что из каждой полученной реализации профиля коллектора в холодном (горячем) состоянии вычитается усредненный профиль коллектора в холодном (горячем) состоянии и формируются разностные реализации, которые отражают вибрационные составляющие, что позволит выполнить отдельную оценку состояния профиля коллектора и вибрации, возникающей за счет наличия зазора в подшипниках. Рассмотрим последовательность анализа профилограмм с помощью предлагаемой методики.

Первый этап. С помощью прибора контроля профиля коллектора производится запись k профилограмм в холодном и горячем состояниях за несколько оборотов якоря электрической машины, при этом поддерживается некоторая выбранная частота вращения якоря $n_{изм}$.

Второй этап. Осуществляется усреднение значений высот коллекторных пластин по всем k реализациям и формируются «усредненные» профили

коллектора в холодном и горячем состояниях, каждый из которых соответствует условно «истинному» профилю коллектора, поскольку при усреднении происходит уменьшение влияния мгновенных значений вибрационных составляющих. Получаемый профиль коллектора повторяется от оборота к обороту и характеризует условно «истинный» профиль коллектора в холодном или горячем состоянии.

Третий этап. Выполняется вычитание мгновенных значений высот коллекторных пластин для каждой k -ой реализации профилограмм в холодном и горячем состоянии коллектора и формируются разностные реализации, содержащие вибрационные составляющие.

Четвертый этап. Осуществляется обработка значений высот коллекторных пластин по всем k разностным реализациям профилей коллектора в холодном и горячем состояниях, каждый из которых соответствует вибрационным составляющим, воздействующим на электрическую щетку. Следует также отметить, что получаемые разностные реализации не синхронизированы с оборотами якоря электрической машины.

Пятый этап. Производится вычисление диагностических параметров для «усредненного истинного» и разностного профиля коллектора для холодного и горячего состояний, например, путем расчета биения как разности между максимальным и минимальным значениями и других диагностических параметров.

Для реализации предложенной методики проведены экспериментальные исследования тяговых электродвигателей серии ЭДП-810 (СТК-810) электровозов 2ЭС6 на базе сервисного локомотивного депо. В ходе эксперимента фиксировались профилограммы с помощью прибора ПКП-4М, который имеет бесконтактный вихретоковый параметрический преобразователь, преобразующий расстояние до поверхности в пропорциональный электрический сигнал, записываемый в энергонезависимую память встроенного в прибор накопителя информации.

На рисунке 2 приведены результаты регистрации семи ($k = 7$) реализаций профиля холодного коллектора ТЭД ЭДП-810 (якорь имеет 516 коллекторных пластин) и усредненного профиля на рисунке 3. При выполнении измерения якорь электродвигателя вращался с постоянной частотой вращения $n_{изм}$ и за семь оборотов, учитывая его инерционность, частота вращения оставалась практически неизменной.

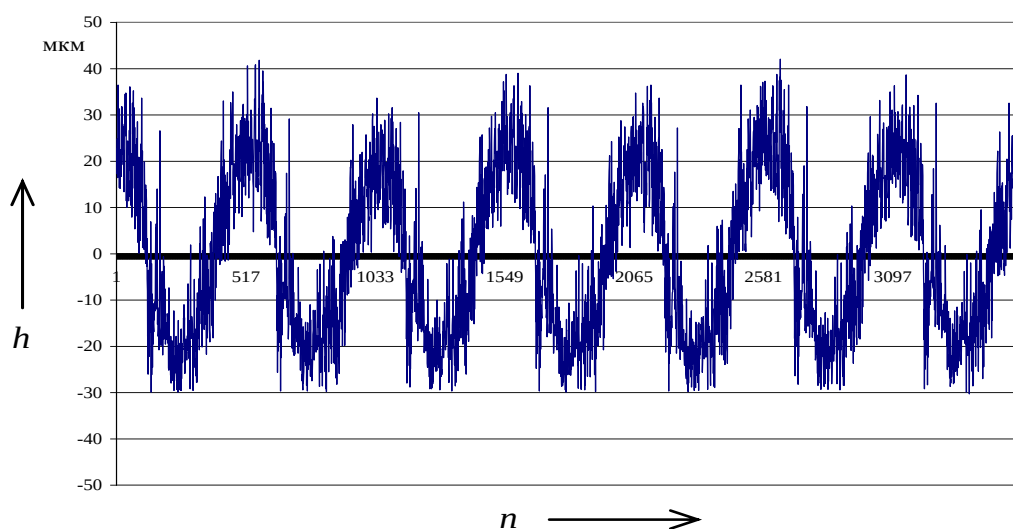


Рисунок 2 – График мгновенных значений семи реализаций профиля коллектора ТЭД ЭДП-810 (холодный)

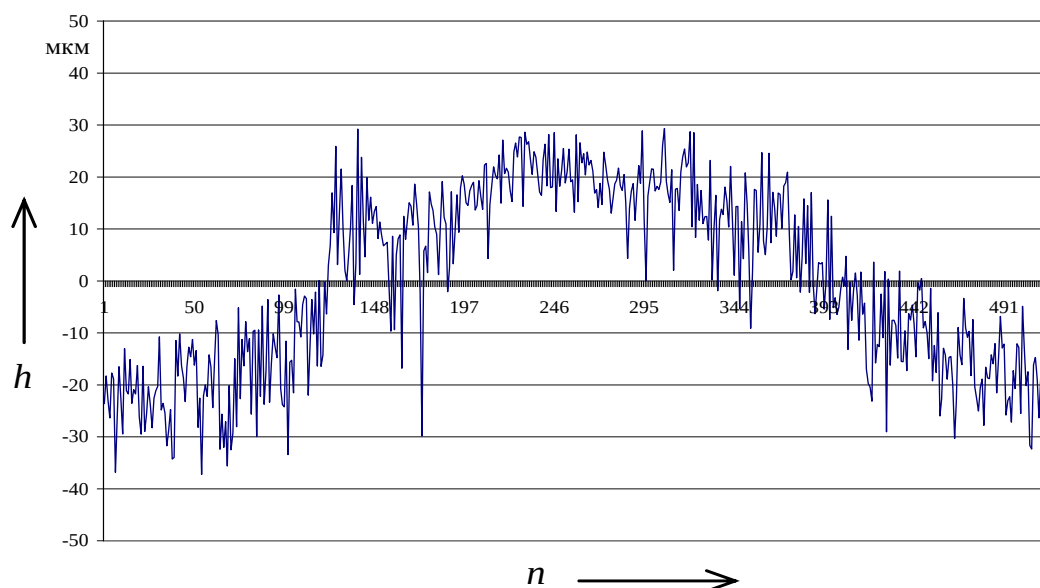


Рисунок 3 – Усредненный профиль коллектора ТЭД ЭДП-810 (холодный)

При использовании предлагаемой методики, получены разностные реализации профиля коллектора, отражающие наличие вибрационных составляющих для коллектора в холодном (рисунок 4) и горячем (рисунок 5) состояниях.

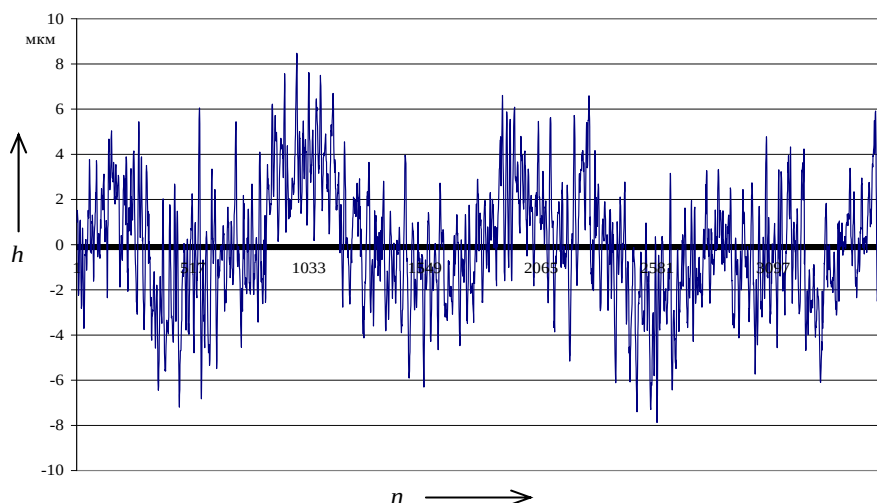


Рисунок 4 – График мгновенных значений разностных реализаций профиля коллектора ТЭД ЭДП-810 (холодный)

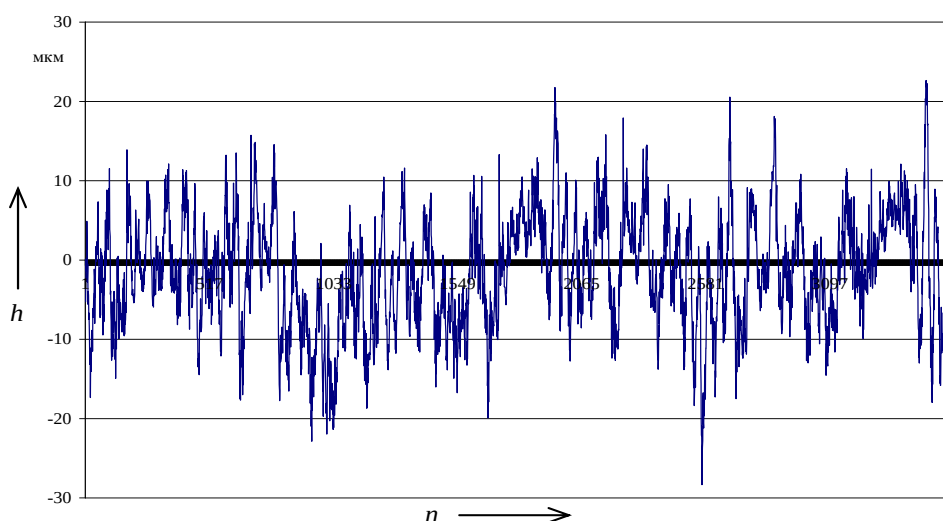


Рисунок 5 – График мгновенных значений разностных реализаций профиля коллектора ТЭД ЭДП-810 (горячий)

Анализ полученных графиков мгновенных значений разностных реализаций показывает, что вибрация, имеющаяся в диагностическом сигнале, имеет нестационарный характер и не синхронизирована с оборотом якоря электрической машины. Результаты расчета биения для условно «истинного» профиля холодного коллектора составило 66,58 мкм, при этом вибрационное биение 16,35 мкм, а эти же величины для горячего коллектора составили 64,87 мкм и 50,98 мкм соответственно.

Предлагаемая методика позволяет сформировать усредненный профиль коллектора и выполнить подготовку данных для расчета его диагностических

параметров, отражающих качество формовки и изготовления якоря; сформировать разностные мгновенные реализации профиля коллектора, позволяющие оценить вибрационные составляющие, создаваемые подшипниками ТЭД. В развитие предлагаемой методики выполняются исследования для количественной оценки подобных вибрационных сигналов и их нормирования с целью выявления признаков возможных дефектов подшипников.

Список литературы

1. Стратегия научно-технологического развития холдинга «Российские железные дороги» на период до 2020 года и на перспективу до 2025 года. «Белая книга». – Москва, 2015. – 63 с. – Текст : электронный // ОАО «РЖД» : официальный сайт. – URL: http://www.rzd-expo.ru/innovation/BelKniga_2015.pdf (дата обращения: 04.10.2020).

2. Харламов, В. В. Методы и средства диагностирования технического состояния коллекторно-щеточного узла тяговых электродвигателей и других коллекторных машин постоянного тока: монография / В. В. Харламов. – Омск : Омский гос. ун-т путей сообщения, 2002. – 233 с. – Текст : непосредственный.

3. Совершенствование технологии диагностирования технического состояния коллекторно-щеточного узла тяговых электродвигателей электровозов: монография / В. В. Харламов, П. К. Шкодун, А. В. Долгова, Д. А. Ахунов / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2015. – 198 с. – Текст : непосредственный.

4. Харламов, В. В. Совершенствование процесса диагностирования профиля коллектора тяговых электродвигателей с помощью прибора ПКП-4М / В. В. Харламов, П. К. Шкодун, Д. А. Ахунов, А. С. Хлопцов. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2013. – № 1 (13). – С. 42–48.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Шкодун Павел Константинович

Омский государственный университет
путей сообщения (ОмГУПС).

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

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

Тел.: (3812) 31-18-27.

E-mail: emoe@omgups.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Shkodun Pavel Konstantinovich

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Ph. D. in Engineering, Associate Professor of the
department «Electrical machines and general
electrical engineering» OSTU.

Phone: (3812) 31-18-27.

E-mail: emoe@omgups.ru

Длогова Анна Владимировна
Омский государственный университет
путей сообщения (ОмГУПС).
Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046,
Российская Федерация.
Кандидат технических наук, доцент
кафедры «Информатика и компьютерная
графика», ОмГУПС.
Тел.: (3812) 31-18-66.
E-mail: pmm@omgups.ru.

Dolgova Anna Vladimirovna
Omsk State Transport University (OSTU).
35, Marx st., Omsk, 644046,
the Russian Federation.
Ph. D. in Engineering, Associate Professor
of the department «Informatics and computer
graphics» OSTU.
Phone: (3812) 31-18-66.
E-mail: pmm@omgups.ru.

УДК 656.25

А. Г. Ходкевич, М. В. Ключников

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

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЯГОВОЙ СЕТИ НА ЛИНЕЙНЫЕ ЦЕПИ АВТОБЛОКИРОВКИ

В статье приведены результаты эксперимента по оценке электромагнитного влияния тяговой сети на линейные цепи автоблокировки, предложены технические решения, позволяющие обеспечить надежную работу устройств железнодорожной автоматики в условиях сложной электромагнитной обстановки.

Ключевые слова: Электрическое влияние, магнитное влияние, линейная цепь, тяговая сеть, рельсовая линия.

Anton G. Khodkevich, Maxim V. Klyuchnikov

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

TRACTION GRID INFLUENCE ON LINEAR CIRCUITS OF AUTOMATIC BLOCK SYSTEM RESEARCH

The article contains experiment results evaluation of traction grid electromagnetic influence on automatic block system linear circuits, offers technical solutions to ensure reliable railway automation devices operation in an unfavorable electromagnetic environment.

Keywords: Electrical influence, magnetic influence, linear circuit, traction grid, rail line.

Устройства сигнализации, централизации и блокировки (СЦБ) обеспечивают безопасность, а также четкую организацию движения поездов и маневровой работы. В последние годы актуальной проблемой становится обеспечение безотказной работы систем железнодорожной автоматики в условиях сложной электромагнитной обстановки.

Электрифицированные железные дороги переменного тока оказывают на линии СЦБ электрическое, магнитное и гальваническое влияния. В качестве влияющих линий также можно рассматривать линии электроснабжения напряжением 6, 10, 27,5 кВ, которые могут располагаться как на отдельно стоящих опорах, так и на опорах контактной сети. [1]

Электрическое влияние обусловлено емкостной связью между контактной сетью и смежной линией. Магнитное влияние обусловлено наведением ЭДС в замкнутых контурах при пересечении их переменным магнитным полем, источником которого является контактная сеть при протекании в ней переменного тока.

Известны случаи прожога плат реле, включенных в цепь контроля перегона (К-ОК) на сигнальных точках. При этом происходит короткое замыкание контактов повторителей сигнального реле (Ж2 и Ж4), вследствие чего реле контроля перегона не обесточивается при нахождении поезда на ограждаемом блок-участке, становится возможным изменение направления движения при занятом перегоне, что является угрозой безопасности движения поездов. [2]

Причиной ухудшения электромагнитной обстановки является увеличение зоны растекания обратного тягового тока при применении прогрессивной конструкции балластной призмы и последующим увеличением сопротивления «рельс – земля» до 50 Ом · км. [3]

С целью оценки электромагнитного влияния тяговой сети на линейные цепи автоблокировки в условиях повышенного переходного сопротивления «рельс – земля» на перегоне Чебачий – Зубково был проведен эксперимент с участием специалистов дорожной лаборатории и представителей кафедры «Автоматика и телемеханика» ОмГУПС. В ходе эксперимента была собрана двухпроводная линейная цепь, представленная на рисунке 1.

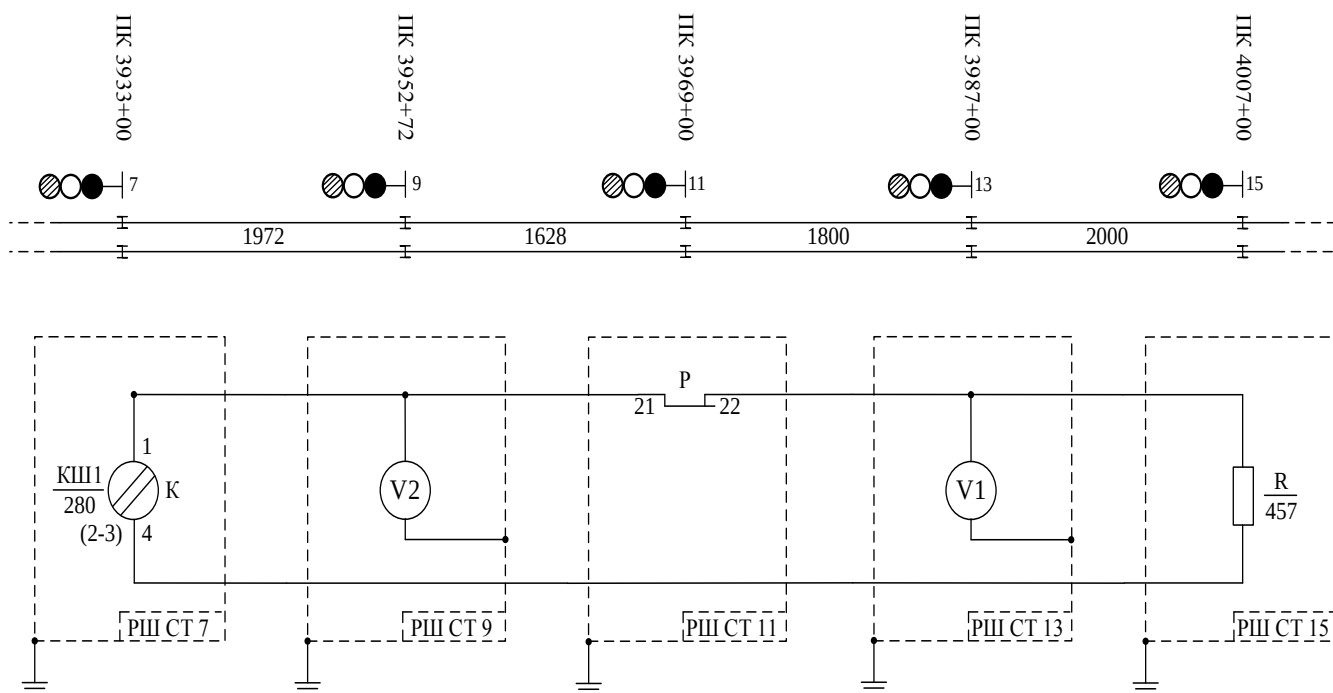


Рисунок 1 – Схема линейной цепи

На сигнальной точке №7 цепь замкнута на реле К (КШ1-280), имитирующее реле контроля перегона на посту ЭЦ. На сигнальной точке №11 в линейную цепь был включен контакт реле Р, работающего в импульсном режиме, имитирующего работу реле Ж2 и Ж4 при занятии и освобождении блок-участка. На сигнальной точке №15 цепь была замкнута на резистор R сопротивлением 457 Ом, имитирующий внутреннее сопротивление источника питания.

При проведении измерений было обнаружено, что значительная часть обратного тягового тока стекает на заземление, установленное на сигнальной точке №9 (I_3). В дальнейшем была выявлена взаимосвязь между величиной стекаемого на заземление тока и величиной наведенного напряжения в линейной цепи (U). Зависимость между этими двумя величинами показана на рисунке 2, коэффициент корреляции – 0,84.

Также в ходе эксперимента была снята осциллограмма напряжения между рельсовой линией и проводом линейной цепи (рисунок 3) и осциллограмма напряжения между проводом линейной цепи и землей (рисунок 4). В обоих случаях форма напряжения указывает на наличие емкостной связи.

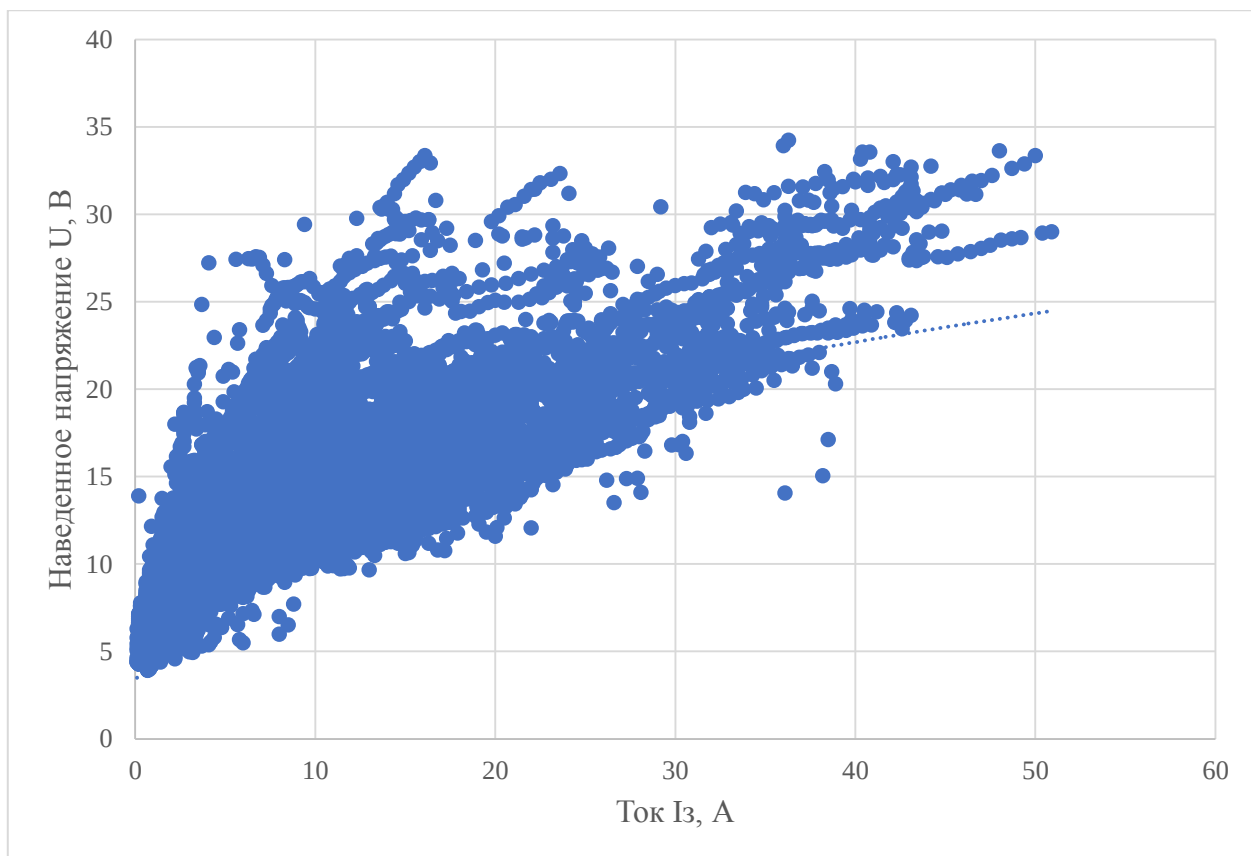


Рисунок 2 – Зависимость величины наведенного напряжения от величины тягового тока

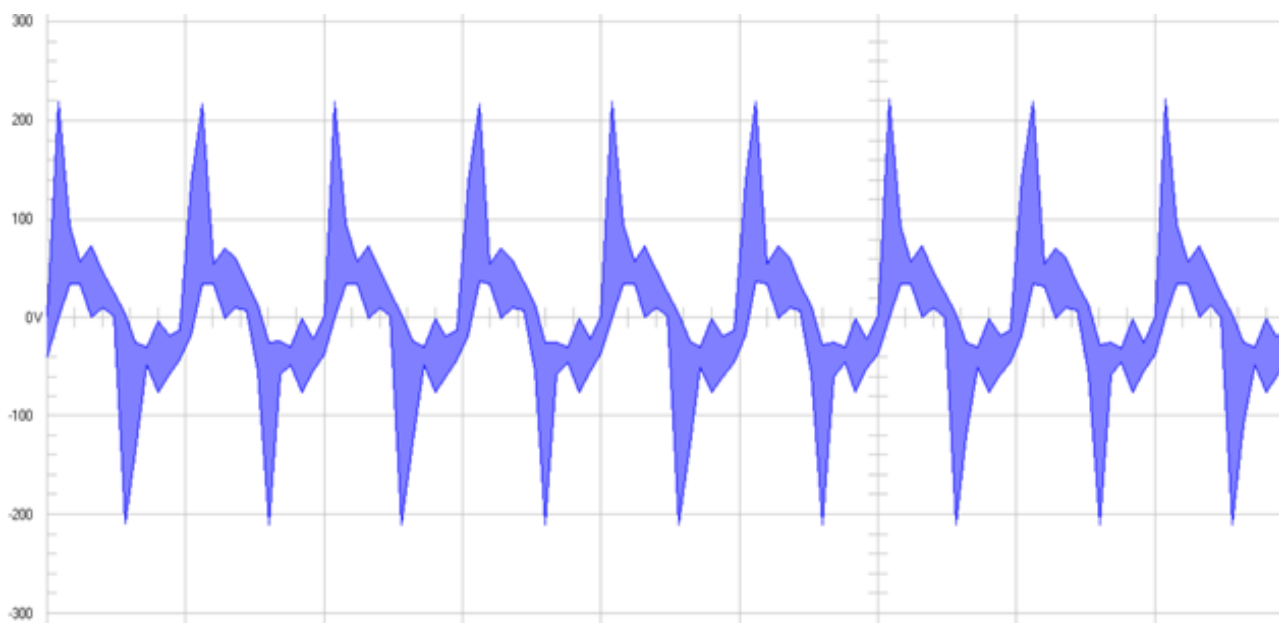


Рисунок 3 – Осциллограмма напряжения между рельсовой линией и проводом линейной цепи

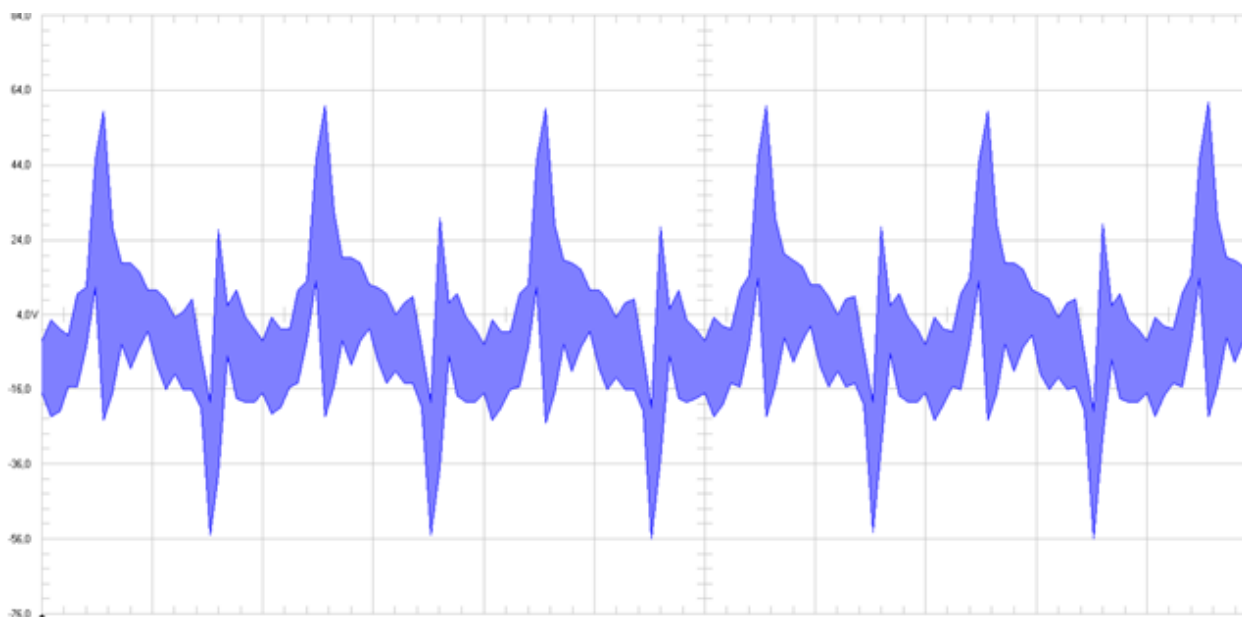


Рисунок 4 – Осциллограмма напряжения между проводом линейной цепи и землей

Таким образом, можно сделать вывод о том, что имеет место электромагнитное влияние рельсовой линии на линейную цепь. С целью снижения магнитного влияния тяговой сети на линейные цепи автоблокировки предлагается осуществить дублирование проводов линейной цепи (рисунок 5).

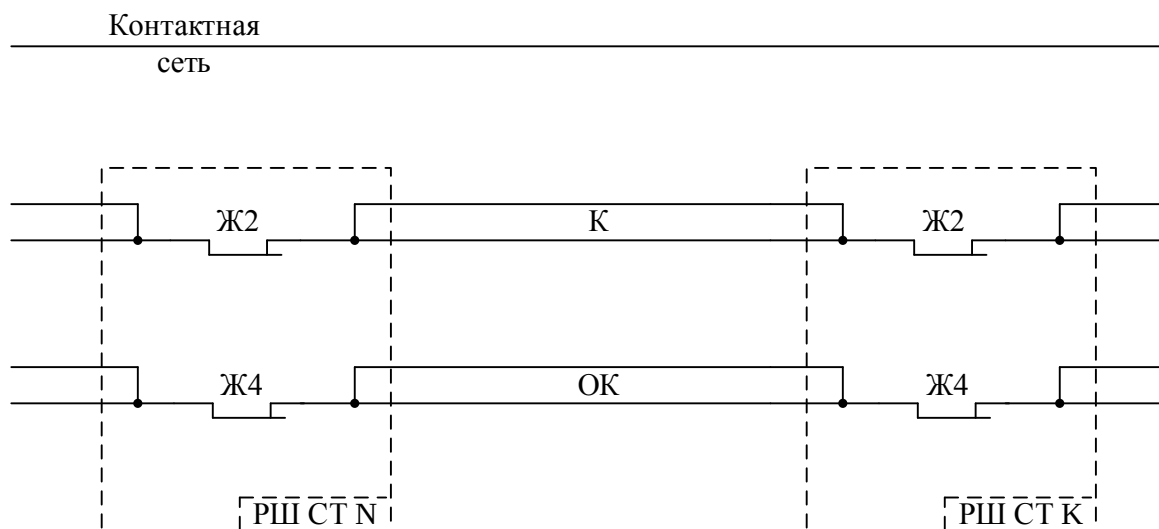


Рисунок 5 – Дублирование проводов в цепи контроля перегона

При включении параллельно двух проводов общая индуктивность снижается в соответствии с формулой:

$$L_0 = \frac{L_1 L_2}{L_1 + L_2} \quad (1)$$

где L_1, L_2 – индуктивность 1 и 2 проводов соответственно.

Уменьшение индуктивности линейной цепи приводит к уменьшению коэффициента взаимной индукции:

$$M = \sqrt{L_{\text{л}} \cdot L_{\text{к/с}}} \quad (2)$$

где $L_{\text{л}}$ – индуктивность линейной цепи;

$L_{\text{к/с}}$ – индуктивность контактной сети.

Вследствие чего происходит уменьшение величины ЭДС, наведенной в проводе линейной цепи:

$$\dot{E} = -\frac{j\omega M \dot{I}_{\text{к}} l}{2} \quad (3)$$

где ω – циклическая частота влияющего тока;

M – коэффициент взаимной индуктивности между контактной сетью и проводом линейной цепи;

$\dot{I}_{\text{к}}$ – ток, протекающий в контактной сети;

l – длина провода линейной цепи.

Также дублирование проводов выполняет функцию резервирования: обрыв одной или нескольких жил кабеля не нарушает работу линейной цепи.

С целью снижения электрического влияния тяговой сети на линейные цепи автоблокировки предлагается осуществить увеличить емкость «провод линейной цепи – земля» путем включения двух последовательно соединенных конденсаторов между проводом линейной цепи и землей (рисунок 6).

Напряжение электрического влияния контактной сети на провод линейной цепи определяется по формуле:

$$U = U_{\text{к}} \cdot \frac{C_1 l}{C_1 l + C_0 l} = U_{\text{к}} \cdot \frac{C_1}{C_1 + C_0} \quad (4)$$

где $U_{\text{к}}$ – напряжение во влияющей линии (контактная сеть);

C_0 – емкость между проводом линейной цепи и землей;

C_1 – емкость между проводом линейной цепи и контактной сетью;

l – длина провода линейной цепи.

В релейный шкаф сигнальной точки заводятся прямой и обратный провода цепи смены направления (Н-ОН), прямой и обратный провода цепи контроля перегона (К-ОК), находящиеся в зоне электрического влияния контактной сети. Для реализации предлагаемого способа между перечисленными проводами и заземленным корпусом релейного шкафа включены по 2 конденсатора (С1 – С8). Использование двух последовательно соединенных конденсаторов позволяет

исключить короткое замыкание провода на землю при пробое одного из них и сохранить работоспособность линейной цепи.

Контактная

сеть

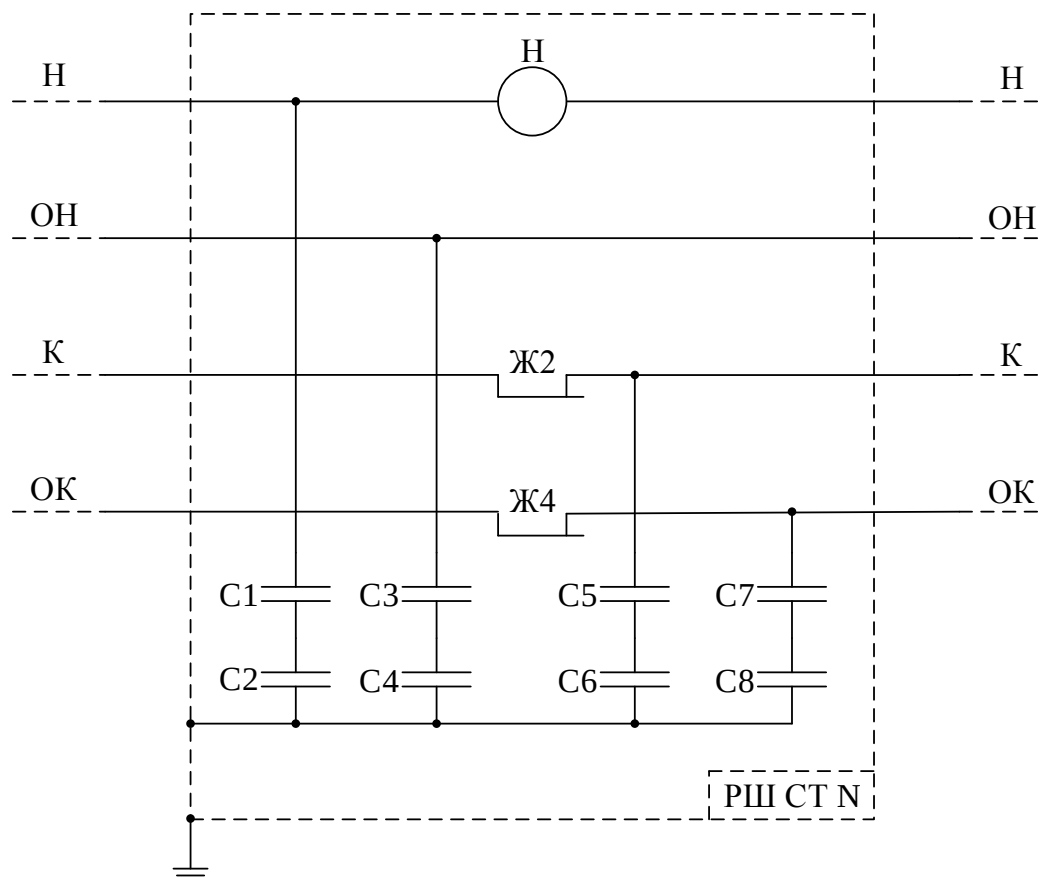


Рисунок 6 – Схема включения конденсаторов в релейном шкафу

Таким образом, реализация предлагаемых мер позволит снизить электромагнитное влияние тяговой сети на линейные цепи автоблокировки и, как следствие, обеспечить надежную и бесперебойную работу систем железнодорожной автоматики на перегонах со сложной электромагнитной обстановкой.

Список литературы

1. Концепция комплексной защиты технических средств и объектов железнодорожной инфраструктуры от воздействия атмосферных и коммутационных перенапряжений и влияний тягового тока : утверждена распоряжением ОАО «РЖД» от 24 декабря 2013 г. №2871р. – Москва : ОАО «РЖД», 2013. – Текст : непосредственный.

2. Ходкевич, А. Г. Анализ повреждений линейных цепей от перенапряжения на перегонах с электротягой переменного тока / А. Г. Ходкевич, М. В. Ключников. – Текст : непосредственный // Эффективность и безопасность электротехнических комплексов и систем автоматики и телемеханики на железнодорожном транспорте : материалы всероссийской научно-технической конференции с международным участием / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2019. – С. 135–140.

3. Исследование влияния капитального ремонта пути на обратную тяговую сеть / С. А. Лунев, В. В. Дремин, А. Г. Ходкевич, С. С. Сероштанов. – Текст : непосредственный // Автоматика, связь, информатика. – 2020. – №2. – С. 9–11.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Ходкевич Антон Геннадьевич

Омский государственный университет
путей сообщения (ОмГУПС).
Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046,
Российская Федерация.
Кт.н., заведующий кафедрой «Автоматика
и телемеханика» ОмГУПС.
Тел.: (3812) 31-56-47.
E-mail: HodkevichAG@mail.ru.

Ключников Максим Владимирович

Омский государственный университет
путей сообщения (ОмГУПС).
Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046,
Российская Федерация.
Аспирант кафедры «Теоретическая
электротехника» ОмГУПС.
E-mail: klyuchnikov.mv@yandex.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Khodkevich Anton Gennadyevich

Omsk State Transport University (OSTU).
35, Marx st., Omsk, 644046,
the Russian Federation.
Ph.D. in Technical Sciences, The head of the
Department of «Railway Signalling and
Interlocking» OSTU.
Phone: (3812) 31-56-47.
E-mail: HodkevichAG@mail.ru.

Klyuchnikov Maxim Vladimirovich

Omsk State Transport University (OSTU).
35, Marx st., Omsk, 644046,
the Russian Federation.
Post-graduate student of the department
«Theoretical Electrical Engineering» OSTU.
E-mail: klyuchnikov.mv@yandex.ru.

О. В. Литвинова

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

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ КАБЕЛЯ В ШЛАНГОВОМ ИЗОЛИРУЮЩЕМ ПОКРЫТИИ С ПОВРЕЖДЕНИЯМИ

В статье проведен анализ электрических параметров кабеля в шланговом изолирующем покрытии с повреждениями в зоне действия электрифицированного на постоянном токе железнодорожного транспорта. Из приведенного анализа сделан вывод, полное переходное сопротивление металлической оболочки или токоведущей жилы в месте повреждения изоляции имеет емкостный характер и изменяется в широких пределах в зависимости от частоты, удельного сопротивления среды и площади повреждения. Полное переходное сопротивление изоляционного полимерного покрытия шлангового типа, определенное с учетом наличия дефектов в изолирующем покрытии, является количественным показателем качества изолирующего покрытия.

Ключевые слова: кабель, активное сопротивление, индуктивность, емкость, электромагнитное поле, удельное сопротивление, проводимость, повреждение изоляции.

Olga V. Litvinova

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

ELECTRIC PARAMETERS OF CABLE IN HOSE INSULATING COVERAGE WITH DAMAGES

In the article the analysis of electric parameters of cable is conducted in hose insulating coverage with damages in the zone of action of the railway transport electrified on a direct current. From the brought analysis over drawn conclusion, the transitional impedor of metallic shell or токоведущей tendon in the site of damage of isolation has capacity character and changes in wide limits depending on frequency, specific resistance of environment and area of damage. A transitional impedor of isolating polymeric coverage of hose type, certain taking into account the presence of defects in insulating coverage, is the quantitative index of quality of insulating coverage.

Keywords: cable, pure resistance, inductance, capacity, electromagnetic field, specific resistance, conductivity, damage of isolation.

Одной из главных причин повреждения кабелей электроснабжения нетяговых железнодорожных потребителей в условиях эксплуатации является повреждение изолирующего покрытия и коррозия металлических защитных элементов, что приводит к понижению сопротивления изоляции токоведущих жил кабеля, вследствие чего нарушается нормальное функционирование кабельной линии. Для сохранения работоспособности кабеля большое значение имеет состояние его изолированной оболочки, исключающей проникновение влаги к токоведущим элементам кабеля. В качестве материалов для оболочки в настоящее время используют свинец, алюминий и полимерный материал. Из этих материалов наименьшую влагопроницаемость обеспечивает свинец. Однако он обладает серьезными недостатками: это дорогой и дефицитный материал, имеет большой вес и подвержен коррозии, особенно в зоне блуждающих токов. Пластмассовая оболочка дешевле, но имеет более высокую влагопроницаемость по сравнению со свинцом, вследствие чего ее электрические параметры ухудшаются. Наиболее приемлемой по перечисленным показателям является алюминиевая оболочка. Но поскольку этот материал больше других подвержен коррозионному разрушению, алюминиевые оболочки обязательно защищаются полимерными шлангами с величиной сопротивления изоляции от земли не менее $5 \cdot 10^6 \text{ Ом} \cdot \text{км}$ [1].

Работоспособность кабеля зависит от свойств изолирующих покрытий токоведущих жил и металлических защитных элементов кабеля. В настоящее время очевидны преимущества использования кабелей в полимерном изолирующем покрытии: высокое переходное сопротивление металлических элементов кабеля относительно земли, обеспечение надежной защиты от всех видов коррозии и невысокая стоимость. При этом полимерный изолирующий покров за счет низкой механической прочности в процессе транспортировки, укладки и эксплуатации кабеля может быть поврежден.

В случае повреждения изолирующего покрытия токоведущей жилы или оболочки кабель быстро выходит из строя по причине коррозии. Если трасса кабеля проходит в зоне распространения блуждающих токов электрифицированного железнодорожного транспорта, процесс коррозии ускоряется. В этом случае в месте повреждения изоляции кабеля между металлической оболочкой (или жилой) и землей может возникать значительная разность потенциалов. В случае повреждения изолирующего покрытия между жилами или жилой и оболочкой кабеля наступает аварийный режим работы.

Поэтому одной из важнейших задач, возникающих в процессе эксплуатации кабеля, является оперативное и точное определение места повреждения кабеля и его устранение.

Распределение электрических величин в линейном источнике, расположенном в однородной среде определяется геометрическими размерами источника, материалом из которого он изготовлен, наличием изолирующего покрытия, его конструкцией и свойствами, а также параметрами земли (среды в которой располагается проводник). Под линейным источником будем понимать протяженное металлическое сооружение, которое может быть как с изолирующим покрытием, так и без него, по нему протекает электрический ток как за счет внешнего источника, подключенного к нему, так и за счет электромагнитных связей с другими сооружениями. Термин «источник» понимается в смысле источника электромагнитного поля, которое возникает в пространстве, окружающем проводник, и в самом проводнике за счет протекающего по нему тока. Примером вышеназванного источника могут быть кабели электроснабжения или связи или их металлические покровы, которые представляют собой однопроводные цепи (линии) с распределенными по длине параметрами с возвратом тока через землю, рельсовые цепи, трубопроводы различного назначения, элементы заземляющих систем и т. д. В общем случае распределение тока и потенциала в них описывается системой дифференциальных уравнений, для решения которых должны быть известны их первичные и волновые параметры.

Сначала определяем параметры электромагнитного поля для однородной среды (земли). В общем случае параметры земли – ее удельное сопротивление ρ_z или обратная величина, проводимость земли σ_z являются величинами переменными. Удельная проводимость зависит от многих трудно учитываемых факторов, таких как температура земли, ее влажность, минералогический состав, количество слоев и их мощность [2]. В настоящее время многие специалисты стремятся получить решение задачи по определению параметров электромагнитного поля для общего случая, т.е. для N-слойной земли. Однако это приводит к громоздким, не решаемым аналитически выражениям, которые трудно применять для решения практических задач. Поэтому, как правило, многослойную структуру приводят к эквивалентной двухслойной. Для промышленных площадок, территорий тяговых подстанций или домов связи, а также вблизи рельсовой цепи такое эквивалентирование не совсем оправданно

по причине изменения структуры и состава земли в период выполнения строительно-монтажных работ. Например, при строительстве заземляющего устройства тяговой подстанции верхний слой земли привозной, поэтому ее проводимость будет отличаться от проводимости коренных пород. Кроме того, специфика задач такова, что решения необходимо искать в ближней к источнику зоне, в которой электромагнитное поле формируется источником и является первичным. Именно параметры первичного поля функционально связаны с электрическими величинами источника, которые в свою очередь определяются параметрами этого источника и имеющимися неоднородностями, в качестве которых могут быть места повреждения изоляции кабеля, изменения геометрических размеров элементов заземляющего устройства по причине коррозионного разрушения, отсутствие электрического контакта между отдельными элементами заземляющего устройства или же, наоборот, наличие этого контакта и т. д.

Неоднородности земли формируют вторичные поля, которые являются определяющими при расчете поля в дальней зоне или зоне индукции [3]. Параметры вторичного поля находятся в сложной зависимости от параметров источника и в большей степени определяются параметрами и структурой вмещающей среды, т. е. земли. Таким образом, вторичные поля для решаемых задач следует рассматривать в качестве помехи, и их влияние необходимо исключать всеми способами. Параметры вторичного электромагнитного поля информативны относительно структур, их породивших, успешно применяются в геофизике при разведке полезных ископаемых и определении их характеристик. Определенный интерес представляют однородные линии, параметры которых остаются неизменными по всей длине линии. Вблизи концов линии отраженные волны взаимодействуют с падающими, изменяя общее распределение электрических величин, через которые определяются параметры. Подобные явления происходят вблизи любых неоднородностей, которых на любой линии имеется достаточное количество, и если параметры определять с учетом неоднородностей линии, то они не будут постоянны по длине и будут находиться в противоречии с определением «параметры». Поэтому нет никаких оснований считать первичные параметры переменными величинами вблизи концов линии. Влияние концов линии учитывается не через параметры, зависящие от координат, а из решения уравнений, описывающих распределение электрических величин по длине линии. Поэтому решение задач

по определению параметров электромагнитного поля и параметров линейных источников будет проводиться для однородного строения земли и бесконечно длинной линии.

В силу ряда причин в шланговом изолирующем покрытии кабеля появляются нарушения его целостности. Эти нарушения представляют собой механические повреждения изолирующего шлангового покрытия в виде проколов, порезов и т.д. В качестве металлического проводника с поврежденным изолирующим покрытием может выступать металлическая оболочка, имеющая шланговый изолирующий покров, или токоведущая жила кабеля без металлических покровов. Оголенная часть металлического проводника имеет размеры от единиц до сотен квадратных миллиметров. Если изолированный проводник рассматривать как однопроводную линию, то места нарушения целостности изолирующего шлангового покрытия можно рассматривать как дискретные нагрузки, подключенные к этой линии, их величина может меняться в очень широких пределах. Координата подключения этих нагрузок по длине кабеля в пределах кабельной линии имеет случайный характер. Таким образом, распределение тока и потенциала по длине кабеля будет зависеть от частоты, количества повреждений изолирующего шлангового покрытия на рассматриваемом участке, площади повреждения этого покрытия и координаты поврежденного участка.

Для разработки и совершенствования методов поиска мест повреждения необходимо иметь данные о распределении токов и напряжений по длине кабеля электроснабжения и методику их расчета. Для этого следует иметь электрические параметры кабеля, зависящие от геометрических размеров и материалов элементов кабеля, наличия изолирующего покрытия, а также наличия соседних металлических элементов (близко расположенных проводников, металлической оболочки, брони), влияющих на распределение электрического сигнала по токопроводящим жилам и металлической оболочке кабеля.

К первичным электрическим параметрам относятся активное сопротивление R (Ом/км), индуктивность L (Гн/км), являющиеся продольными параметрами, емкость C (Ф/км) и проводимость G (См/км) изоляции, относящиеся к поперечным параметрам. К волновым параметрам относятся коэффициент распространения γ (1/м) и волновое сопротивление $Z_{\text{в}}$ (Ом).

Получены формулы для расчета первичных и волновых параметров токопроводящих жил с учетом двух близко расположенных проводников и

металлической оболочки, а также металлического защитного покрова с учетом спиральности. Изолированные токопроводящие жилы представляют собой изолированный цилиндрический проводник, а изолированная оболочка кабеля – трубчатый изолированный проводник [4].

Результаты сравнительных испытаний различных полимерных изолирующих покрытий показали, что их защитные свойства зависят от конструкции изолирующего покрова, свойств используемых материалов и технологии нанесения на защищаемую поверхность.

Изолирующие покровы шлангового типа обеспечивают лучшую защиту алюминиевой оболочки от коррозии по сравнению с ленточными [5]. Кроме того, наличие подклеивающего слоя и битумного компаунда между алюминиевой оболочкой и полимерным шланговым покрытием значительно повышает защитные свойства покрытия. Переходное сопротивление шлангового изолирующего покрытия относительно земли уменьшается в первые месяцы эксплуатации на 1 – 2 порядка и составляет несколько мегаом на километр.

Из расчетов [6], можно сказать, что полное переходное сопротивление границы раздела «металл – электролит», определенное методом разложения импульсных сигналов в ряд Фурье, зависит от площади электрода, частоты и удельного сопротивления среды, в которой находится электрод. Также полное переходное сопротивление металлической оболочки или токоведущей жилы в месте повреждения изоляции имеет емкостный характер и изменяется в широких пределах в зависимости от частоты, удельного сопротивления среды и площади повреждения. Полное переходное сопротивление изоляционного полимерного покрытия шлангового типа, определенное с учетом наличия дефектов в изолирующем покрытии, является количественным показателем качества изолирующего покрытия.

Список литературы

1. Котельников, А. В. Электрификация железных дорог, мировые тенденции и перспективы / А. В. Котельников. – Москва : Интекст, 2002. – 103 с. – Текст : непосредственный.
2. Электроразведка : справочник геофизика / под ред. А. Г. Тархова. – Москва : Недра, 1980. – 518 с. – Текст : непосредственный.

3. Михайлов, М. И. Защита кабельных линий связи от влияния внешних электромагнитных полей / М. И. Михайлов, Л. Д. Разумов. – Москва : Связь, 1967. – 344 с. – Текст : непосредственный.

4. Кандаев, В. А. Совершенствование эксплуатационного контроля коррозионного состояния подземных сооружений систем электроснабжения железнодорожного транспорта / В. А. Кандаев. – Омск: Омский гос. ун-т путей сообщения, 2003. – 225 с. – Текст : непосредственный.

5. Никольский, К. К. Коррозия и защита от неё подземных металлических сооружений связи / К. К. Никольский. – Москва : Связь, 1984. – 207 с. – Текст : непосредственный.

6. Кандаев, В. А. Исследование затухания гармонического сигнала в оболочке кабеля с поврежденным изолирующим покрытием / В. А. Кандаев, А. В. Котельников, Л. Г. Поздняков // Вестник ВНИИЖТа. – 1985. – № 3. – С. 38–41.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Литвинова Ольга Владимировна
Омский государственный университет
путей сообщения (ОмГУПС).
Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046,
Российская Федерация.
Инженер кафедры «Телекоммуникационные,
радиотехнические системы и сети»
ОмГУПС.
Тел.: +7 (3812) 31-06-94.
E-mail: Litvinova69.08@mail.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Litvinova Olga Vladimirovna
Omsk State Transport University (OSTU).
35, Marx st., Omsk, 644046,
the Russian Federation.
Engineer of the department of
"Telecommunications, radiotechnical systems and
networks » OSTU.
Phone: +7 (3812) 31-06-94.
E-mail: Litvinova69.08@mail.ru.

УДК 621.01

А. А. Васькин, С. П. Лысый

Самарский государственный университет путей сообщения – филиал в г. Пенза
(СамГУПС – филиал в г. Пенза), г. Пенза, Российская Федерация

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ

В статье приведены электрические методы неразрушающего контроля. Представлена портативная система регистрации частичных разрядов. Приведена

универсальная система диагностики состояния кабельных линий. Проанализированы особенности данных систем.

Ключевые слова: диагностические системы, электрические методы, изоляция, частичный разряд.

Alexej A. Vaskin, Sergey P. Lysyi

Branch of Samara State Transport University in the city of Penza (SSUT –branch in the city Penza),
Penza, the Russian Federation

ELECTRICAL METHODS OF NON-DESTRUCTIVE TESTING

The article presents electrical methods of non-destructive testing. A portable system for registering partial discharges is presented. A universal system for diagnosing the state of cable lines is presented. The features of these systems are analyzed.

Keywords: diagnostic systems, electrical methods, isolation, partial discharge.

В настоящее время в России всё чаще возникает интерес к диагностическим системам. Они позволяют проводить диагностику электрооборудования неразрушающими методами контроля. В кабельных сетях в большинстве случаев переходят на неразрушающие методы диагностики состояния кабеля с прогнозированием его изоляции.

К электрическому методу неразрушающего контроля для диагностирования электрооборудования можно отнести измерение частичных разрядов (ЧР). Внешними проявлениями процессов развития ЧР являются свечение, выделение газов, нагрев изоляции, электрические и акустические явления. Существует множество методов определения ЧР. Для обнаружения частичных разрядов в основном используются электрический, электромагнитный и акустический методы. Согласно ГОСТ 20074–83, ЧР представляет собой локальный электрический разряд, который шунтирует только часть изоляции в электроизоляционной системе [1].

Одним из основных требований, предъявляемых к электротехническому оборудованию, является исключение возможности контакта человека с токоведущими частями или их тщательное изолирование. В связи с этим надёжность изоляции является одним из обязательных требований при эксплуатации электрооборудования. В процессе эксплуатации изоляция

высоковольтных конструкций подвергается длительному воздействию рабочего напряжения, многократным внутренним и атмосферным перенапряжениям [2].

Кроме этого изоляция подвергается температурным и механическим воздействиям, вибрациям, увлажнению, приводящим к ухудшению её электрических и механических свойств. Надёжная работа изоляции высоковольтных конструкций может быть обеспечена при соблюдении определенных условий. Изоляция должна выдерживать возможные перенапряжения, рабочее напряжение с учётом его изменений в допустимых пределах [3].

Сущность метода частичных разрядов состоит в определении значения ЧР. При этом величина частичного разряда не должна превышать установленное значение при напряжении и чувствительности.

Электрический метод требует контакта измерительных приборов с объектом контроля. Возможность получения комплекса характеристик, позволяющих всесторонне оценить свойства ЧР с определением их количественных значений, делает метод весьма доступным. К основному недостатку данного метода можно отнести его сильную чувствительность к помехам разного рода [1, 2].

Электромагнитный метод позволяет обнаружить объект с ЧР с помощью направленного приемного СВЧ антенно-фидерного устройства. Этот метод не требует контактов измерительных приборов с контролируемым оборудованием и позволяет производить обзорное сканирование. Недостаток этого метода заключается в отсутствии количественной оценки какой-либо характеристики ЧР.

Применение диагностики методом измерения частичных разрядов возможно для кабелей и кабельной продукции, комплектных распределительных устройств элегазовых (КРУЭ), измерительных трансформаторов тока и напряжения, двигателей и генераторов, разрядников и конденсаторов. Основная опасность частичных разрядов связана с невозможностью их выявления методом обычных испытаний повышенным выпрямленным напряжением, риском быстрого перехода до состояния пробоя. При этом может произойти аварийная ситуация на кабеле.

Среди основного оборудования для определения дефектов с помощью частичных разрядов можно выделить следующие типы.

Известна портативная система регистрации ЧР (рисунке 1), которая состоит из генератора СНЧ-напряжения, блока связи и регистрации частичных разрядов.

Особенностями данной системы являются упрощенная схема работы, высокая точность измерений, простота эксплуатации, малые габариты и вес. Все это позволяет проводить диагностику состояния кабельных линий 35 кВ длиной до 13 км, а также кабелей 110 кВ.



Рисунок 1 – Портативная система регистрации ЧР

Известна универсальная система диагностики состояния кабельных линий (рисунок 2), включающая генератор высокого напряжения PHG. Система обеспечивает измерение тангенса угла потерь TD, частичных разрядов с локализацией источника PD.



Рисунок 2 – Универсальная система регистрации частичных разрядов

Особенностями данной системы являются упрощенная схема работы, универсальность, простота эксплуатации, возможность проведения полной диагностики состояния кабельной линии и трассировки кабеля, оценка динамики старения изоляции на основе архивов данных по результатам испытаний. При этом имеется возможность постепенного формирования системы от генератора высокого напряжения до диагностики кабельных линий.

При помощи данных систем решаются задачи по проведению профилактических мероприятий, проверке рабочих характеристик испытываемых объектов, планированию обслуживания, замене муфт, секций кабеля, сокращению количества вынужденных простоев, увеличению сроков службы кабельных линий за счет использования щадящего уровня испытательного напряжения.

Список литературы

1. Лысый, С. П. Исследование сдвига фаз в цепи переменного тока / С. П. Лысый, И. Е. Карасев. – Текст : непосредственный // Инновационные идеи молодых исследователей для агропромышленного комплекса России : сб. материалов всеросс. науч.-практ. конф. студентов. – Пенза : РИО ПГСХА, 2010. – С. 175–176.
2. Лысый, С. П. Исследование внешних характеристик однофазного управляемого выпрямителя / С. П. Лысый, И. Е. Карасев. – Текст : непосредственный // Инновационные идеи молодых исследователей для АПК России : сб. материалов всеросс. науч.-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых, проводимой по программе всероссийского фестиваля науки и посвященной 60-летию ФГОУ ВПО «Пензенская ГСХА». – Пенза : РИО ПГСХА, 2011. – С. 233–235.
3. Поликанова, И. А. Применение современной материально-технической базы на практических занятиях по дисциплине «Метрология, стандартизация и сертификация» / И. А. Поликанова, С. П. Лысый, М. А. Вишникина. – Текст : непосредственный // Транспортное образование : сб. материалов всеросс. науч.-метод. конф. / Самарский гос. ун-т путей сообщения. – Самара, 2018. – С. 42–45.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Васькин Алексей Александрович

Самарский государственный университет
путей сообщения – филиал в г. Пенза.
ул. Володарского/ ул. Октябрьская, д. 98/5,
г. Пенза, 440604, Российская Федерация.
Тел.: 89063966547.
E-mail: lysy.sergey2018@yandex.ru.

Лысый Сергей Петрович

Самарский государственный университет
путей сообщения – филиал в г. Пенза.
ул. Володарского/ ул. Октябрьская, д. 98/5,
г. Пенза, 440604, Российская Федерация.
Канд.техн.наук., преподаватель СамГУПС
в г. Пенза.
Тел.: 89063966547.
E-mail: lysy.sergey2018@yandex.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Vaskin Alexej Alexandrovich

Branch of Samara State Transport University
in the city of Penza.
Volodarskogo st. / Oktyabrskaya st., 98/5,
Penza, 440604, the Russian Federation.
Phone: 89063966547.
E-mail: lysy.sergey2018@yandex.ru.

Lisij Sergey Petrovich

Branch of Samara State Transport University
in the city of Penza.
Volodarskogo st. / Oktyabrskaya st., 98/5,
Penza, 440604, the Russian Federation.
Candidat of technical science, Teacher of
SSUT –branch in the city Penza.
Phone: 89063966547.
E-mail: lysy.sergey2018@yandex.ru.

УДК 621.3.014

Р. А. Ахмеджанов¹, В. В. Макарович², Н. В. Макарович¹

¹Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС), г. Омск, Российская Федерация;

²Омский государственный технический университет (ОмГТУ), г. Омск, Российская Федерация

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ТРЕХФАЗНОГО ВИХРЕТОКОВОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

Рассмотрен трехэлементный трехфазный вихретоковый преобразователь и предложена его математическая модель с использованием трехфазной системы напряжений и выделением из нее вносимого напряжения обратной последовательности как фактора нарушения сплошности объекта контроля.

Ключевые слова: трехэлементный трехфазный вихретоковый преобразователь, математическая модель, трехфазная система напряжений, вносимое напряжение обратной последовательности, нарушение сплошности.

MATHEMATICAL MODEL OF A THREE-PHASE VORTEX CONVERTER

A three-element three-phase vortex converter is considered and it's mathematical model is proposed using a three-phase voltage system and separating the injected negative sequence voltage from it as a factor of discontinuity of the control object.

Keywords: three-element three-phase vortex converter, mathematical model, three-phase voltage system, negative sequence insertion voltage, discontinuity.

Вихретоковый контроль – это неразрушающий метод, при котором используются электромагнитные эффекты индуцированного тока контролируемого изделия [1].

Формирование индуцированного тока в объекте контроля (ОК) осуществляется с помощью катушки индуктивности, установленной торцом на поверхность детали. Этот процесс можно показать на примере взаимодействия одного витка 1 с ОК (рисунок 1). При этом линии H_0 магнитного поля возбуждения I_0 , охватывая виток, замыкаются через металл контролируемого изделия, проникая в него на определенную глубину. Если представить, что объектом контроля является металлическое кольцо 2 (рисунок 1, а), то в нем в соответствии с законом электромагнитной индукции будет наведена электродвижущая сила (ЭДС) и возникнет индукционный ток I_k , называемый вихревым. То же наблюдается, если поместить в поле катушки бездефектную электропроводящую деталь: непосредственно под ней в детали во множестве воображаемых замкнутых контуров, соосных с этой обмоткой, возбудятся ЭДС и пойдут вихревые токи $i_{вт}$ (рисунок 1, б), замыкающиеся по окружностям вокруг линий магнитного поля, «упирающихся» в металл, т. е. сцепляющиеся с индуцирующим их магнитным потоком H_0 . Вихревые токи зависят от силы тока I_0 в обмотке, его частоты и конфигурации объекта контроля [2].

Многовитковая катушка индуктивности называется параметрическим вихретоковым преобразователем, информативным параметром которого является изменение модуля и фазы комплексного сопротивления катушки.

В случае трансформаторного ВТП выходной сигнал представляет собой комплексную величину, состоящую из приращений активной и реактивной составляющих вносимого напряжения $U_{BH1} = U_{aBH1} + jU_{pBH1}$.

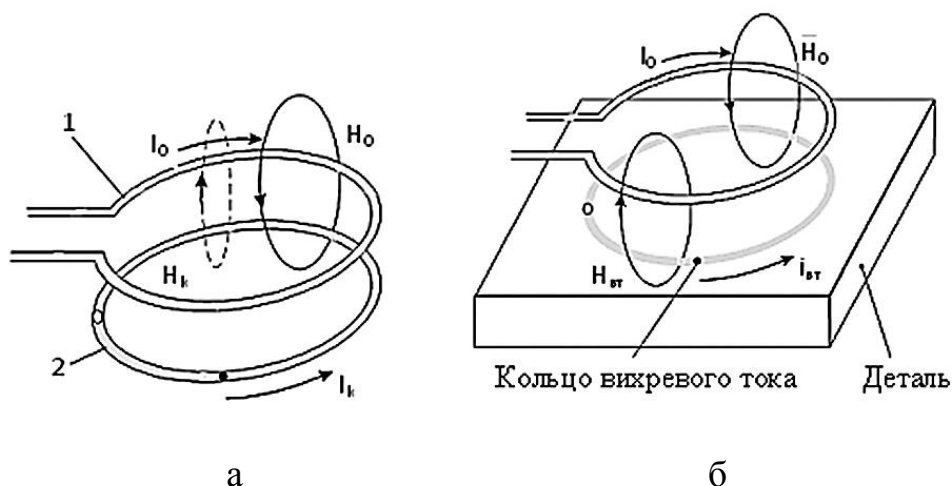


Рисунок 1 – Формирование контура вихревых токов в металлическом кольце (а) и в сплошной электропроводящей детали (б)

Комплексное вносимое напряжение двухобмоточного трансформаторного ВТП определяется выражением [3]:

$$\dot{U}_{ВН1} = j\mu_0 w_B w_I \omega I R \pi \int_0^\infty \varphi_{OK} \exp(-xh^*) J_1 \left(x \sqrt{\frac{R_B}{R_I}} \right) J_1 \left(x \sqrt{\frac{R_I}{R_B}} \right) dx, \quad (1)$$

где $j = \sqrt{-1}$ – мнимая единица;

$\mu_0 = 4\pi 10^{-7}$ – магнитная постоянная, Гн/м;

w_B, w_I – количество витков возбуждающей и измерительной обмоток соответственно;

$\omega = 2\pi f$ – круговая частота тока возбуждения, рад/с;

f – частота тока возбуждения, Гц;

I – ток возбуждающей обмотки, А;

$R = \sqrt{R_B R_I}$ – эквивалентный радиус двух обмоток ВТП;

$h^* = (h_B + h_I)/R$ – обобщенный параметр, характеризующий расстояние между центрами обмоток ВТП и поверхностью объекта контроля;

h_B, h_I – расстояния от центра соответствующей обмотки ВТП до внешней поверхности объекта контроля;

$J_1 \left(x \sqrt{\frac{R_B}{R_I}} \right), J_1 \left(x \sqrt{\frac{R_I}{R_B}} \right)$ – функции Бесселя первого рода первого порядка;

φ_{OK} – функция влияния объекта контроля, зависящая от граничных условий, характеризующая влияние ОК и определяемая его электромагнитными параметрами.

Для обеспечения одномоментного контроля поверхности объекта предлагается рассмотреть трехэлементный трехфазный вихретоковый преобразователь (ТТВТП), который представляет собой три одноэлементных трансформаторных преобразователя, обмотки возбуждения которых подключены к источнику трехфазного переменного высокочастотного напряжения $\dot{U}_A, \dot{U}_B, \dot{U}_C$. Тогда, обозначив одноэлементные преобразователи как ВТП_А, ВТП_В, ВТП_С в соответствии с фазными напряжениями, которые подаются на соответствующие возбуждающие обмотки w_{BA}, w_{BB}, w_{BC} , получим на измерительных обмотках w_{IA}, w_{IB}, w_{IC} вносимые этими ВТП напряжения $\dot{U}_{ВНА}, \dot{U}_{ВНВ}, \dot{U}_{ВНС}$:

$$\begin{cases} \dot{U}_{ВНА} = j\mu_0 w_{BA} w_{IA} \omega I_A R_A \pi \int_0^\infty \varphi_{OK} \exp(-x h_A^*) J_1 \left(x \sqrt{\frac{R_{BA}}{R_{IA}}} \right) J_1 \left(x \sqrt{\frac{R_{IA}}{R_{BA}}} \right) dx; \\ \dot{U}_{ВНВ} = j\mu_0 w_{BB} w_{IB} \omega I_B R_B \pi \int_0^\infty \varphi_{OK} \exp(-x h_B^*) J_1 \left(x \sqrt{\frac{R_{BB}}{R_{IB}}} \right) J_1 \left(x \sqrt{\frac{R_{IB}}{R_{BB}}} \right) dx; \\ \dot{U}_{ВНС} = j\mu_0 w_{BC} w_{IC} \omega I_C R_C \pi \int_0^\infty \varphi_{OK} \exp(-x h_C^*) J_1 \left(x \sqrt{\frac{R_{BC}}{R_{IC}}} \right) J_1 \left(x \sqrt{\frac{R_{IC}}{R_{BC}}} \right) dx. \end{cases} \quad (2)$$

Полученную трехфазную систему напряжений $\dot{U}_{ВНА}, \dot{U}_{ВНВ}, \dot{U}_{ВНС}$ Вагнера-Эванса можно представить в виде суммы трех симметричных систем составляющих прямой $\dot{U}_{ВНА1}, \dot{U}_{ВНВ1}, \dot{U}_{ВНС1}$, обратной $\dot{U}_{ВНА2}, \dot{U}_{ВНВ2}, \dot{U}_{ВНС2}$ и нулевой $\dot{U}_{ВНА0}, \dot{U}_{ВНВ0}, \dot{U}_{ВНС0}$ последовательностей, различающимися порядком чередования фаз [4]:

$$\begin{cases} \dot{U}_{ВНА} = \dot{U}_{ВНА1} + \dot{U}_{ВНА2} + \dot{U}_{ВНА0}; \\ \dot{U}_{ВНВ} = \dot{U}_{ВНВ1} + \dot{U}_{ВНВ2} + \dot{U}_{ВНВ0}; \\ \dot{U}_{ВНС} = \dot{U}_{ВНС1} + \dot{U}_{ВНС2} + \dot{U}_{ВНС0}. \end{cases} \quad (3)$$

Симметричную систему напряжений нулевой последовательности образуют три одинаковых по модулю и фазе вектора $\dot{U}_{ВНА0} = \dot{U}_{ВНВ0} = \dot{U}_{ВНС0}$.

Следовательно, с учетом системы уравнений (3) для напряжения симметричной составляющей нулевой последовательности $\dot{U}_{ВНА0}$ можно записать:

$$\begin{aligned} \dot{U}_{ВНА0} &= \frac{1}{3} (\dot{U}_{ВНА0} + \dot{U}_{ВНВ0} + \dot{U}_{ВНС0}) = \\ &= j\mu_0 w_{BA} w_{IA} \omega I_A R_A \pi \int_0^\infty \varphi_{OK} \exp(-x h_A^*) J_1 \left(x \sqrt{\frac{R_{BA}}{R_{IA}}} \right) J_1 \left(x \sqrt{\frac{R_{IA}}{R_{BA}}} \right) dx. \end{aligned} \quad (4)$$

Симметричную систему напряжений прямой последовательности образуют три одинаковых по модулю вектора $\dot{U}_{ВНА1}$, $\dot{U}_{ВНВ1}$, $\dot{U}_{ВНС1}$ со сдвигом друг по отношению к другу на $2\pi/3$ радиан, причем $\dot{U}_{ВНВ1} = \underline{a}^2 \dot{U}_{ВНА1}$ отстает от $\dot{U}_{ВНА1}$, а $\dot{U}_{ВНС1} = \underline{a} \dot{U}_{ВНА1}$ – от $\dot{U}_{ВНВ1}$, где оператор поворота $\underline{a} = e^{j\frac{2\pi}{3}}$.

Выражение для симметричной составляющей прямой последовательности $\dot{U}_{ВНА1}$ можно записать:

$$\begin{aligned} \dot{U}_{ВНА1} = & \frac{1}{3} (\dot{U}_{ВНА} + \underline{a} \dot{U}_{ВНВ} + \underline{a}^2 \dot{U}_{ВНС}) = \\ & \frac{1}{3} \left(j\mu_0 w_{ВА} w_{ИА} \omega I_A R_A \pi \int_0^\infty \varphi_{OK} \exp(-x h_A^*) J_1 \left(x \sqrt{\frac{R_{ВА}}{R_{ИА}}} \right) J_1 \left(x \sqrt{\frac{R_{ИА}}{R_{ВА}}} \right) dx + \right. \\ & \underline{a} j\mu_0 w_{ВВ} w_{ИВ} \omega I_B R_B \pi \int_0^\infty \varphi_{OK} \exp(-x h_B^*) J_1 \left(x \sqrt{\frac{R_{ВВ}}{R_{ИВ}}} \right) J_1 \left(x \sqrt{\frac{R_{ИВ}}{R_{ВВ}}} \right) dx + \\ & \left. \underline{a}^2 j\mu_0 w_{ВС} w_{ИС} \omega I_C R_C \pi \int_0^\infty \varphi_{OK} \exp(-x h_C^*) J_1 \left(x \sqrt{\frac{R_{ВС}}{R_{ИС}}} \right) J_1 \left(x \sqrt{\frac{R_{ИС}}{R_{ВС}}} \right) dx \right). \end{aligned} \quad (5)$$

Симметричную систему напряжений обратной последовательности образуют три одинаковых по модулю вектора $\dot{U}_{ВНА2}$, $\dot{U}_{ВНВ2}$, $\dot{U}_{ВНС2}$ со сдвигом друг по отношению к другу на $2\pi/3$ радиан, причем $\dot{U}_{ВНС2} = \underline{a}^2 \dot{U}_{ВНА2}$, отстает от $\dot{U}_{ВНА2}$, а $\dot{U}_{ВНВ2} = \underline{a} \dot{U}_{ВНА2}$ – от $\dot{U}_{ВНС2}$. Напряжение симметричной составляющей обратной последовательности $\dot{U}_{ВНА2}$ будет определяться следующим выражением:

$$\begin{aligned} \dot{U}_{ВНА2} = & \frac{1}{3} (\dot{U}_{ВНА} + \underline{a}^2 \dot{U}_{ВНВ} + \underline{a} \dot{U}_{ВНС}) = \\ & \frac{1}{3} \left(j\mu_0 w_{ВА} w_{ИА} \omega I_A R_A \pi \int_0^\infty \varphi_{OK} \exp(-x h_A^*) J_1 \left(x \sqrt{\frac{R_{ВА}}{R_{ИА}}} \right) J_1 \left(x \sqrt{\frac{R_{ИА}}{R_{ВА}}} \right) dx + \right. \\ & \underline{a}^2 j\mu_0 w_{ВВ} w_{ИВ} \omega I_B R_B \pi \int_0^\infty \varphi_{OK} \exp(-x h_B^*) J_1 \left(x \sqrt{\frac{R_{ВВ}}{R_{ИВ}}} \right) J_1 \left(x \sqrt{\frac{R_{ИВ}}{R_{ВВ}}} \right) dx + \\ & \left. \underline{a} j\mu_0 w_{ВС} w_{ИС} \omega I_C R_C \pi \int_0^\infty \varphi_{OK} \exp(-x h_C^*) J_1 \left(x \sqrt{\frac{R_{ВС}}{R_{ИС}}} \right) J_1 \left(x \sqrt{\frac{R_{ИС}}{R_{ВС}}} \right) dx \right). \end{aligned} \quad (6)$$

Симметричные составляющие измеряемого напряжения могут быть не только рассчитаны, но измерены с помощью специальных фильтров симметричных составляющих. Интерес представляет вносимое напряжение обратной последовательности $\dot{U}_{ВНА2}$, полученное с использованием фильтра симметричных составляющих обратной последовательности. На выходе этого фильтра напряжение симметричных составляющих прямой и нулевой последовательностей равны нулю.

При идентичности возбуждающих $w_{BA} = w_{BB} = w_{BC}$ и измерительных $w_{IA} = w_{IB} = w_{IC}$ обмоток ТТВТП, токов возбуждения $I_A = I_B = I_C$, а также наличии однородной структуры объекта контроля в зоне взаимодействия преобразователя с ОК $\varphi_{OK} = const$, получим внесенное напряжение трехфазного преобразователя, выделенное с помощью фильтра симметричных составляющих обратной последовательности:

$$\begin{aligned} \dot{U}_{ВНА2} = & \left(j\mu_0 w_B w_I \omega I_A R_A \pi \int_0^\infty \varphi_{OK} \exp(-x h_A^*) J_1 \left(x \sqrt{\frac{R_B}{R_I}} \right) J_1 \left(x \sqrt{\frac{R_I}{R_B}} \right) dx - \right. \\ & \underline{a}^2 j\mu_0 w_B w_I \omega I_A R_A \pi \int_0^\infty \varphi_{OK} \exp(-x h_A^*) J_1 \left(x \sqrt{\frac{R_B}{R_I}} \right) J_1 \left(x \sqrt{\frac{R_I}{R_B}} \right) dx + \\ & \left. \underline{a} j\mu_0 w_B w_I \omega I_A R_A \pi \int_0^\infty \varphi_{OK} \exp(-x h_A^*) J_1 \left(x \sqrt{\frac{R_B}{R_I}} \right) J_1 \left(x \sqrt{\frac{R_I}{R_B}} \right) dx \right) = \\ & \left(j\mu_0 w_B w_I \omega I_A R_A \pi \int_0^\infty \varphi_{OK} \exp(-x h_A^*) J_1 \left(x \sqrt{\frac{R_B}{R_I}} \right) J_1 \left(x \sqrt{\frac{R_I}{R_B}} \right) dx \right) (1 + \underline{a} + \underline{a}^2) \end{aligned} \quad (7)$$

Учитывая, что $1 + \underline{a} + \underline{a}^2 = 0$, симметричная составляющая обратной последовательности внесенного напряжения ТТВТП $\dot{U}_{ВНА2}$ возникает только при нарушении симметрии напряжений $\dot{U}_{ВНА}$, $\dot{U}_{ВНВ}$, $\dot{U}_{ВНС}$, формируемых на измерительных обмотках трехфазного вихретокового преобразователя.

При указанных выше условиях, но при нарушении однородной структуры ОК, что эквивалентно изменению удельной электрической проводимости в зоне взаимодействия ТТВТП с ОК, напряжение обратной последовательности $\dot{U}_{ВНА2}$ можно использовать для выявления нарушения сплошности объекта контроля.

Список литературы

1. ГОСТ Р ИСО 12716–2009. Контроль неразрушающий. Контроль вихретоковый. Термины и определения = ИСО 12718:2008. Контроль неразрушающий. Контроль вихретоковый. Словарь = ISO 12718:2008. Non-destructive-testing. Eddy current testing. Vocabulary : национальный стандарт Российской Федерации : издание официальное : утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 15 декабря 2009 г. № 1109-ст : введен впервые : дата введения 2010-12-01 / подготовлен Федеральным государственным унитарным предприятием «Всероссийский научно-исследовательский институт оптико-физических измерений» (ФГУП «ВНИИОФИ») – Москва : Стандартинформ, 2001 – 40 с. – Текст : непосредственный.

2. Ахмеджанов, Р. А. Вихретоковый (электромагнитный) неразрушающий контроль : учебное пособие / Р. А. Ахмеджанов. – Омск : Омский гос. ун-т путей сообщения, 2011. – 95 с. – Текст : непосредственный.

3. Неразрушающий контроль. Справочник. В 7 томах. Т. 2: в 2 кн. Кн. 1 : Контроль герметичности / под ред. В. В. Ключева. – Москва : Машиностроение, 2003. – 688. [7] с. – Библиогр. : с. 686. – ISBN 5-217-03185-9. – Текст : непосредственный.

4. Бессонов, Л. А. Теоретические основы электротехники: Электрические цепи : учебник для студентов электротехнических, энергетических и приборостроительных специальностей вузов / Л. А. Бессонов. – 7-е изд., перераб. и доп. – Москва : Высшая школа, 1978. – 528 с. – Текст : непосредственный.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Ахмеджанов Равиль Абдрахманович

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046,

Российская Федерация.

К.т.н., профессор кафедры «Вагоны и вагонное хозяйство» ОмГУПС.

Телефон: (3812) 31-06-72.

Макарочкин Валерий Володарович

Омский государственный технический университет (ОмГТУ).

Мира пр., д. 11, г. Омск, 644050,

Российская Федерация.

Старший преподаватель кафедры

"Нефтегазовое дело ОмГТУ.

Макарочкина Наталья Васильевна

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046,

Российская Федерация.

Учебный мастер, преподаватель кафедры «Вагоны и вагонное хозяйство» ОмГУПС.

Телефон: (3812) 31-06-72.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Ahmedzhanov Ravil Abdrahmanovich

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx av.m, Omsk, 644046,

the Russian Federation.

PhD in Technical Science, professor of the department «wagons and carriage facilities» OSTU.

Phone: (3812) 31-06-72.

Makarochkin Valerij Volodarovich

Omsk State Technical University (OmSTU).

11, Mira av., Omsk, 644050,

the Russian Federation.

senior lector of the department

« Oil and gas business» OSTU.

Makarochkina Nataliya Vasilievna

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx av.m, Omsk, 644046,

the Russian Federation.

Training master, senior lector of the department

«Wagons and carriage facilities» OSTU.

Phone: (3812) 31-06-72.

А. Ю. Кузьменко, А. А. Лаврухин

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

РАЗРАБОТКА ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ ХРАНЕНИЯ И ОБРАБОТКИ ДАННЫХ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ВЫСОКОВОЛЬТНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

В работе представлены результаты разработки системы диагностирования высоковольтных трансформаторов методом акустического контроля. Приведены основные блоки базы данных для хранения и обработки цифровой информации по результатам диагностического контроля высоковольтного оборудования.

Ключевые слова: высоковольтный трансформатор, цифровая обработка данных, акустический метод контроля, база данных результатов диагностирования.

Anton Yu. Kuzmenko, Andrey A. Lavrukhin

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

DEVELOPMENT OF AN INFORMATION SYSTEM FOR STORAGE AND PROCESSING OF DATA FOR DIAGNOSING HIGH-VOLTAGE EQUIPMENT

This article contains results of the development of a system for diagnosing high-voltage transformers using the acoustic control method. Described main database blocks for storing and processing digital information based on the results of diagnostic control of high-voltage equipment.

Keywords: high-voltage transformer, digital data processing, acoustic control method, database of diagnostic results.

В настоящее время цифровые методы мониторинга состояния силовых трансформаторов широко внедряются как на промышленных предприятиях, так и в сфере электроэнергетики в целом. В электрифицированных сетях железнодорожного транспорта проблема качественного и своевременного диагностирования изоляции тяговых трансформаторов также стоит остро.

Особенно учитывая неравномерность нагрузки и постоянное влияние электроподвижного состава на систему электроснабжения.

Важнейшей задачей достоверного и качественно диагностирования изоляции электрооборудования является правильная интерпретация полученных данных и своевременные действия по устранению возможных неисправностей. Для этого необходимо своевременно производить калибровку цифрового оборудования и использовать комплексные методы диагностирования. К таким комбинированным методикам можно отнести регистрацию, анализ и сохранение данных акустического контроля с последующим сравнением с данными хроматографического анализа.

В общем виде структурная схема мониторинга силовых трансформаторов представлена на рисунке 1.

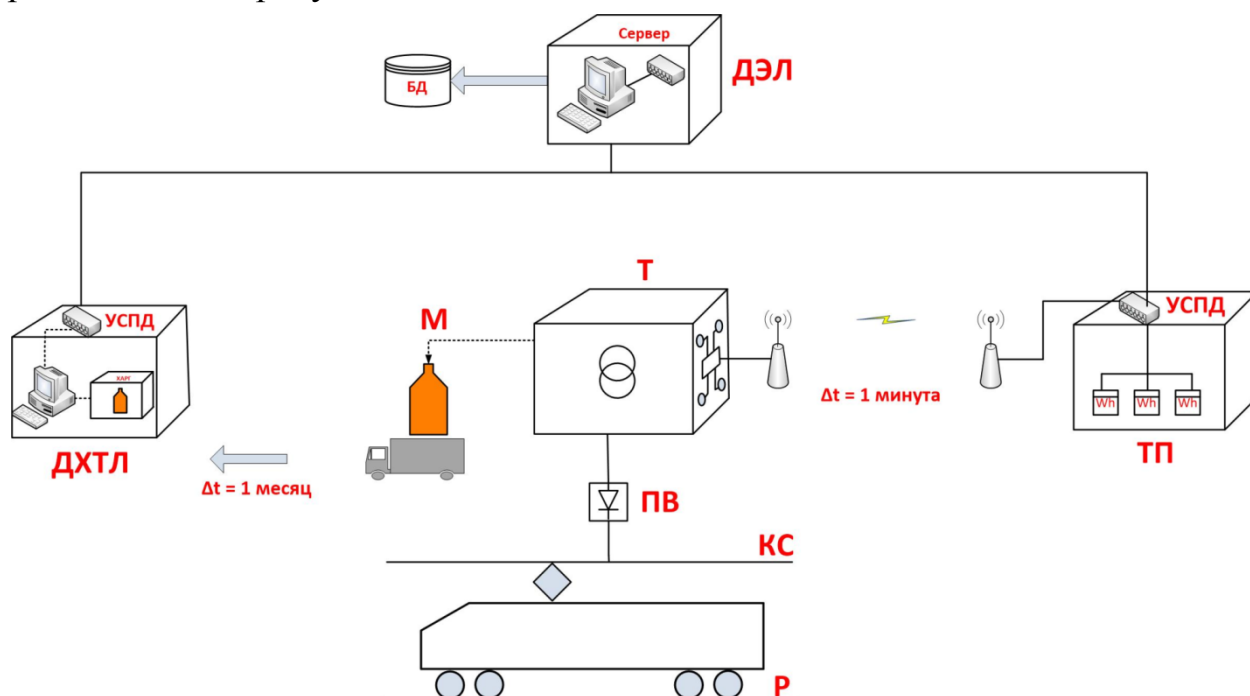


Рисунок 1 – Структурная схема системы мониторинга силовых трансформаторов

В общем виде функциональная схема состоит из двухуровневой системы мониторинга. На тяговой подстанции находится трансформатор (Т), который, через преобразователь (ПВ), осуществляет питание участка контактной сети (КС), по которому периодически проходит подвижной состав. На сегодняшний день, основным способом контроля состояния силовых трансформаторов является хроматографический анализ растворенных газов в масле (ХАРГ).

В основе хроматографического анализа лежит разделение сложной смеси на простейшие составляющие с последующей стадией количественного определения содержания в ней веществ [1]. Именно на основе полученных цифр и проводится конечная оценка состояния изоляции трансформатора и качества масла.

Данный способ имеет ряд недостатков. Процедура хроматографического анализа масла занимает в среднем около 1 месяца. Отбор масла производится при отключенном питании трансформатора, что приводит к перерывам в работе целого участка контактной сети. Данная методика не позволяет выполнить комплексную диагностику (нет возможности протестировать высоковольтные вводы трансформатора).

Другим способом мониторинга силовых трансформаторов является применение акустической системы контроля состояния изоляции и вводов трансформаторов [2]. Методы измерения и анализа активности ЧР в силовых трансформаторах зависят от типа трансформатора и применяемых стандартов.

При регулярном мониторинге состояния высоковольтной изоляции накапливается огромное количество информации [3]. Для удобства использования данных, их хранения и обработки предлагается использование базы данных с накоплением результатов мониторинга и последующим анализом состояния высоковольтной изоляции трансформаторов. Для реализации проекта базы данных был выбран программный пакет Microsoft Office Access [4]. Структурная схема базы данных приведена на рисунке 2.

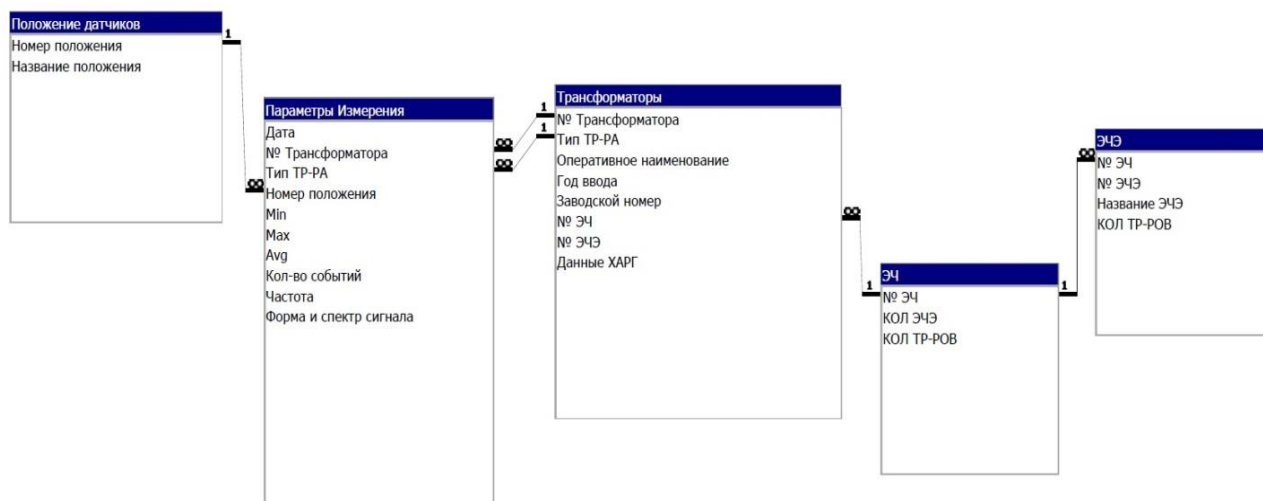


Рисунок 2 – Структурная схема базы данных

База данных содержит несколько основных таблиц: данные по ЭЧ, и ЭЧЭ Западно-Сибирской железной дороги, данные о трансформаторах в энергоучастках, параметры измерения и варианты размещения датчиков на корпусе трансформатора. Рассмотрим данные таблицы подробнее.

Таблица по ЭЧ включает в себя данные о номерах ЭЧ, количестве ЭЧЭ и трансформаторах, расположенных на этих участках. Таблица по тяговым подстанциям содержит информацию о номерах ЭЧЭ, их названии и количестве трансформаторов на этих подстанциях.

Поля с номерами ЭЧ и ЭЧЭ – ключевые и обязательные для данных таблиц. При добавлении новой записи о тяговой подстанции будет осуществляться обязательный ввод номера для поддержания уникальности каждой новой записи.

Таблица с данными по трансформаторам включает два обязательных ключевых поля – это номер трансформатора и его тип, что также позволяет поддерживать уникальность записи о каждом трансформаторе. Помимо обязательных полей в таблице присутствуют данные об оперативном наименовании трансформаторов, годах ввода в эксплуатацию, заводских номерах и номерах ЭЧ и подстанции.

Также в таблице создано поле OLE, позволяющее добавлять различные объекты (изображения, аудиофайлы, документы и т.д.). В данном случае это поле «Данные ХАРГ», с прикрепленной таблицей, выполненной в Microsoft Excel, содержащей информацию о хроматографическом анализе рассматриваемых трансформаторов.

Основной таблицей, через которую будет осуществляться дальнейшая загрузка данных, является таблица «Параметры измерения». Она содержит несколько ключевых обязательных полей, связанных с другими таблицами данных. Первое ключевое поле – это дата проведения испытания. Это поле обязательно, т.к. в дальнейшем может потребоваться выполнение запроса по всем измерениям за временной промежуток или количестве проведенных измерениях отдельно взятого трансформатора. Следующие два поля – номер и тип трансформатора. Они связаны составным ключом с таблицей «Трансформаторы». Это удобно при формировании новых данных об измерениях на трансформаторах, включенных в базу данных.

Процесс диагностирования включает в себя фиксацию шести основных параметров. Максимальное, минимальное и среднее значение полученных амплитудных сигналов. Данные о количестве зарегистрированных событий (т.е. регистрация сигналов, превышающих установленный уровень). Частоту зарегистрированных импульсов, а также осциллограмму формы и спектра сигнала (поле-объект OLE). Внешний вид таблицы с данными, формой и спектром сигнала приведен на рисунке 3.

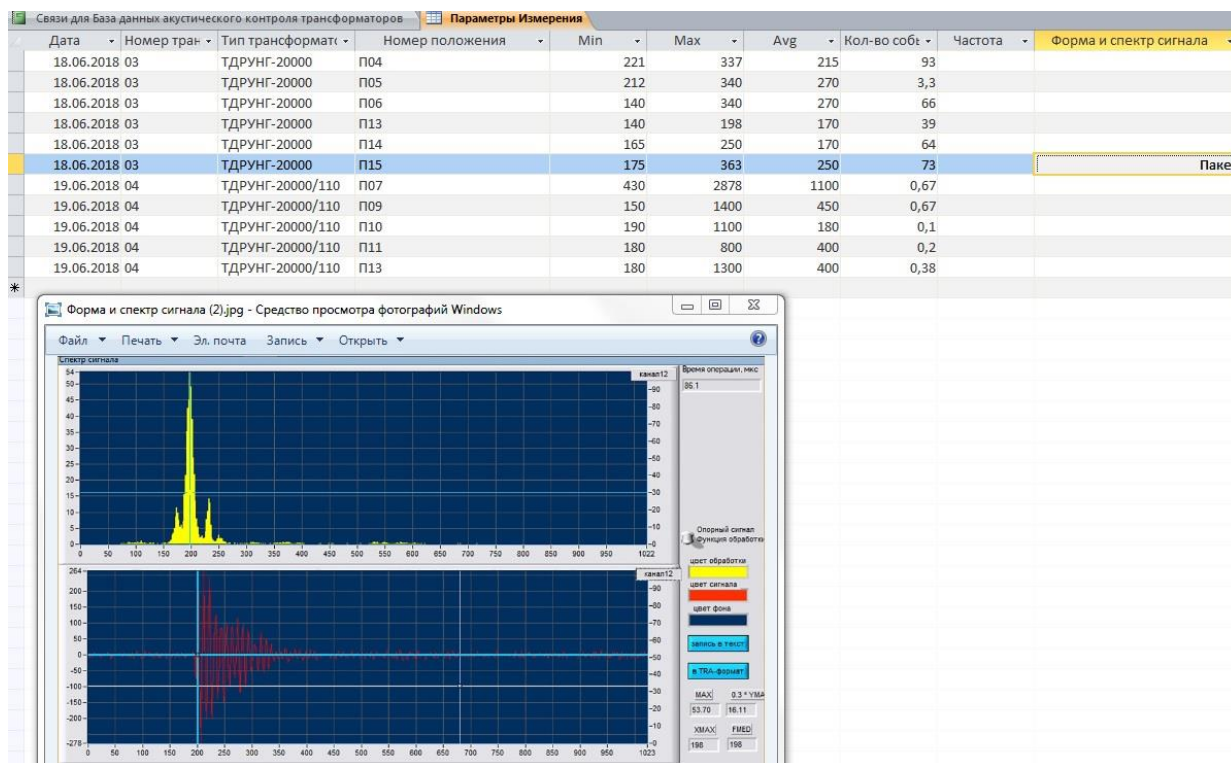


Рисунок 3 – Данные таблицы «Параметры измерения»

Таким образом, созданная база диагностических сигналов, позволит производить накопление, обработку и анализ получаемых импульсов, делать прогноз поведения частичных разрядов в изоляции высоковольтных трансформаторах, анализировать состояние изоляции на протяжении заданного промежутка времени.

Список литературы

1. Виноградова, Л. В. Хроматографический анализ растворенных газов в диагностике трансформаторов / Л. В. Виноградов, Е. Б. Игнатьев, Ю. М. Овсянников, Г. В. Попов. – Иваново : Ивановский государственный энергетический университет имени В. И. Ленина, 2013. – 104 с. – Текст : непосредственный.

2. Ивлиев, В. В. Акустико-эмиссионный контроль железнодорожных конструкций : монография / под ред. А. Н. Серьезнова, Л. Н. Степановой. – Новосибирск : Наука, 2011. – 272 с. – ISBN 978-5-02-018973-7. – Текст : непосредственный.

3. Кузнецов, А. А. Определение пороговых значений при диагностировании изоляции высоковольтного оборудования методами регистрации частичных разрядов / А. А. Кузнецов, А. Ю. Кузьменко, М. А. Кузнецова. – Текст : непосредственный // Омский научный вестник. – 2019. – № 2 (164). – С. 30–35. – DOI: 10.25206/1813-8225-2019-164-30-35.

4. Бекаревич, Ю. Б. Самоучитель Microsoft Access 2013 / Ю. Б. Бекаревич, Н. В. Пушкина. – Санкт-Петербург : БХВ-Петербург, 2014. – 464 с. – Текст : непосредственный

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Кузьменко Антон Юрьевич

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046,

Российская Федерация.

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Теоретическая электротехника» ОмГУПС.

Тел.: +7 (3812) 31-06-88.

E-mail: KuzmenkoAU@omgups.ru

Лаврухин Андрей Александрович

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046,

Российская Федерация.

Доцент кафедры «Автоматика и системы управления» ОмГУПС.

E-mail: lavruhinaa@gmail.com.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Kuzmenko Anton Yurievich

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx av.m, Omsk, 644046,

the Russian Federation.

Ph.D. in Technical Sciences, Senior lecturer of the department «Theoretical Electric Engineering» OSTU.

Phone: (3812) 31-06-88.

E-mail: KuzmenkoAU@omgups.ru

Lavrukhin Andrey Aleksandrovich

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx av.m, Omsk, 644046,

the Russian Federation.

Ph.D. in Technical Sciences, Professor of the department «Automatics and control systems» OSTU.

E-mail: lavruhinaa@gmail.com.

В. Т. Черемисин, А. Е. Перестенко, С. Г. Истомин

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС),

г. Омск, Российская Федерация

ПРОБЛЕМА ОТБОРА КЛЮЧЕВЫХ ПАРАМЕТРОВ ЭКСПЛУАТАЦИИ ЭЛЕКТРОПОДВИЖНОГО СОСТАВА И СИСТЕМЫ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ДЛЯ КЛАССИФИКАЦИИ ПОЕЗДОВ С ПОЗИЦИИ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ

В статье систематизированы сведения о параметрах перевозочного процесса, потенциально представляющих ценность для повышения качества классификации поездов с позиции энергоэффективности.

Ключевые слова: электроподвижной состав постоянного тока, регистраторы параметров движения, цифровая железная дорога.

В общем виде задача классификации поездов с позиции энергоэффективности представляет собой поиск функции, отображающей множество значений удельного расхода электроэнергии на тягу поездов (УРЭ) в конечное множество классов, т. е. адекватность классификации напрямую зависит от качества определения фактических и граничных значений УРЭ.

В настоящее время определяется единственное граничное значение – норма УРЭ, посредством которой все поездки разделяются на два класса: совершенные с превышением установленной нормы и без него. Используемый для определения данного значения подход имеет принципиальные недостатки, в числе которых аппроксимация посредством уравнения парной регрессии с недостаточным числом параметров и использование недостоверных отчётных данных для определения коэффициентов регрессии, что существенно снижает адекватность итоговой классификации [1].

До недавнего времени исследования в данном направлении были затруднены по причине отсутствия достаточного количества достоверных экспериментальных данных об эксплуатации подвижного состава, вызванного несовершенством методов и средств учёта расхода электроэнергии на тягу поездов. К настоящему моменту на железнодорожном транспорте внедрено большое количество регистраторов различных параметров, порождающих большие объёмы разнородных данных о поездной работе [2-3], которые могут

открыть широкие возможности для исследований способов совершенствования методов нормирования УРЭ посредством применения более сложных предиктивных моделей. Хотя существующее оборудование и информационные потоки не в полной мере удовлетворяют выдвинутому в ряде исследований требованиям к комплексной системе учёта расхода электроэнергии [3-6], высокий приоритет проекта цифровизации железных дорог, установленный правительством Российской Федерации и открытым акционерным обществом «Российские железные дороги», в рамках реализации которого планируется внедрить большое число комплексных информационных систем [7-9], свидетельствует в пользу высокой вероятности преодоления этого несоответствия в ближайшем будущем. Более того, в результате успешной реализации вышеназванных мероприятий холдинг будет располагать беспрецедентными объемами существенно более детальных данных о различных аспектах функционирования железных дорог. В связи с вышесказанным актуальной является задача разработки нового метода нормирования УРЭ, более полно учитывающего специфичные для каждой поездки условия и опирающегося на более достоверные экспериментальные данные.

Представим процесс эксплуатации подвижного состава, как совокупность проследований поездами межподстанционных зон (МПЗ), в процессе которых ЭПС обменивается энергией с тяговыми подстанциями и другими поездами посредством тяговой сети. В таком случае, задачу нормирования УРЭ можно свести к задаче регрессии, то есть поиска зависимости зависимой переменной y , т.е. непосредственно УРЭ, от ряда независимых переменных x , формирующих для каждого объекта, т.е. проследования МПЗ, вектор признаков w . В таком случае вопрос о том, какие параметры составят признаковое описание объекта является ключевым для всего исследования.

На данный момент не существует алгоритмов, позволяющих сформировать перечень необходимых и достаточных для произвольной задачи признаков, поэтому отбор значимых признаков производится либо эвристически путем конструирования признаков из существующих данных [10], либо методом экспертной оценки на основании теоретических положений. В рамках поставленной задачи конструирование признаков неприменимо, так как в настоящее время нет единого процесса по регистрации, обработке и хранении данных о перевозочном процессе [3], т. е. набор данных, из которых ведётся конструирование, не определён. Экспертный отбор в свою очередь является нетривиальным, т. к. предсказать эффект от добавления нового признака или достоверно оценить значимость некоторого признака в контексте точности модели не представляется возможным. Таким образом проблема отбора

ключевых параметров эксплуатации электроподвижного состава и системы тягового электроснабжения для классификации поездок с позиции энергоэффективности заключается в отсутствии в настоящее время методов, позволяющих определить упорядоченную последовательность признаков, такую что модель использующая первые n признаков данной последовательности будет обладать наибольшей точностью среди всех регрессионных моделей с признаковым описанием размерности n .

Тем не менее, целесообразно ограничить множество рассматриваемых признаков путем выделения потенциально значимых посредством анализа существующих работ, исследующих применения комплексных систем учёта в контексте оценки энергоэффективности [1-6, 11-12]. Сведем таковые признаки в таблицу 1, оценив параметры по следующим критериям:

- Доступность – параметр измерим и фиксируется хотя бы одной информационной системой в явном виде либо вычислим через другие параметры без привлечения данных сторонних систем;
- Детальность – для изменяющихся во времени параметров частота дискретизации (для аналоговых) либо частота опроса (для дискретных) не менее единицы, для постоянных параметров значение не определено;
- Однозначность – способы и единицы измерения параметра стандартизованы либо параметр имеет единственный источник.

На основании полученных данных приходим к следующим выводам:

- Несмотря на отсутствия комплексной системы учёта, обработки и хранения данных, большинство потенциально значимых параметров в настоящее время явно регистрируются хотя бы одной информационной системой либо вычислимы из других регистрируемых ею параметров. Исключение составляет координата и положение ЭПС, а также сведения о том, в какой МПЗ находится ЭПС и информация о других находящихся в ней ЭПС;
- Количество энергии, потребленной и возвращенной подстанцией из внешней энергосистемы и в контактную сеть по фидерам регистрируется с недостаточной детализацией;
- Положение состава в пути и скорость движения для ЭС4К, 2ЭС6 и 2ЭС10 фиксируются с недостаточной точностью;
- Время и координата для всех ЭПС (кроме ЭС2Г) регистрируется без привязки и синхронизации с глобальными значениями и может не совпадать с данными других систем;
- Температура воздуха за бортом ЭПС не регистрируется ни одной системой, что вынуждает использование приближенных значений с недостаточной детализацией, причём метод приближения не стандартизован.

Таблица 1

Потенциально значимые признаки для анализа энергоэффективности

Объект	Параметр	Доступность	Детальность	Однозначность
СТЭ	Количество энергии, потребленное подстанцией $W_{\text{тп}}$, кВт·ч	+	–	+
	Количество энергии, отданное в контактную сеть $W_{\text{кс}}$, кВт·ч	+	–	+
ЭПС	Номер ЭПС	+	NA	+
	Время	+	+	– (кроме ЭС2Г)
	Координата	+(только ЭС2Г)	+, если применимо	+, если применимо
	Положение в пути	$\pm^*$	$\pm^*$	–
	Скорость движения, км/ч	+	+	+
	Режим работы	+	+	–
	Напряжение в контактной сети, $U_{\text{кс}}$	+	+	+
	Токи тяговых электродвигателей $I_{\text{тэд}}$, А	+	+	+
	Расход электроэнергии на тягу $W_{\text{т}}$, кВт·ч	+	+	+
	Возврат электроэнергии при рекуперации $W_{\text{р}}$, кВт·ч	+	+	+
	Расход электроэнергии на собственные нужды $W_{\text{сн}}$, кВт·ч	+(кроме ЭС4К)	+, если применимо	+, если применимо
	Расход электроэнергии на отопление вагонов $W_{\text{от}}$, кВт·ч	+	+, если применимо	+, если применимо
	Полный расход электроэнергии W , кВт·ч	+	+	+
Инфраструктура	Количество путей	+	NA	+
	Профиль пути	+	NA	+
	Координаты границ МПЗ	+	NA	–
Организация движения	Номер поезда	+	NA	+
	Табельный номер машиниста	+	NA	+
	Масса состава, т	+	NA	+
	Составность, количество вагонов	+	NA	+
	График движения	+	NA	+
	Величина и координаты временных ограничений скорости	+	NA	+
	Текущая МПЗ	–	NA	NA
	Информация о других ЭПС в той же МПЗ	–	NA	NA
Окружающая среда	Температура наружного воздуха, °С	+	–	–

– * – зависит установленного на ЭПС РПД, см. [2].

Таким образом, несмотря на рост числа и количества различных информационных систем, опираясь лишь на производимые в настоящее время данные не представляется возможным даже определение фактического

значения УРЭ в границах МПЗ, что существенно ограничивает возможности апробации различных методов повышения точности нормирования УРЭ и, как следствие, повышения качества классификации поездов с позиции энергоэффективности.

В качестве перспективы дальнейшей проработки темы предлагается исследовать возможность решения поставленной задачи посредством использования более совершенных экспериментальных систем регистрации.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований в рамках научного проекта № 19-38-90140.

Список литературы

1. Черемисин, В. Т. Совершенствование статистического метода нормирования удельного расхода электроэнергии / В. Т. Черемисин, С. Г. Истомин, А. Е. Перестенко. – Текст : непосредственный // Технологическое обеспечение ремонта и повышение динамических качеств железнодорожного подвижного состава : материалы третьей всероссийской научно-технической конференции с международным участием: в 3-х частях / Омский гос. ун-т. путей сообщения. – Омск, 2015. – Ч.3. – С. 111–116.

2. Истомин, С. Г. Систематизация технических возможностей современных регистраторов параметров движения электроподвижного состава постоянного тока / С. Г. Истомин, А. Е. Перестенко. – Текст : непосредственный // Технологическое обеспечение ремонта и повышение динамических качеств железнодорожного подвижного состава : материалы пятой всероссийской научно-технической конференции с международным участием / Омский гос. ун-т. путей сообщения. – Омск, 2019. – С. 257–261.

3. Перестенко, А. Е. Разработка цифровой модели интеллектуального управления взаимодействием электроподвижного состава и инфраструктуры железных дорог / А. Е. Перестенко, С. Г. Истомин. – Текст : непосредственный // Инновационные проекты и технологии в образовании, промышленности и на транспорте : материалы научной конференции / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2020. – С. 145 –150.

4. Истомин, С. Г. Автоматизированный учет электроэнергии на тягу поездов - основа экономии топливно-энергетических ресурсов ОАО «РЖД» / С. Г. Истомин, В. Л. Незевак. – Текст : непосредственный // Транспорт 2014 : труды международной научно-практической конференции : в 4-х частях. Часть 2. Технические науки / Рост. гос. ун-т путей сообщения. – Ростов н/Д, 2014. – С. 227–230.

5. Черемисин, В. Т. Контроль нерационального использования электрической энергии на тягу поездов с применением бортовых информационно-измерительных комплексов учета электроэнергии / В. Т. Черемисин, С. Ю. Ушаков, С. Г. Истомин. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2015. – № 1 (21). – С. 69–74.

6. Черемисин, В. Т. Повышение энергетической эффективности электротяги при внедрении мониторинга электроэнергии на фидерах контактной сети / В. Т. Черемисин, А. Л. Каштанов, М. М. Никифоров. – Текст : непосредственный // Транспорт Урала. – 2015. – № 2 (45). – С. 67–70.

7. Стратегия научно-технологического развития холдинга «Российские железные дороги» на период до 2020 года и на перспективу до 2025 года. «Белая книга». – Москва, 2015. – 63 с. – Текст : непосредственный.

8. Долгосрочная программа развития открытого акционерного общества «Российские железные дороги» № 466р. : утверждена Указом Президента Российской Федерации от 07.05.2018. / Правительство Российской Федерации. – Москва, 2019. – 135 с.

9. Концепция реализации комплексного научно-технического проекта «Цифровая железная дорога» № 1285р. : утверждена распоряжением ОАО «РЖД» от 05.12.2017. / ОАО «РЖД». – Москва, 2017. – 92 с.

10. Истомин, С. Г. Мониторинг и снижение потерь электроэнергии электроподвижным составом и устройствами электроснабжения / С. Г. Истомин, А. Е. Перестенко. – Текст : непосредственный // «Eltrans 10.0»: тезисы докладов Десятого международного симпозиума «Eltras 10.0», посвященного 210-летию со дня основания первого транспортного вуза России – Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I (9-11 октября 2019 г., Санкт-Петербург). – Санкт-Петербург : Петербургский гос. ун-т путей сообщения Императора Александра I, 2019. – Ч.1. – С. 91-92.

11. Перестенко, А. Е. Информационная модель межподстанционной зоны при внедрении комплексной системы учета электропотребления на тягу поездов / А. Е. Перестенко. – Текст : непосредственный // Инновационные проекты и технологии в образовании, промышленности и на транспорте : материалы XI научной конференции, посвященной Дню российской науки / Омский гос. ун-т. путей сообщения. – Омск, 2017. – С. 122–128.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Черемисин Василий Титович

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046,

Российская Федерация.

Доктор технических наук, профессор,
директор Научно-исследовательского
института энергосбережения на
железнодорожном транспорте.

Тел.: (381-2) 44-39-23.

E-mail: cheremisinvt@gmail.com.

Перестенко Артем Евгеньевич

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046,

Российская Федерация.

Аспирант кафедры «Подвижной состав
электрических железных дорог» ОмГУПС.

Тел.: +7 (3812) 31-34-19.

E-mail: art-perestenko@yandex.ru.

Истомин Станислав Геннадьевич

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046,

Российская Федерация.

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

Тел.: +7 (3812) 31-34-19.

E-mail: istomin_sg@mail.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Cheremisin Vasily Titovich

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx av.m, Omsk, 644046,

the Russian Federation.

DSc in Engineering, Professor, Director, Research
Institute for Energy Efficiency in Rail Transport.

Phone: (3812) 44-39-23.

E-mail: cheremisinvt@gmail.com.

Perestenko Artem Evgenievich

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx av.m, Omsk, 644046,

the Russian Federation.

Graduate student of the department "Rolling stock
of electric railways" OSTU.

Phone: +7 (3812) 31-34-19.

E-mail: art-perestenko@yandex.ru.

Istomin Stanislav Gennadevich

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx av.m, Omsk, 644046,

the Russian Federation.

Candidate of Technical Sciences, Associate
Professor of the Department «Rolling stock
electric railways» OSTU.

Phone: +7 (3812) 31-34-19.

E-mail: istomin_sg@mail.ru.

А. Л. Каштанов, А. А. Комяков, М. М. Никифоров

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

ПРИМЕНЕНИЕ МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОЙ ОПТИМИЗАЦИИ ДЛЯ ОТБОРА МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЯ В ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССАХ

Статья посвящена анализу методов принятия решения при отборе моделей энергопотребления в производственных процессах. Рассмотрены возможности применения оптимизации Парето и критерия Гурвица применительно к моделям объектов железнодорожного транспорта

Ключевые слова: многокритериальная оптимизация, моделирование, производственный процесс, оптимизация Парето, критерий Гурвица.

Alexey L. Kashtanov, Alexander A. Komyakov, Michael M. Nikiforov

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

MULTI-CRITERIAL OPTIMIZATION FOR SELECTION OF ENERGY CONSUMPTION MATHEMATICAL MODELS IN PRODUCTION PROCESSES

The paper is devoted to the analysis of decision-making methods in the selection of energy consumption models in production processes. The possibilities of applying the Pareto optimization and the Hurwitz criterion as applied in railway transport objects are considered.

Keywords: multi-criterial optimization, modeling, production process, Pareto optimization, Hurwitz criterion.

В задачах моделирования сложных производственных процессов часто возникает вопрос выбора той или иной возможной модели из нескольких альтернатив. Данная задача может возникать, например, на этапе выбора факторов для включения в модель, или на этапе выбора модели для заданного набора факторов.

В частности, при организации ресурсосберегающих производственных систем на железнодорожном транспорте возникает необходимость в моделировании процесса использования топливно-энергетических ресурсов (ТЭР). Такая задача может быть решена с использованием регрессионных моделей, методов машинного обучения или иных способов. При этом модели могут включать разное число входных факторов (производственных, технологических, климатических и т.д.). Очевидно, что большое количество влияющих факторов потенциально улучшает точность модели, но значительно увеличивает сложность.

Как правило, при моделировании процесса использования ТЭР целесообразно разделение общей выборки исходных данных на обучающую и тестовую [1]. При оценке точности моделей на обучающей выборке в большинстве случаев достаточно их сравнения по коэффициенту детерминации R^2 .

Часто модели, хорошо показывающие себя на обучающей выборке, неудовлетворительно работают на тестовой. В данном случае необходимо использовать несколько показателей точности для тестовой выборки (например, среднюю относительную погрешность $MAPE$, среднюю квадратическую погрешность $RMSE$, коэффициент вариации CV). Кроме того, как было указано ранее, модели могут отличаться по количеству входных факторов.

В данном случае возникает задача многокритериальной оптимизации. Один из наиболее известных методов решения задачи такого рода – оптимизация по Парето [2, 3].

Рассмотрим два примера сравнения четырех регрессионных моделей использования ТЭР, которые основаны на различных методах отбора факторов. Сравнение осуществляется по четырем критериям: число входных факторов, $MAPE$, $RMSE$, CV . Объектами для исследования являются мотор-вагонное депо Омск (таблица 1) и дистанция СЦБ Брянск-Льговский (таблица 2). Следует уточнить, что в данном случае все частные критерии минимизируются.

Из таблицы 1 видно, что один из вариантов (метод «последовательный с исключением») доминирует над другими по Парето, в этом случае принятие решения об отборе лучшего варианта очевидно. Но обычно существует возможность выделить лишь фронт Парето из нескольких вариантов, или же все решения являются оптимальными недоминируемыми по Парето (таблица 2). В этом случае целесообразно применение других критериев для принятия решения.

Таблица 1

Сравнение методов отбора факторов для мотор-вагонного депо Омск

Метод отбора факторов	Факторы, включаемые в модель	$MAPE$, %	$RMSE$, кВт·ч	CV
Все факторы	$t, W_{рек}, V_{уч}, V_{техн}, d_{авт}, m_c, q$	16,59	171,35	0,21
Последовательный с включением	$t, V_{уч}, V_{техн}, m_c, q$	17,58	171,61	0,21
Последовательный с исключением	t, m_c	15,75	166,88	0,20
Метод главных компонент	F_1, F_2, F_3	18,32	182,43	0,22

Таблица 2

Сравнение методов отбора факторов для дистанции СЦБ Брянск-Льговский

Метод отбора факторов	Факторы, включаемые в модель	$MAPE$, %	$RMSE$, кВт·ч	CV
Все факторы	$V_{произв}, t, T_{св.дня}, Cl, F_w, Sn$	16,06	65,56	0,22
Последовательный с включением	$V_{произв}, t$	17,23	65,75	0,22
Последовательный с исключением	$V_{произв}, t$	17,23	65,75	0,22
Метод главных компонент	F_1, F_2	17,56	60,43	0,18

С этой точки зрения можно отметить следующие методы: оптимизация основного частного критерия, метод взвешенной суммы частных критериев, минимаксный критерий, критерий Гурвица, метод последовательных уступок, метод идеальной точки и т.д. [4, 5].

Рассмотрим возможность применения обобщенного критерия Гурвица для случая, представленного в таблице 2.

Для этого выполним нормализацию q -х критериев путем деления их значений для каждой i -й альтернативы на минимальное значение критерия:

$$x_{iq \text{ норм}} = \frac{x_{iq}}{\min(x_{1q}, x_{2q} \dots x_{mq})}. \quad (1)$$

В результате таблица 2 преобразуется следующим образом (таблица 3):

Таблица 3

Нормализованные значения частных критериев для дистанции СЦБ
Брянск-Льговский

Метод отбора факторов	Нормализованное кол-во факторов	<i>MAPE</i> , %	<i>RMSE</i> , кВт·ч	<i>CV</i>
Все факторы	3,000	1,000	1,085	1,222
Последовательный с включением	1,000	1,073	1,088	1,222
Последовательный с исключением	1,000	1,073	1,088	1,222
Метод главных компонент	1,000	1,093	1,000	1,000

Значение обобщенного критерия Гурвица для i -й альтернативы рассчитывается следующим образом [4]:

$$H_i = \sum_{q=1}^N \lambda_q x_{iq \text{ норм}}, \quad (2)$$

где λ_q – весовые коэффициенты, которые выбирает лицо, принимающее решение (ЛПР) исходя из склонности к риску или из иных соображений.

Сумма всех значений λ_q должна быть равна 1.

Рассмотрим два варианта: 1) ЛПР считает, что все частные критерии одинаково значимы, в этом случае $\lambda_q = 0,25$; 2) ЛПР считает, что точность модели существенно важнее ее сложности, причем ключевым показателем точности будет являться *MAPE*, и задается следующими коэффициентами: $\lambda_1 = 0,1$, $\lambda_2 = 0,4$, $\lambda_3 = 0,25$, $\lambda_4 = 0,25$. В результате получаем следующий вектор значений для первого варианта

$$H_i = \begin{pmatrix} 1,58 \\ 1,10 \\ 1,10 \\ 1,02 \end{pmatrix}, \quad (3)$$

и для второго варианта

$$H_i = \begin{pmatrix} 1,28 \\ 1,11 \\ 1,11 \\ 1,04 \end{pmatrix}. \quad (4)$$

Учитывая, что частные критерии минимизируются, для обоих вариантов лучшей следует признать альтернативу 4, т.е. модель, основанную на методе главных компонент.

Перспективными направлениями развития указанной задачи в области формирования ресурсосберегающих производственных систем являются анализ целесообразности применения других критериев для отбора математических моделей энергопотребления, анализ возможности использования данных методов для принятия решения о внедрении ресурсосберегающих технических средств и технологий на железнодорожном транспорте.

Список литературы

1. Комяков, А. А. Применение метода главных компонент для формирования математической модели процесса электропотребления на железнодорожном транспорте / А. А. Комяков. – Текст : непосредственный // Машиностроение. – 2016. – Т.4. – №3. – С. 27–32.
2. Ларионов, И. П. Парето-оптимизация в области принятия решений при проектировании комплексной системы защиты предприятия / И. П. Ларионов, П. Б. Хорев. – Текст : электронный // Наукоедение. 2016. – №2. – Т.8. – URL: <http://naukovedenie.ru/PDF/118TVN216.pdf> (дата обращения: 05.10.2020). – DOI: 10.15862/118TVN216.
3. Лапаев, Д. Н. Формирование методики выбора экономически эффективных хозяйствующих субъектов по совокупности показателей на основе принципа Парето / Д. Н. Лапаев. – Текст : непосредственный // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. Серия: Экономика и финансы. – 2005. – № 1. – С. 771–777.
4. Богоявленский, С. Б. Теоретические и практические аспекты принятия решений в условиях неопределенности и риска / С. Б. Богоявленский. – Санкт-Петербург : Санкт-Петербургский гос. экономический ун-т, 2014. – Текст : непосредственный.
5. Бродецкий, Г. Л. Методы оптимизации многокритериальных решений в логистике / Г. Л. Бродецкий – Москва : 2009. – 230 с. – Текст : непосредственный.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Каштанов Алексей Леонидович

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046,

Российская Федерация.

Кандидат технических наук, начальник научно-производственной лаборатории «Энергосбережение и энергоэффективность на ж.д. транспорте», доцент кафедры «Теоретическая электротехника» ОмГУПС.

Тел.: +7 (3812) 44-39-23.

E-mail: al.kashtanov@mail.ru.

Комяков Александр Анатольевич

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046,

Российская Федерация.

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Теоретическая электротехника» ОмГУПС.

Тел.: (3812) 44-39-23.

E-mail: tskom@mail.ru.

Никифоров Михаил Михайлович

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046,

Российская Федерация.

Кандидат технических наук, заместитель директора научно-исследовательского института энергосбережения на железнодорожном транспорте (ОмГУПС).

Тел.: (3812) 44-39-23.

E-mail: nikiforovmm@rambler.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Kashtanov Alexey Leonidovich

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx av.m, Omsk, 644046,

the Russian Federation.

Cand.Tech.Sci., Head of Research and Production Laboratory «Energy saving and energy efficiency on the railway Transport», The Senior Lecturer of Chair «Theoretical Electrical Engineering» OSTU.

Phone: +7 (3812) 44-39-23.

E-mail: kesh-al@rambler.ru.

Komyakov Alexandr Anatolevich

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx av.m, Omsk, 644046,

the Russian Federation.

Cand.Tech.Sci., the senior lecturer of chair «Theoretical the electrical engineer» OSTU.

Phone: (3812) 44-39-23.

E-mail: tskom@mail.ru.

Nikiforov Mikhail Mikhailovich

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx av.m, Omsk, 644046,

the Russian Federation.

Cand.Tech.Sci., deputy director Research Institute for Energy Efficiency in Railway Transport (OSTU).

Phone: (3812) 44-39-23.

E-mail: nikiforovmm@rambler.ru.

УДК 621.396.2

К. В. Авдеева, Е. В. Демух

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

**ОЦЕНКА ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТИ
ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННОГО ОБОРУДОВАНИЯ И СИСТЕМ
БЕСПРОВОДНОЙ СВЯЗИ**

В статье приведена оценка электромагнитной совместимости телекоммуникационного оборудования и систем беспроводной связи на примере сетей Wi-Fi, широко применяемых на предприятиях, в общественных местах и жилых домах.

Ключевые слова: беспроводная связь, скорость передачи, Wi-Fi, частотный диапазон, электромагнитное влияние, уровень сигнала.

Ksenia V. Avdeeva, Ekaterina V. Demukh

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

**ASSESSMENT OF ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY OF
TELECOMMUNICATION EQUIPMENT AND WIRELESS
COMMUNICATION SYSTEMS**

The article provides an assessment of the electromagnetic compatibility of telecommunications equipment and wireless communication systems using the example of Wi-Fi networks, which are widely used in enterprises, public places and residential buildings.

Keywords: wireless communication, transmission rate, Wi-Fi, frequency range, electromagnetic interference, signal strength.

В настоящее время беспроводные технологии стремительно развиваются, постоянно создаются новые устройства и появляются новые услуги. Беспроводные сети развертываются в аэропортах, университетах, отелях, ресторанах, на предприятиях. Беспроводная передача данных обеспечивает

рост производительности, повышая качество обслуживания клиентов и создавая конкурентные преимущества. Кроме того, беспроводные технологии входят и в дома пользователей, предоставляя возможность избавиться от соединительных проводов.

Однако, растущее количество беспроводных устройств оказывает и негативное влияние, которое выражается в электромагнитном загрязнении окружающей среды и влиянии на различную аппаратуру связи.

Электромагнитная совместимость (ЭМС) – это способность электротехнических или электронных устройств надежно функционировать с заданным качеством в определенной электромагнитной обстановке и не создавать при этом недопустимых электромагнитных помех другим техническим средствам, а также не оказывать вредного воздействия на биологические объекты, в том числе и на организм человека [1].

Проведем оценку электромагнитной совместимости телекоммуникационного оборудования и систем беспроводной связи на примере сетей Wi-Fi, поскольку они в настоящее время являются одними из наиболее распространенных систем беспроводной связи ввиду их широкого применения на предприятиях, в общественных местах и жилых домах.

При осуществлении связи в беспроводной сети Wi-Fi все роутеры работают на одном из каналов, каждому из которых соответствует различный диапазон частот. Для того чтобы избежать помех, каналы, используемые соседними устройствами, должны различаться – таково базовое требование беспрепятственного использования сети. В том случае, когда в зоне обслуживания одной точки доступа находится другая, которая работает на том же канале, могут появиться эффекты внутриканальной интерференции.

Обычно в зоне расположения пользователей используется большое число роутеров, при этом многие из них могут работать на одном канале. Чем больше таких роутеров, тем выше внутриканальная интерференция. Степень влияния внутриканальной интерференции в сетях Wi-Fi зависит от нескольких факторов: тип антенны, тип точки доступа, ее месторасположение, число клиентских устройств в зоне покрытия и т.д. Именно внутриканальная интерференция – основная причина того, что сети с большим числом роутеров испытывают проблемы в эксплуатации. Данный вид интерференции возникает, когда сигналы от двух устройств-передатчиков, использующих один канал и находящихся на небольшом расстоянии друг от друга, достаточно сильны и накладываются друг на друга, достигая одного устройства-приемника. В результате внутриканальной интерференции ячейки нескольких точек доступа будут вынуждены делить время

передачи между собой, что может порождать задержки в канале связи, искажение принимаемой информации и коллизии при передаче. Чтобы избежать этого, необходимо располагать передатчики, использующие один канал, на максимально возможном расстоянии друг от друга [2].

Межканальная интерференция возникает при пересечении в спектре полосы сигналов, которые передаются на различных каналах. Данное явление является неизбежным, так как ячеистый способ построения беспроводных сетей связи предполагает наложение зон покрытия работающих на разных каналах точек доступа.

Несмотря на то, что современные роутеры имеют функцию автоматического поиска наиболее стабильного и наименее загруженного канала Wi-Fi, в условиях высокой плотности использования различных точек доступа полностью исключить воздействия их друг на друга невозможно.

Для оценки этого влияния проведены измерения мощности сигнала от роутера Wi-Fi в реальных условиях на примере помещения (рисунок 1).

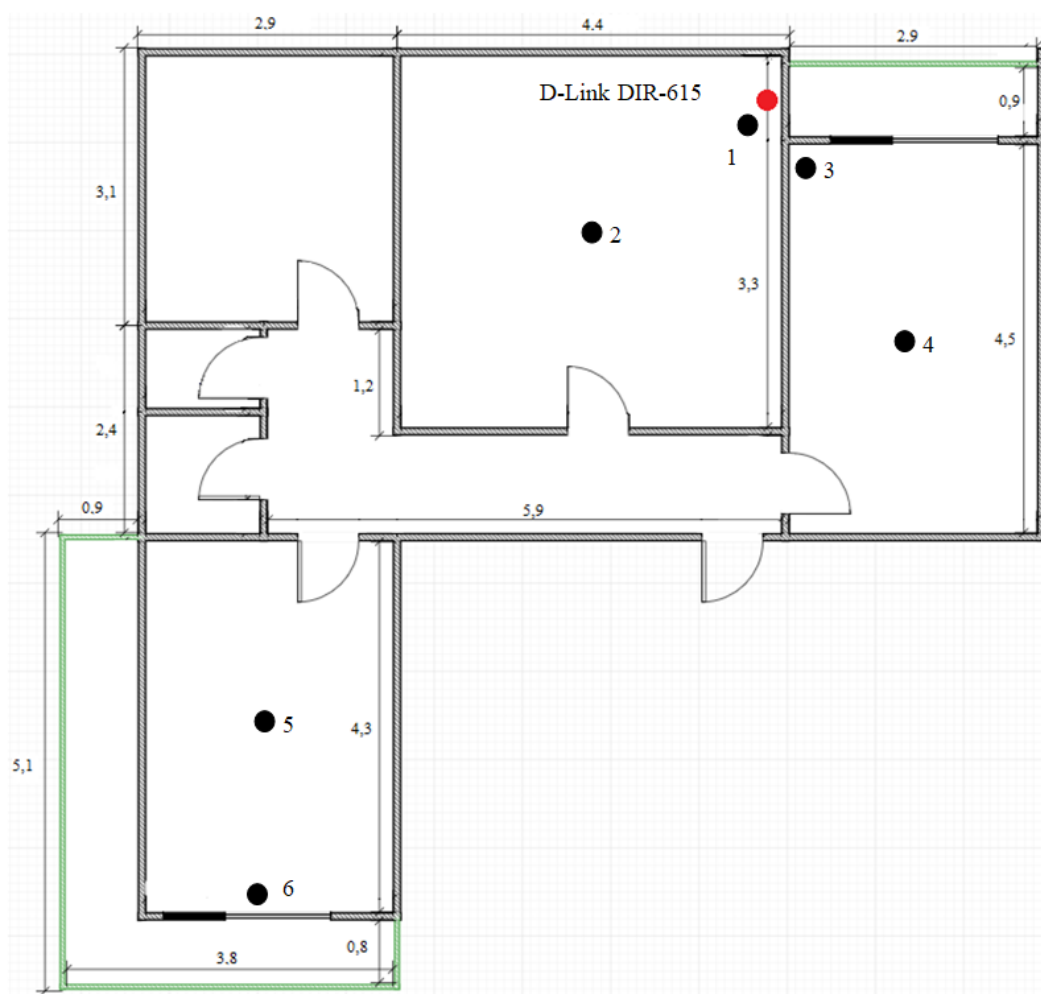


Рисунок 1 – План помещения

Экспериментальные измерения проводились с использованием программного обеспечения (ПО) Wi-Fi Monitor в точках помещения 1 – 6. Результатом измерений, проводимых с помощью данного ПО, являются графики, которые отображают мощности сигнала от всех точек доступа, обнаруживаемых в точке измерения, в частности от роутеров, установленных в соседних помещениях.

На рисунке 2 и 3 представлены результаты измерений в точках 1 и 6. Исследуемая сеть роутера D-Link DIR-615 называется 80h. Как видно из графиков, при удалении от роутера мощность сигнала сильно падает. Кроме того, в точке 6 сигнал 80h перекрывается сигналами от роутеров, установленных в соседних помещениях, что непосредственно сказывается на стабильности и скорости соединения.

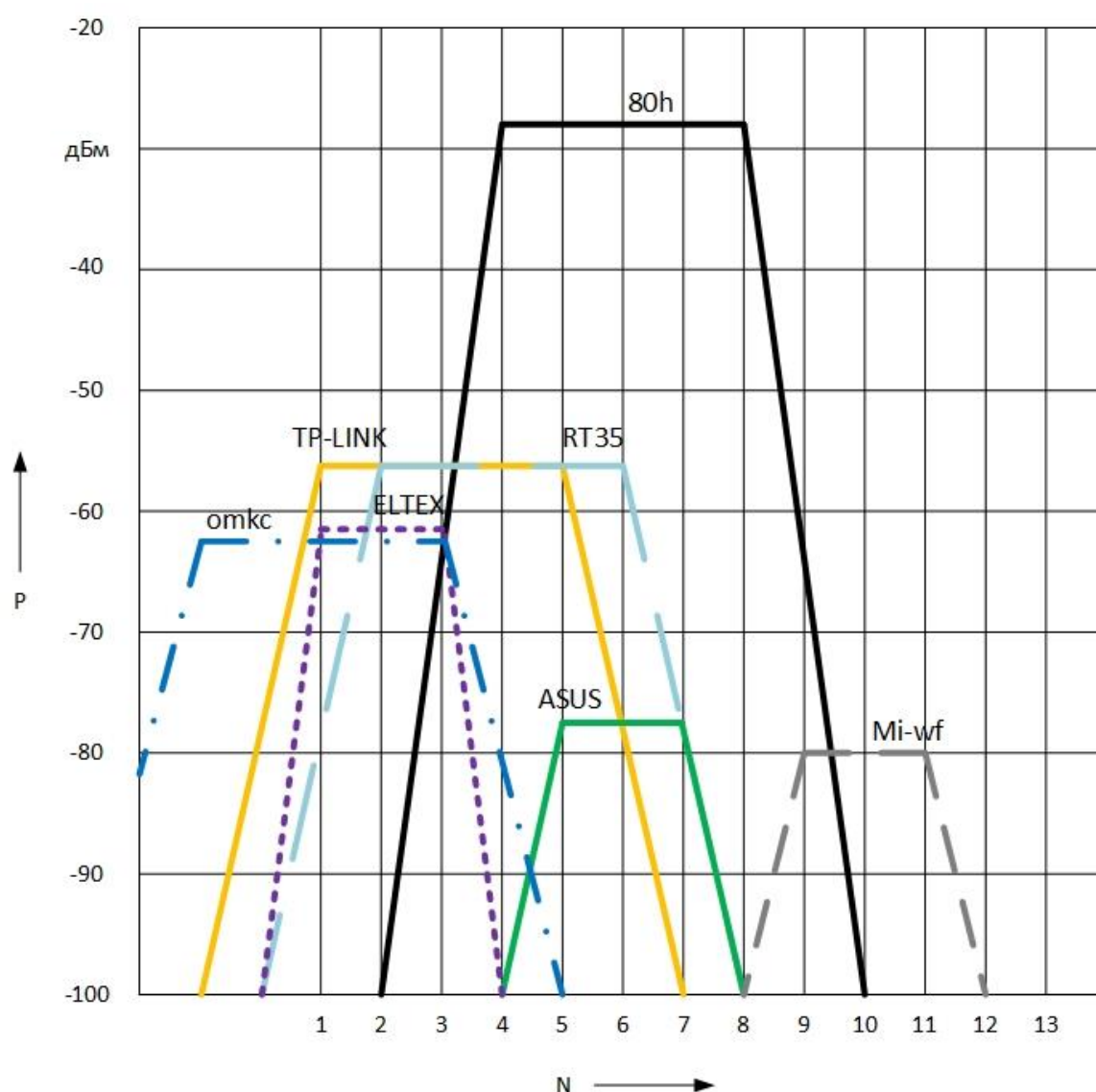


Рисунок 2 – Результаты измерений в точке 1

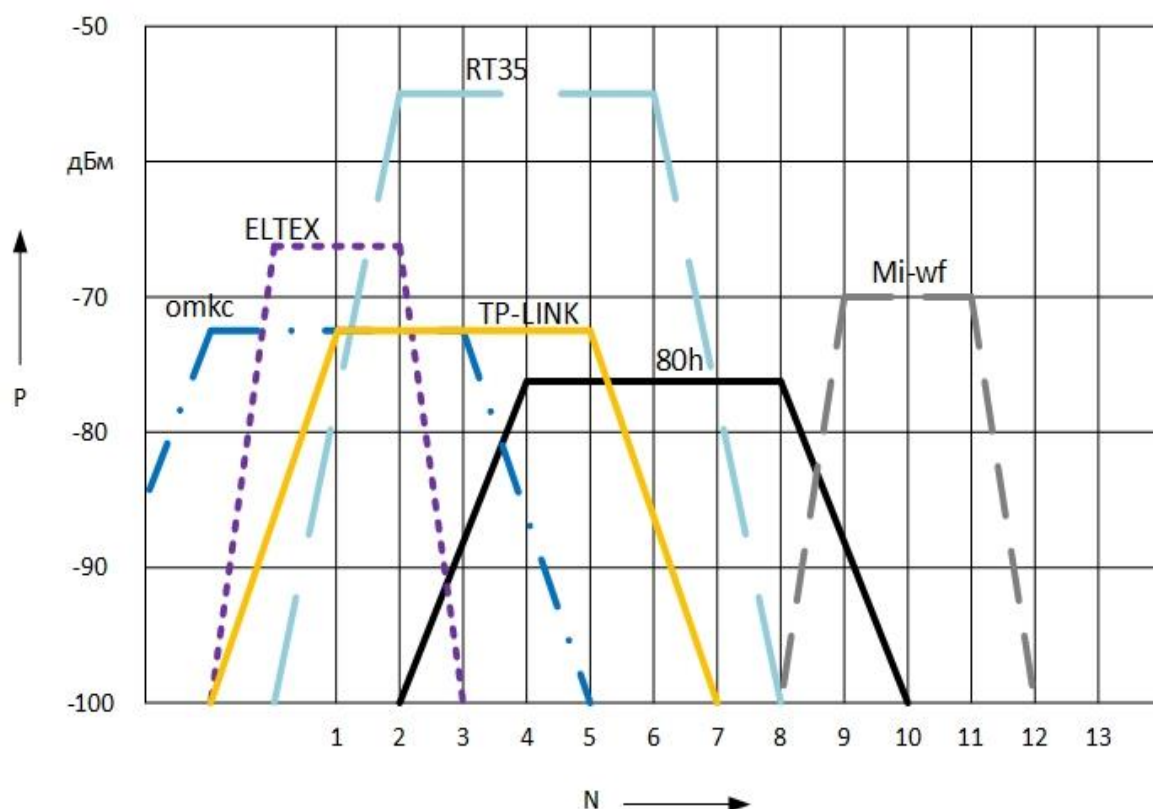


Рисунок 3 – Результаты измерений в точке 6

Результаты измерений мощности сигнала в контрольных точках приведены в таблице 1.

Таблица 1

Результаты измерений

Точки измерений	Мощность сигнала, дБм
Точка 1	-27
Точка 2	-48
Точка 3	-52
Точка 4	-62
Точка 5	-66
Точка 6	-76

Для оценки влияния были измерены не только мощности сигнала, но и скорости соединения в контрольных точках. Так, скорость в точке 1, в непосредственной близости к роутеру, составляет 40 Мбит/с для входящего

потока и 46,4 Мбит/с – для исходящего. Скорость в самой дальней точке 6 составляет 381 кбит/с для входящего потока и 1,2 Мбит/с – для исходящего. Кроме того, в отдельные моменты времени в точках 5 и 6 наблюдалась полная потеря сигнала. Все это свидетельствует о том, что при увеличении расстояния, возникновении препятствий и перекрытии спектра беспроводной сети другими сетями падает не только мощность сигнала, но и скорость соединения.

Для оценки влияния сетей Wi-Fi на организм человека был произведен расчет плотности потока энергии (ППЭ) поля, создаваемого антеннами роутеров. Расчетные значения оказались значительно меньше гигиенических норм [3, 4]. Однако, в долгосрочной перспективе эффекты излучений могут накапливаться в организме человека и приводить к ухудшению работы систем его организма. Поэтому имеет смысл придерживаться общих рекомендаций по использованию беспроводных сетей: выбирать точку доступа с минимально возможной мощностью работы; при длительной работе с Интернетом по возможности использовать проводную сеть; выключать точку доступа на ночь или на время, когда нет необходимости в использовании Интернета; не держать устройство, принимающее сигнал, например, ноутбук, на коленях.

Список литературы

1. Основы электромагнитной совместимости / под ред. Р. Н. Карякина. – Барнаул, 2007. – 480 с. – Текст : непосредственный.
2. Викулов, А. С. Анализ основных видов помех в задаче планирования сетей Wi-Fi с высокой плотностью пользователей / А. С. Викулов, А. И. Парамонов. – Текст : непосредственный. // Информационные технологии и телекоммуникации. – 2018. – Т. 6. – № 1. – С. 21–31.
3. СанПиН 2.1.8/2.2.4.1383–03. Гигиенические требования к размещению и эксплуатации передающих радиотехнических объектов : утверждено главным государственным санитарным врачом Российской Федерации 9 июня 2003 г. : документ с изменениями, внесенными постановлением главного государственного санитарного врача Российской Федерации от 19 декабря 2007 г. №91– Текст : непосредственный.
4. СанПиН 2.1.8/2.2.4.1190–03. Гигиенические требования к размещению и эксплуатации средств сухопутной подвижной радиосвязи : утверждено главным государственным санитарным врачом Российской Федерации 30 января 2003 г. : зарегистрировано в Минюсте РФ 26 марта 2003 г. : регистрационный № 4329 – Текст : непосредственный.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Авдеева Ксения Васильевна

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644000,

Российская Федерация.

Кандидат технических наук, доцент,

доцент кафедры «Телекоммуникационные, радиотехнические системы и сети» ОмГУПС.

Тел.: +7 (3812) 31-06-94.

E-mail: avdeeva_kv@mail.ru.

Демух Екатерина Витальевна

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644000,

Российская Федерация.

Выпускница кафедры

«Телекоммуникационные, радиотехнические системы и сети» ОмГУПС.

Тел.: +7 (3812) 31-06-94.

E-mail: katuffka.com@gmail.com.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Avdeeva Ksenia Vasilievna

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx av.m, Omsk, 644000,

the Russian Federation.

Candidate of technical sciences, associate professor of the department

«Telecommunication, radiotechnical systems and networks» OSTU.

Phone: +7 (3812) 31-06-94.

E-mail: avdeeva-kv@yandex.ru.

Demukh Ekaterina Vitalievna

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx av.m, Omsk, 644000,

the Russian Federation.

Graduate of the department

«Telecommunication, radiotechnical systems and networks» OSTU.

Phone: +7 (3812) 31-06-94.

E-mail: katuffka.com@gmail.com.

УДК 681.2.084; 615.471

А. А. Кабанов, Г. В. Никонова, Л. В. Щапова

Омский государственный технический университет (ОмГТУ), г. Омск, Российская Федерация

ИССЛЕДОВАНИЯ ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ СИГНАЛОВ УПРАВЛЕНИЯ АНТРОПОМОРФНЫМИ ПРОТЕЗАМИ

В работе представлены и описаны базовые методы и подходы построения системы сбора и обработки биофизических сигналов для управления антропоморфными протезами. В ходе работы осуществлён анализ сигналов электромиографии и рассмотрены современные решения, реализующие решение поставленной цели. Разработаны структурные и электрические схемы обработки и фильтрации биофизических сигналов, а также рассчитаны необходимые фильтры. Итогом работы является модуль регистрации биофизических сигналов, способный определить наличие мышечных сокращений для выработки адекватных управляющих воздействий. Проведено исследование модуля в

сочетании с цифровой системой фильтрации и дальнейшей обработкой в среде разработки систем измерения NI LabVIEW.

Ключевые слова – система сбора и обработки, сигнал управления, мышца, электромиография, шумы, фильтр.

Artemii A. Kabanov, Galina V. Nikonova, Liia V. Shchapova

Omsk State Technical University (OmSTU), Omsk, the Russian Federation

RESEARCH TO IDENTIFY CONTROL SIGNALS FOR ANTHROPOMORPHIC PROSTHESES

The paper presents and describes the basic methods and approaches to building a system for collecting and processing biophysical signals for managing anthropomorphic prostheses. In the course of the work, the analysis of electromyography signals was carried out and modern solutions were considered that implement the solution to the set goal. Structural and electrical schemes for processing and filtering biophysical signals have been developed, and the necessary filters have been calculated. The result of the work is a module for the registration of biophysical signals, capable of determining the presence of muscle contractions for the development of adequate control actions. The study of the module in combination with a digital filtering system and further processing in the development environment of NI LabVIEW measurement systems was carried out.

Keywords: collection and processing system, control signal, muscle, electromyography, noise, filter.

I. ВВЕДЕНИЕ

Исследование рук человека является сложной задачей, на тему которой уже написано немало трудов [1-3]. Используя методы и механизмы, данные нам природой тысячелетия назад, дополняя их современными технологиями и исследованиями, появляется возможность воссоздать кисть руки, возможности которой на сегодняшний день незначительно уступают биологическому аналогу. Консолидация знаний в областях техники и биологии позволяет создавать устройства, бионические протезы, которые меняют грань между ограничениями и возможностями, между пределом человека и человеческим потенциалом.

Манипулятор – механизм для управления пространственным положением объектов труда, которые всё чаще используются в медицинской

технике и являются одной из основных тем бионики. Основу манипуляторов составляют пространственные механизмы со многими степенями свободы.

Современные прототипы и рабочие модели повторяют большинство действий человека, а именно захват, удержание, но более сложные действия, манипуляция мелкими предметами, могут воспроизвести немногие прототипы. Такие манипуляторы находят наибольшее применение в качестве протезов руки – от самых простых - механических, которые выполняют работу за счёт сгибания культи [4], до более сложных – электронных, которые получают сигнал с остатков мышц (методы электромиографии) или непосредственно от вживлённых электродов в нервных окончаниях.

II. Постановка задачи

Электрические потенциалы возникают во всех мышцах и нервах живого организма. Они могут быть обнаружены в любой живой клетке или органе [5]. Элементарной биологической ячейкой, производящей электрическую энергию, является отдельная клетка. Разность потенциалов между возбужденной и невозбужденной частями клетки возникает таким образом, что потенциал возбужденной части всегда меньше потенциала невозбужденной части. Также возникает биопотенциал между различными участками тканей. Эта разность электрических потенциалов в одних случаях имеет главное, а в других – побочное значение для жизнедеятельности организма и является сопутствующим фактором его деятельности.

Биопотенциалы не являются постоянными величинами, а изменяются в зависимости от физико-химического состояния клетки или ткани, концентрации и состава, соприкасающихся с ними солевых растворах.

С помощью осциллограмм биопотенциалов исследуют мышечную или нервную ткань. Очевидно, что при этом разность потенциалов определяется совокупностью потенциалов отдельных клеток. Живые клетки можно в грубом приближении рассматривать как электрические генераторы. Тогда общая разность потенциалов, а также сопротивление ткани будут, очевидно, зависеть от характера соединения клеток. В отдельных случаях клетки соединены как бы последовательно друг с другом. Образующая в этом случае ЭДС может достигать нескольких сотен милливольт.

Следует отметить, что напряжение, создаваемое мышечной или нервной тканью, обычно значительно меньше напряжения, создаваемого отдельным

волокном, вследствие шунтирующего действия различных внеклеточных жидкостей, соединительных оболочек и т. д.

III. Решение

Функционирование современных антропоморфных средств (бионических протезов) находится в неразрывной связи с реализацией неинвазивных методов восприятия электрофизиологических сигналов, основанной на применении проводящих миоэлектрических контактов, обеспечивающих динамическое восприятие, как функцию мышечной активности. Количество мест, пригодных для адекватного размещения миоэлектрических контактов, ограничено совокупностью требований к информационной насыщенности получаемой информации и общими анатомическими особенностями строения человеческого тела. Как правило, в большинстве типичных случаев количество функциональных зон размещения контактов не превышает четырех. Последний аспект является одним из доминирующих факторов, ограничивающих функциональные возможности системы. При этом возможна реализация выполнения ограниченного числа примитивных односложных действий, связанных с захватом, удержанием и перемещением предметов с простой геометрией.

Выполнение более сложных действий предполагает вовлечение в работу двух и более кинематических групп с несколькими последовательными звеньями, что вызывает необходимость соразмерного увеличения числа электродов как источников электрофизиологической информации. Следует отметить необходимость коррекции методов восприятия электрофизиологических сигналов, что объясняется наличием статистической неоднородности электрофизиологического сигнала, вызванной в большинстве значимых случаев аддитивными шумами и помехами промышленной этиологии.

Получение сигнала электромиографии происходит в условиях большого количества помех и шумов, которые в значительной степени влияют на качество сигнала. Также сигнала электромиографии относится к классу сильно шумящих и маломощных сигналов, а, следовательно, для его обработки необходима схема предварительного усиления. Для решения задач, связанных с со сбором и предобработкой, предлагается следующая структурная схема.

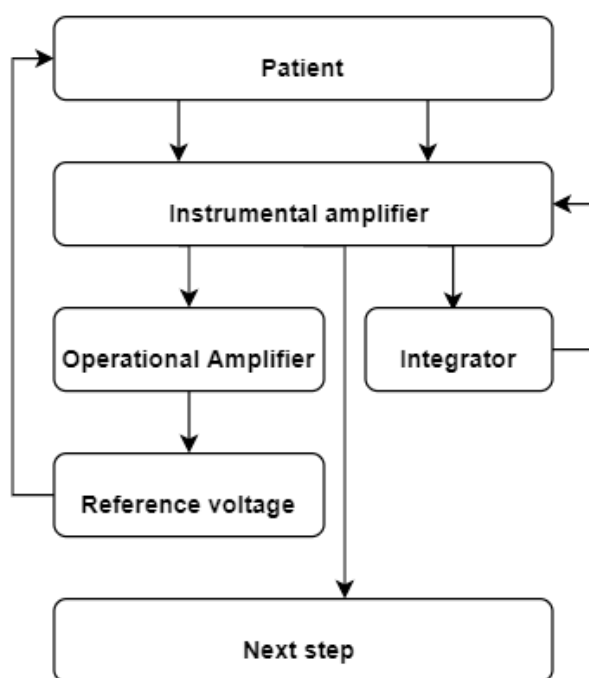


Рисунок 1 – Структурная схема системы сбора биофизических сигналов

В данной схеме для получения сигнала ЭМГ к пациенту подключены 3 контакта из материала *AgAgCl*. Электроды крепятся к телу человека посредством клеящейся основы с высокой степенью адгезии для предотвращения подвижности электродов. На поверхность самого электрода нанесен токопроводящий гель для улучшения качества получаемого сигнала. Сигнал от пациента поступает в инструментальный усилитель в дифференциальном включении. Инструментальный усилитель на ОУ *INA333* от компании *Texas Instruments* в дифференциальном включении является одним из важнейших компонентов схемы ЭМГ, вычитающий сигналы и усиливающий их разницу. Коэффициент усиления устанавливается двумя резисторами между выводами *Rg*. Формула для расчета коэффициента усиления представлена ниже.

$$G=1+ ((100 \text{ кОм})/R_g)$$

Для получения коэффициента усиления предлагается использовать резисторы номиналом *50 Ом*, а, следовательно,

$$G=1+ ((100 \text{ кОм})/(50 \text{ кОм}+50 \text{ кОм}))=2 \text{ В/В}$$

Такое невысокое соотношение было выбрано в связи с тем, что чем выше *G*, тем меньше *CMRR* схемы и, следовательно, качество сигнала оставляет желать лучшего.

Между выходом усилителя *INA333* и его опорным выходом имеется обратная связь – интегратор. Интегратор на ОУ *ISL28433* от компании *Intersil*

Corporation/Renesas необходим для того что бы удалить напряжение смещения постоянной составляющей на выходе усилителя, и установить постоянную составляющую равную опорному (референсному) напряжению 2.5 В.

Одним из существенных вопросов, связанных с получением сигнала ЭМГ является сигнал шума линии электропередач. Тело человека работает как антенна, принимая различные виды излучений от разных источников, амплитуда шума линии электропередач может быть на три порядка выше, чем амплитуда ЭМГ сигнала, и этот шум полностью перекрывает информацию, содержащуюся в сигнале.

Предлагается метод, основанный на *RLD (Right Leg Drive)* – схеме используемой при анализе ЭКГ. *RLD* – схема минимизирует напряжение в общем режиме и напряжение от пациента по отношению к дифференциальному усилителю, и таким образом повышает *CMRR*.

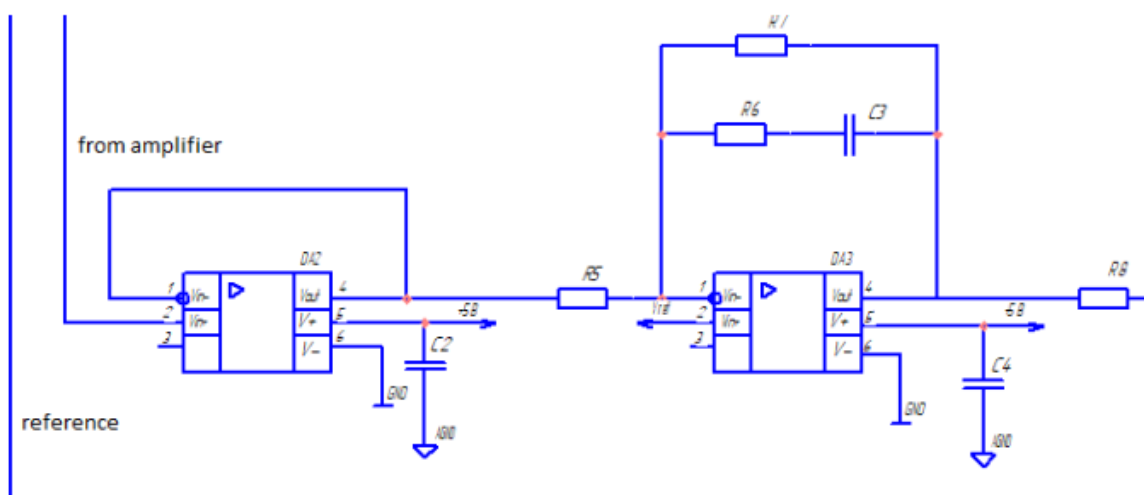


Рисунок 2 – Схема *RLD*

Соединителем средней точки между резисторами R_g и телом пациента является операционный усилитель. Подача обратного сигнала в общем режиме исключает сигналы шума линии электропередач. Не инвертирующий вход ОУ должен быть подключен к средней точке. Электрод *RLD* является виртуальной землей для всей системы и должен быть расположен на электрически нейтральной ткани тела человека.

Схема *RLD* представлена на рисунке 2, местом крепления этого электрода является локоть руки, на которой закреплены два других (сигнальных) электрода. Локоть выбран из-за того, что на нем отсутствуют мышечные ткани,

а, следовательно, он является электрически нейтральным (или более нейтральным, чем мышцы человека).

Первая часть схемы представляет собой буферный высокоимпедансный усилитель на ОУ *ISL28433* от компании *Intersil Corporation/Renesas*, потому что инструментальные усилители чувствительны к паразитным емкостям на контактах резисторов.

Вторая часть схемы предназначена для улучшения *CMRR*, напряжение общего режима усиливается для подачи обратно в тело человека, ОУ используемый в этой части, так является *ISL28433*, выход ОУ подключен к третьему электроду, расположенному на локте пациента.

Во время получения и регистрации биофизических сигналов, несущих полезную для данного вида измерений информацию, в совокупности с основным сигналом, также регистрируются различные шумы и помехи. К помехам относятся некоторые искажения полезных сигналов, в зависимости от влияния разных дестабилизирующих факторов на процессы измерений, такие как, помехи от работающего промышленного оборудования, влияние грозовых разрядов и другие.

Для того что бы избавиться от артефактов движения и исправить нестабильность ЭМГ сигнала необходимо использовать фильтр верхних частот, на частоте среза равной 20 Гц (так как наиболее неустойчивая полоса находится в диапазоне от 0 Гц до 20 Гц). Наиболее распространённая верхняя частота является 500 Гц [7].

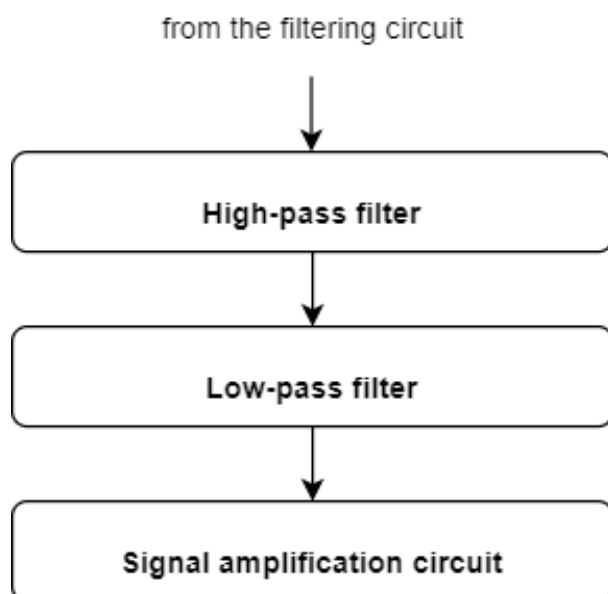


Рисунок 3 – Структурная схема фильтрации и усиления сигнала

Амплитуда ЭМГ сигнала находится в диапазоне от 0 до 10 мВ (в пиковых значениях) или от 0 до 1.5 мВ (среднеквадратичное значение). Для того что бы сигнал мог приниматься платой сбора данных и был информативным его необходимо усиливать.

Сигнал с выхода схемы усиления идет в плату сбора данных NI USB 6009. Устройство сбора имеет встроенный АЦП, не требует дополнительного питания и подключается к компьютеру по USB [8]. Для сбора сигналов и цифровой обработки сигнала с DAQ устройства построен виртуальный прибор [9]. Программно-аппаратная реализация обработки сигналов и их последующей фильтрации на основе вейвлет преобразования выполнена в LabView-2019.

VI. Выводы и заключение

В результате работы была разработана система сбора и обработки биофизических сигналов. Были разработаны схемы структурные и электрические схемы измерения биофизических сигналов. Также были разработаны схемы аналоговой фильтрации сигналов электромиографии. Разработанные фильтры позволяют избавиться от помех, вызванных артефактами движений и собственной нестабильностью сигнала. В сочетании с цифровой системой фильтрации, основанной на дискретном вейвлет преобразовании и дальнейшей обработкой можно адекватно определить наличие мышечных сокращений. Полученная система является малогабаритной и в сочетании с программной частью обработки сигналов позволит определять ключевые сигнальные паттерны и управлять антропоморфными протезами.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-38-90162.

Список литературы

1. Гладышев, А. Р. Разработка, реализация и исследование анализатора мышечной активности для задачи управления бионическим протезом кисти руки / А. Р. Гладышев, А. В. Гладышева. – Текст : непосредственный // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2017. – №5. – С. 31–32.
2. Методика количественной оценки степени произвольности движений руки / Ю. Г. Бурыкин, М. Я. Брагинский, В. И. Корчин, С. А. Третьяков. – Текст : непосредственный // Российский журнал биомеханики. – 2017. – №3. – С. 271–286.
3. 3D Modelling of Human Hand with Motion Constraints / N. Parashar [et al.]. – Text: direct // 2018 International Conference on Computational Techniques, Electronics

and Mechanical Systems (STEMS) : digest / Institute of Electrical and Electronics Engineers. – USA, 2018. – С. 124–128.

4. Иванова, Л. Н. Улучшение функциональных и эксплуатационных характеристик протезов руки / Л. Н. Иванова. – Текст : непосредственный // Молодежь и современные информационные технологии : XV международная научно-практическая конференция / Томский политехнический университет. – Томск, 2017. – С. 303–304.

5. Команцев, В. Н. Методические основы клинической электромиографии: руководство для врачей / В. Н. Команцев. – Санкт-Петербург : Лань, 2006. – 362 с. – Текст : непосредственный.

6. Зверев, А. А. Физиология мышц / А. А. Зверев, Т. А. Аникина, А. В. Крылова. – Казань : Казанский федеральный ун-т, 2016. – 41 с. – Текст : непосредственный.

7. Kabanov, A. A. Development of Analog Filtering Circuit for Electromyography Signals / A. A. Kabanov, G. V. Nikonova. – Text: direct // Ural Symposium on Biomedical Engineering, Radioelectronics and Information Technology : digest / Ural Federal University. – Yekaterinburg, 2019 – PP 55–58. – DOI: 10.1109/USBREIT.2019.8736559.

8. Esimhanova, A. M. Virtual Device For Processing The Signals From MEMS Pressure Sensors / A. M. Esimhanova, G. V. Nikonova. – Text: direct // XXI International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices : digest / Novosibirsk State Technical University. – Novosibirsk, 2018. – PP. 676–680. – DOI:10.1109/EDM.2018.8434971. EID: 2-s2.0-85052365781.

9. Kehtarnavaz, N. Digital Signal Processing System-Level Design Using LabVIEW / N. Kehtarnavaz, N. Kim. – USA : Elsevier, 2005– 304 p. – Text: direct.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Кабанов Артемий Андреевич

Омский государственный технический университет (ОмГТУ).

Мира пр., д. 11, г. Омск, 644050,

Российская Федерация.

Ассистент кафедры «Автоматизированные системы обработки информации и управления» ОмГТУ.

Тел.: +7 (3812) 65-86-31.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Kabanov Artemii Andreevich

Omsk State Technical University (OmSTU).

11, Mira av., Omsk, 644050,

the Russian Federation.

Assistant of the Department "Automated information processing and control systems" OmSTU.

Phone :+7 (3812) 65-86-31.

E-mail: stiff5master@gmail.com.

E-mail: stiff5master@gmail.com.

Никонова Галина Владимировна

Омский государственный технический университет (ОмГТУ).

Мира пр., д. 11, г. Омск, 644050,

Российская Федерация.

К.т.н., доцент кафедры

«Автоматизированные системы обработки информации и управления» ОмГТУ.

Тел.: +7 (3812) 65-86-31.

E-mail: ngvlad@mail.ru.

Nikonova Galina Vladimirovna

Omsk State Technical University (OmSTU).

11, Mira av., Omsk, 644050,

the Russian Federation.

Ph.D., Associate Professor of the Department

"Automated information processing and control systems" OmSTU.

Phone: +7 (3812) 65-86-31.

E-mail: ngvlad@mail.ru.

Щапова Лия Владимировна

Омский государственный технический университет (ОмГТУ).

Мира пр., д. 11, г. Омск, 644050,

Российская Федерация.

Ассистент кафедры «Автоматизированные системы обработки информации и управления» ОмГТУ.

Тел.: +7 (3812) 65-86-31.

E-mail: mail.ru.lil@mail.ru.

Shchapova Liia Vladimirovna

Omsk State Technical University (OmSTU).

11, Mira av., Omsk, 644050,

the Russian Federation.

Assistant of the Department "Automated information processing and control systems" OmSTU.

Phone : +7 (3812) 65-86-31.

E-mail: mail.ru.lil@mail.ru.

УДК 535.36

С. Н. Смердин, Г. Б. Тодер

Омский Государственный университет путей сообщения (ОмГУПС),

г. Омск, Российская Федерация

АНАЛИЗ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ИНТЕНСИВНОСТИ В СПЕКТРЕ СВЕТА, РАССЕЯННОГО В ГЛИЦЕРИНЕ

В работе описываются механизмы светорассеяния в сильновязких жидкостях. Сравняются экспериментальная и теоретическая температурные зависимости отношения Ландау-Плачека в области низких температур для глицерина.

Ключевые слова: молекулярное рассеяние света, отношение Ландау-Плачека, сильновязкая жидкость.

THE ANALYSIS OF INTENSITY DISTRIBUTION IN THE SPECTRUM OF LIGHT SCATTERING IN GLYCERIN

Light scattering mechanisms in high viscosity liquids are described in work. Experimental and theoretical temperature dependences of the Landau-Plachek relation are compared for glycerin in the low temperature area.

Keywords: molecular scattering of light, Landau-Plachek relation, high viscosity liquid.

На современном железнодорожном транспорте применяются и перевозятся различные жидкости, например, синтетические масла, различные сорта нефти, другие одно- и многокомпонентные жидкости органического происхождения. Охлаждение этих жидкостей до низких температур сопровождается процессом стеклования, сопряженным с переходом от режима независимых колебаний отдельных молекул к режиму кооперативного поведения – процессом стеклования. Неравновесный характер [1] стеклования служит причиной возникновения случайных неоднородностей различного происхождения, обладающих различной локальной упорядоченностью структуры, например, кластеров, скачков плотности, кристаллических зародышей, доменов [2, 3]. Физико-химические свойства жидкости (например, скорость звука в различных диапазонах частот, коэффициент поглощения электромагнитных волн, показатель преломления, диэлектрическая проницаемость, вязкость, коэффициент затухания акустических колебаний и др.) претерпевают качественные изменения, так как жидкость становится сильновязкой. Поэтому изучение свойств вязкой жидкости с целью осуществления прогнозирования и контроля поведения используемых и перевозимых жидкостей при низких температурах является актуальной задачей и требует отдельного внимания.

В настоящее время одним из ведущих экспериментальных методов исследования свойств жидкостей является получение и анализ низкочастотного молекулярного (рэлеевского) спектра рассеянного в них света. До появления мощных лазерных источников электромагнитных волн наблюдалась лишь одна (центральная упругая) составляющая спектра низкочастотного рассеяния. С

появлением лазеров стали видимы симметрично расположенные боковые составляющие: бриллюэновский дублет, возникающий вследствие рассеяния света на акустических волнах – рассеяния Мандельштама-Бриллюэна [4, 5], и находящийся значительно дальше от центра дублет Рамана. Без учета последнего спектр рэлеевского молекулярного рассеяния имеет структуру триплета, показанную на рисунке 1.

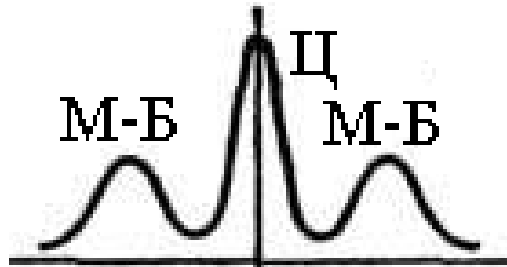


Рисунок 1 – Трехкомпонентная структура спектра рэлеевского рассеяния:

Ц – центральная (упругая) составляющая; М-Б – бриллюэновские составляющие

Рэлеевское рассеяние обусловлено неоднородностью пространственных свойств жидкости, а именно, различием показателя преломления соседних микрообъемов, размеры которых сравнимы с длиной световой волны. Пространственные флуктуации показателя преломления описываются среднеквадратичным отклонением $\langle \delta n^2 \rangle$ от его среднего значения внутри рассматриваемого микрообъема жидкости. Кинетика возникновения и рассасывания флуктуаций показателя преломления определяется четырьмя процессами: 1) диффузией; 2) распространением быстрых фононов; 3) теплопроводностью; 4) структурной релаксацией [2, 8]. Первый процесс определяет кинетику флуктуаций концентрации, а остальные три – кинетику флуктуаций плотности. Для однокомпонентной (идеальной, однородной, без примесей) жидкости флуктуаций концентрации нет. Следовательно, кинетика флуктуаций в однокомпонентной жидкости определяется флуктуацией плотности $\langle \delta \rho^2 \rangle$, которая разбивается на три компоненты:

$$\langle \delta \rho^2 \rangle = \langle \delta \rho^2 \rangle_{MB} + \langle \delta \rho^2 \rangle_T + \langle \delta \rho^2 \rangle_\xi. \quad (1)$$

Происхождение первого слагаемого в правой части выражения (1) $\langle \delta \rho^2 \rangle_{MB}$ связано с быстропротекающим процессом поглощения и излучения фононов высоких энергий – адиабатическими волнами давления. Это слагаемое отвечает за мандельштам-бриллюэновские компоненты спектра. Второй член

$\langle \delta \rho^2 \rangle_T$ связан с медленными тепловыми волнами (изобарическими волнами энтропии). Он за счет теплопроводности дает вклад в центральную компоненту спектра рассеяния, расширяя ее. Третий член $\langle \delta \rho^2 \rangle_\xi$ связан со структурной релаксацией и описывается релаксационной теорией Мандельштама-Леонтовича [4] как изменение внутреннего параметра порядка (структурного параметра, см. также [2, 3, 6]). Это слагаемое также дает вклад в уширение центральной составляющей. Однако при низких температурах характерные времена перестройки, связанной с упорядочением структуры, значительно больше времен релаксации процессов, генерирующих появление двух первых слагаемых: процессы структурной релаксации в сильновязкой жидкости существенно замедляются, так что связанные с этими процессами вклады в центральную часть спектра становятся очень узкими, поэтому рассеянный свет по спектральному составу практически совпадает с падающим. При дальнейшем охлаждении сильновязкая жидкость постепенно переходит в стеклообразное состояние с «замороженными» флуктуациями плотности (кластерами и т. п. структурами). Благодаря сильному различию характерных времен релаксации возмущений частиц, вызванные этими тремя процессами, не влияют друг на друга [7] и могут быть рассчитаны независимо друг от друга.

При рассеянии света в вязких жидкостях флуктуации плотности, связанные с неоднородностью структурного параметра обычно велики по сравнению с мандельштам-бриллюэновским вкладом и вкладом теплопроводности, поэтому весь рассеянный свет сосредоточен в неуширенной центральной компоненте спектра. Следовательно, чувствительные к локальным изменениям неоднородности среды характеристики центральной линии могут быть использованы для исследования неоднородности, а нечувствительные и, по этой причине, такие же, как в однородной среде, характеристики компонент Мандельштама-Бриллюэна, могут применяться в качестве опорных в сравнительных расчетах.

На практике оценка светорассеяния обычно производится через отношение Ландау-Плачека – отношение интегральной интенсивности центральной компоненты спектра к сумме интегральных интенсивностей боковых компонент:

$$R_{LP} = \frac{I_0}{2I_{MB}}. \quad (2)$$

Как правило, рассеянный свет исследуют, располагая регистрирующее устройство под углом 90 градусов к падающему свету. Наиболее часто основой экспериментальной установки служит интерферометр Фабри-Перо [3]. По экспериментальным данным строят графики зависимости интенсивности рассеянного света от частоты (длины волны), получают спектры вида, изображенного на рисунке 1, вычисляют интегральные интенсивности как площади компонент спектра и находят экспериментальное значение соотношения Ландау-Плачека. Затем проводят теоретические оценки этого отношения, сравнивают их с найденным экспериментально.

В настоящее время основой для теоретических исследований рассеяния света в жидкостях и газах служат результаты работ [4, 5]. Без учета дисперсии $R_{LP} = \gamma - 1$, где γ – показатель адиабаты среды. В соответствии с теорией рассеяния Фабелинского [5], построенной с учетом дисперсии для однородной жидкости, значение параметра R_{LP} зависит от свойств исследуемой среды и линейно зависит от температуры T :

$$R_{LP} = \frac{k\sigma^2 T \nu_\infty^2}{c_p}, \quad (3)$$

где σ – коэффициент теплового расширения; c_p – удельная теплоемкость; ρ – плотность жидкости; ν_∞ – (продольная) скорость гиперзвуковой волны, при распространении которой структурная перестройка среды не успевает произойти. При выводе формуле (3) вклады от медленно и быстро меняющихся флуктуаций были разделены; $k = 1,5 \pm 0,5$ – коэффициент, учитывающий такое разделение [5].

В работе [8] теория Фабелинского была расширена на неоднородности, связанные со структурной релаксацией. Пусть ν_0 – скорость низкочастотных распространения звуковых волн (равновесная скорость ультразвука), оказывающих влияние на медленно меняющиеся флуктуации. Тогда записанное в работе [8] выражение для отношения Ландау-Плачека через адиабатическую $\beta_\infty = (\rho \nu_\infty^2)^{-1}$ и изотермическую $\beta_0 = (\rho \nu_0^2)^{-1}$ сжимаемости может быть записано в виде

$$R_{LP} = k \left(\frac{\sigma^2 T \nu_\infty^2}{c_p} + \left(\frac{\beta_0 - \beta_\infty}{\beta_\infty} \right) \right). \quad (4)$$

И далее может быть представлено в виде:

$$R_{LP} = k \left(\frac{\sigma^2 T v_{\infty}^2}{c_p} + \left(\frac{v_{\infty}^2}{v_0^2} - 1 \right) \right). \quad (5)$$

В работе [3] был дан обзор результатов экспериментальных исследований тонкой структуры рэлеевского рассеяния в ряде стеклующихся жидкостей, представлен теоретический расчет зависимости параметра Ландау-Плачека от температуры по формуле (3), дано сравнение теоретической и экспериментальной зависимостей, которые оказались сильно расходящимися в области низких температур (рисунок 2). По нашему мнению это расхождение обусловлено отсутствием учета влияния неоднородностей, характерных для структурной релаксации среды при низких температурах. Поэтому строить температурную зависимость необходимо, опираясь на формулы (4) или (5). Вычисления, проведенные по формуле (5) с коэффициентом $k = 2,2$ при подстановке значений скоростей v_0 и v_{∞} для глицерина, взятых из работ [3, 5], позволили авторам настоящей работы теоретически получить температурную зависимость $R_{LP}(T)$, которая в области низких температур как качественно, так и количественно согласуется с результатами экспериментов значительно лучше зависимости, полученной в работе [3]. Результаты расчетов представлены в таблице 1.

Таблица 1

Результаты расчетов отношения Ландау- Плачека для глицерина

T	425	400	380	360	340	330	320	310	300	280
R_{LP}	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,1	1,5	2,6	3,4	3,9

На рисунке 2 показаны три зависимости коэффициента Ландау – Плачека для глицерина от температуры: 1 – экспериментальная; 2 – теоретическая, в соответствии с оценкой В. А. Поповой [3], рассчитанная по формуле (3); 3 – теоретическая, полученная по расчетам авторов настоящей работы, выполненным по формуле (5). В области высоких температур зависимости 2 и 3 совпадают с экспериментальной. В области низких температур: 1) зависимость 3 дает значения коэффициента Ландау-Плачека более близкие к экспериментальным, чем зависимость 2; зависимость 2 по характеру отличается от экспериментальной (расходится с ней), тогда как зависимость 3 по характеру подобна экспериментальной.

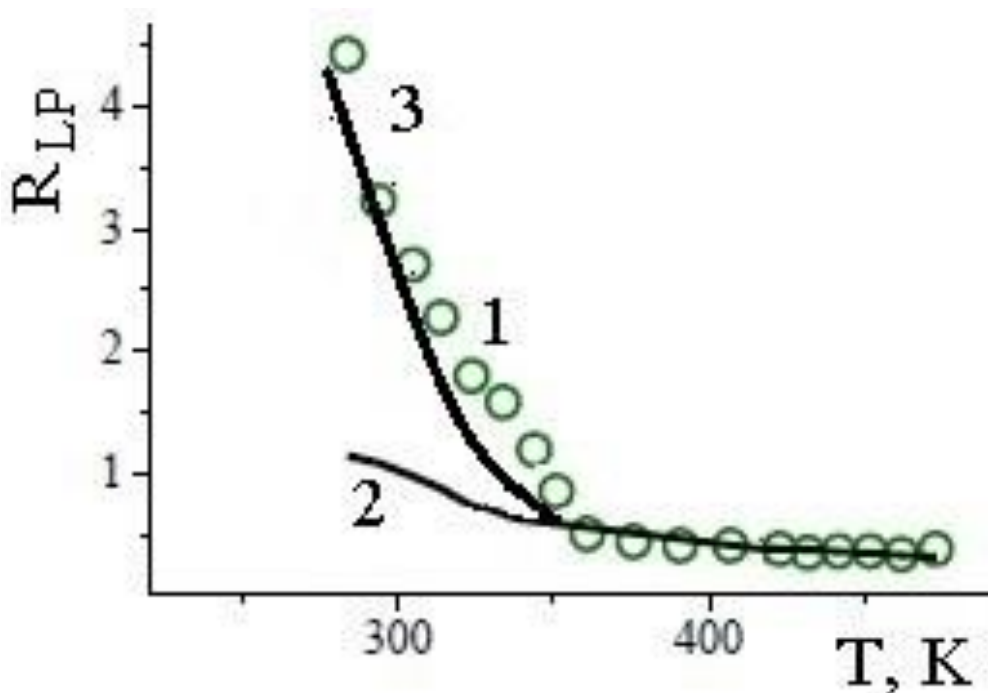


Рисунок 2 – Экспериментальная (1) и теоретические (2, 3) зависимости соотношения Ландау-Плачека от температуры

Таким образом, теоретический анализ распределения интенсивности в спектре света, рассеянного в сильновязких жидкостях, качественно объясняет экспериментальные данные, полученные интерферометром высокой разрешающей силы. Учет неоднородностей плотности и, следовательно, показателя преломления, связанных со структурной релаксацией стеклующейся жидкости в расчетах отношения Ландау – Плачека приводит к теоретической зависимости, качественно хорошо согласующейся с экспериментальной. Однако, численные значения параметра R_{LP} немного меньше значений, полученных в результате обработки данных эксперимента, и этот факт дает возможность исследователям развивать теорию так, чтобы достичь совпадения численных теоретических расчетов с экспериментальными.

Список литературы

10. Николис, Г. Познание сложного / Г. Николис, И. Пригожин. – Москва : Мир, 1990. – 358 с. – Текст : непосредственный.
11. Мандельштам, Л. И. К теории поглощения звука в жидкостях / Л. И. Мандельштам, М. А. Леонтович. – Текст : непосредственный // ЖЭТФ. – 1937. – Т. 7. – № 3. – С. 438–449.

12. Фабелинский, И. Л. Молекулярное рассеяние света / И. Л. Фабелинский. – Москва : Наука, 1965. – 511 с. – Текст : непосредственный.

13. Tanaka, H. Relationship among glass-forming ability, fragility, and short-range bond ordering of liquids / H. Tanaka. – Text: direct // Journal of Non-Crystalline Solids. – 2005. – V. 351. – № 8-9. – P. 678–690.

14. Тихонов, А. Н. Системы дифференциальных уравнений, содержащие малые параметры при производных / А. Н. Тихонов. – Текст : непосредственный // Матем. сб. – 1952. – Т. 31 (73). – № 3. – С. 575–586.

15. Романов, В. П. Влияние флуктуаций температуры и внутреннего параметра на рассеяние света в среде с одним релаксационным процессом / В. П. Романов, В. А. Соловьев, Л. С. Филатова. – Текст : непосредственный // Оптика и спектроскопия. – 1970. – Т. 30. – № 5. – С. 901–925.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Смердин Сергей Николаевич

Омский государственный университет
путей сообщения (ОмГУПС).

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

Кандидат физико-математических
наук, доцент кафедры «Физика и
химия» ОмГУПС.

Тел.: +7 (3812) 31-53-68.

E-mail: smerdin@mail.ru.

Тодер Георгий Борисович

Омский государственный университет
путей сообщения (ОмГУПС).

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

Кандидат физико-математических
наук, доцент кафедры «Физика и
химия» ОмГУПС.

Тел.: +7 (3812) 31-53-68.

E-mail: georgyt@mail.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Smerdin Sergei Nikolaevich

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Candidate of Physics-Mathematic Sciences,
Associate Professor of the Department of
«Physics and chemistry» OSTU.

Phone: +7 (3812) 31-53-68.

E-mail: smerdin@mail.ru.

Toder Georgy Borisovich

Omsk State Transport University (OSTU).

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

Candidate of Physics-Mathematic Sciences,
Associate Professor of the Department of
«Physics and chemistry» OSTU.

Phone: +7 (3812) 31-53-68.

E-mail: georgyt@mail.ru.

А. В. Пономарев, И. А. Горчаков, К. В. Богунов

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

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМОВ РАБОТЫ МАЛОМОЩНЫХ СОЛНЕЧНЫХ ПАНЕЛЕЙ

Статья посвящена исследованию режимов работы маломощных солнечных панелей. Исследуется эффективность применения трекеров для подобных панелей. Рассмотрены нагрузочные характеристики и выбраны оптимальные режимы работы маломощных солнечных панелей.

Ключевые слова. Солнечная энергия, мощность, трекер, эффективность, солнечные панели, маломощные

Anton V. Ponomarev, Ivan A. Gorchakov, Kirill V. Bogunov

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

INVESTIGATION OF LOW-POWERED SOLAR PANELS OPERATING MODES

The article is about studying low-powered solar panels operating modes. It examine efficiency of using solar trackers with such panels. Loading curves are presented and optimal operating modes for low-powered solar panels are reviewed.

Keywords: solar energy, power, tracker, efficiency, solar panel, low-powered.

Применение солнечной энергии в качестве альтернативного возобновляемого источника энергии является перспективным и актуальным вопросом, развитие которого способно оказать положительное влияние на экологию транспорта. В промышленных масштабах преобразование солнечной энергии в электрическую происходит на электростанциях, которые решают не только вопрос получения энергии, но и ее хранения. Это необходимо для обеспечения стабильной работы электрооборудования в темное время суток и пасмурные дни.

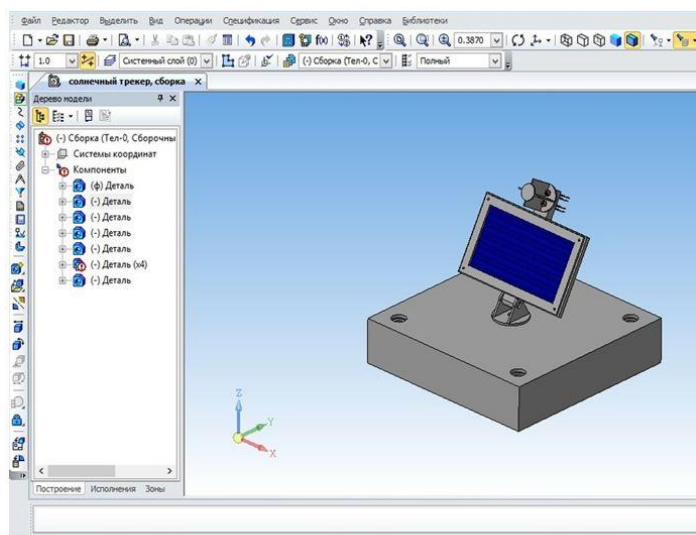
Небольшие маломощные солнечные панели могут применяться для

организации автономного питания электрооборудования с низким уровнем электропотребления. Это различные измерительные, передающие устройства, для которых важна мобильность и, как следствие, отсутствие привязки к стационарным источникам питания.

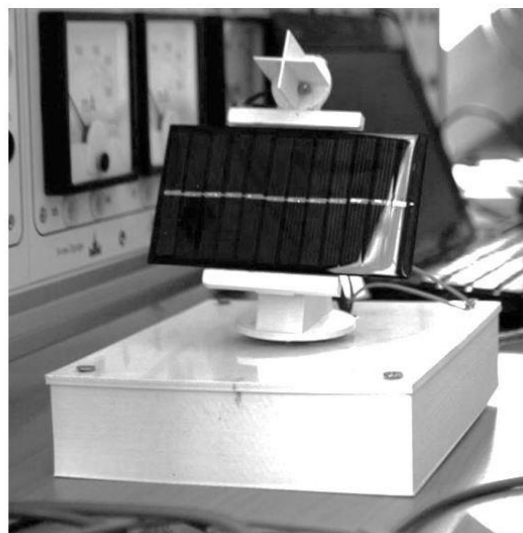
С целью повышения эффективности работы таких панелей часто предлагается использовать автоматический поворотный механизм, который будет ориентировать панель на максимально освещенное направление – так называемый, солнечный трекер. В связи с этим появляется ряд вопросов:

- насколько эффективно стационарное расположение солнечной панели?
- как объем вырабатываемой энергии зависит от внешних условий?
- насколько повысится эффективность выработки энергии, если панель будет непрерывно ориентироваться на солнце?

Для ответа на эти вопросы разработано устройство, представляющее собой вращающуюся стойку, на которую крепится солнечная панель номинальным напряжением $U_N = 5$ В и датчики освещенности. Стойка устанавливается с помощью сервопривода на пластиковый корпус, в котором размещается плата, управляющая режимом работы устройства. На этапе проектирования разработана 3D-модель устройства (рисунок 1, а), после чего физический макет корпуса (рисунок 1, б) изготовлен при помощи технологии 3D-печати в ЦМИТ «Разум».



а



б

Рисунок 1 – 3D-модель (а) и физическая реализация (б) солнечного трекера

Работа устройства контролируется микроконтроллером *ATmega328P*, расположенным на плате *Arduino Uno* [1]. Сверху панели расположены два

фоторезистора, сигнал с которых через делитель напряжения подается на аналоговые входы платы *A0* и *A1*. В зависимости от результата сравнения этих сигналов сервопривод поворачивается в направлении более освещенного участка. Графическая схема алгоритма работы микроконтроллера в режиме солнечного трекера представлена на рисунке 2.

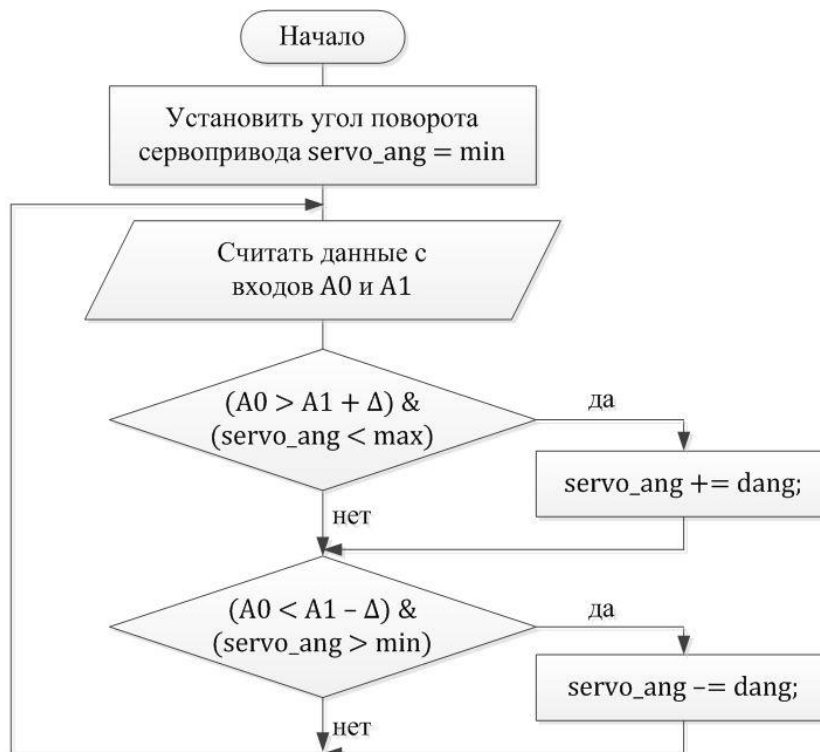


Рисунок 2 – ГСА работы микроконтроллера

Учитывая, что солнечный трекер, как правило, устанавливается на достаточном удалении от компьютера и должен обладать мобильностью, использование проводной связи является не оптимальным решением. В настоящей работе для организации беспроводной передачи данных с трекера на компьютер предложено использовать радиомодули *NFR24L01*, работающие в диапазоне частот 2.4 – 2.5 ГГц. Их основными преимуществами являются простота использования и надёжность работы.

В модулях радиосвязи *NRF24L01* используется технология *WLAN*, что обеспечивает передачу данных на расстояние до 100 метров в прямой видимости, а также на расстоянии около 30 метров в помещениях.

Для организации беспроводной передачи данных использовались две платы Arduino и два модуля *NFR24L01*. На рисунке 3 приведены схемы подключения передатчика на Arduino Uno (располагается на трекере) и приемника сигнала на Arduino Nano (подключается к ПК) [2, 3].

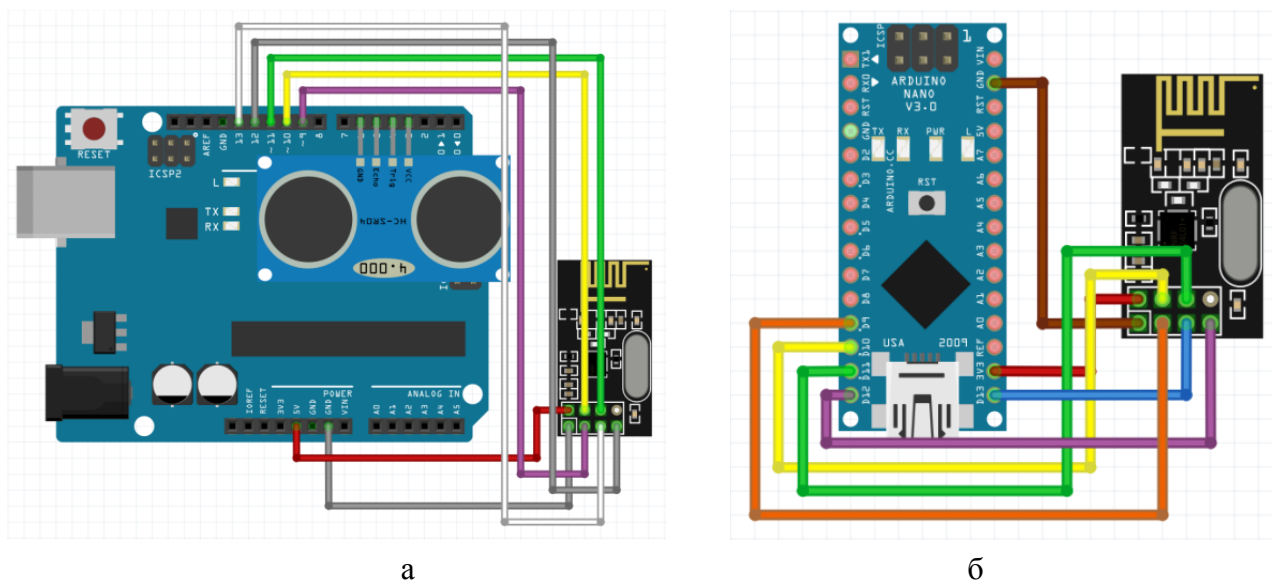


Рисунок 3 – Схема подключения передатчика (а) и приемника (б) сигнала

При проведении опытов фиксировалось падение напряжения U на нагрузочном сопротивлении R_n , подключенном к солнечной панели. Мощность $P_{ист}$, вырабатываемая солнечной панелью, рассчитывалась по формуле:

$$P_{ист} = UI = U^2 / R_n. \quad (1)$$

Измерения фиксировались 4 раза в секунду. В итоге получали графики мощности, выделяемой на нагрузочном сопротивлении. Пример такого графика представлен на рисунке 4. В среднем порядка 80% времени измерения выполнялись, а 20% времени энергии, выделяемой солнечной панелью, не хватало на работу радио-модуля и данные не передавались.

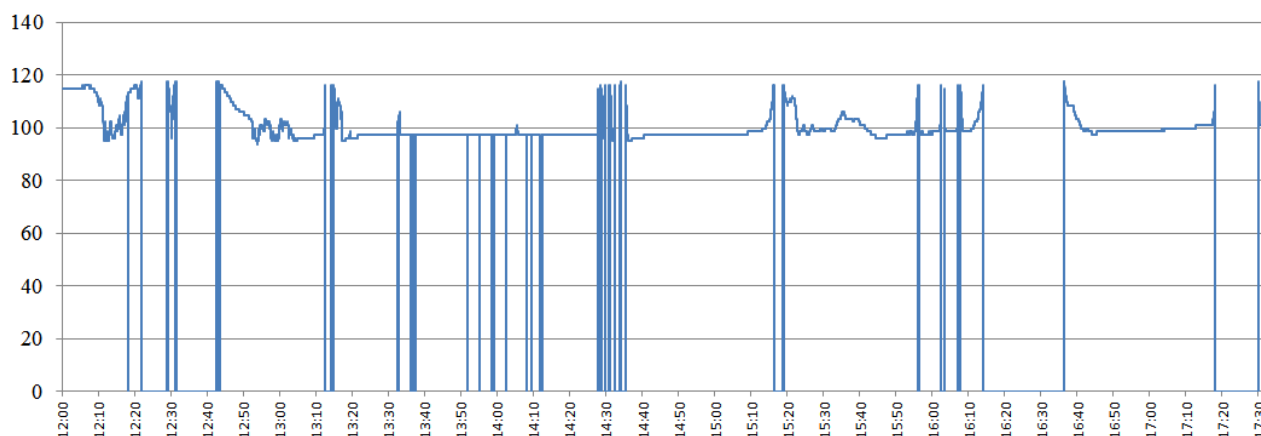


Рисунок 4 – График выработки мощности солнечной панелью

С целью исследования фактических параметров выдаваемой солнечной панелью энергии проведен ряд экспериментов с различными значениями сопротивления R_n и получены следующие результаты. При больших значениях

сопротивления R_n напряжение, выдаваемое солнечной панелью, приближается к своему номинальному значению $U_N = 5$ В, если для этого достаточно уровня освещенности. Однако ток в этом случае уменьшается, что приводит к тому, что и мощность, потребляемая нагрузкой, заметно снижается.

При малых сопротивлениях ток стремится к максимальному значению, однако напряжение на выходах солнечной панели резко уменьшается, что опять же приводит к снижению вырабатываемой мощности. Оптимальным решением является некоторое промежуточное значение сопротивления R_{n0} , при котором мощность $P_{ист}$ максимальна. На рисунке 5 приведены два графика зависимости мощности от сопротивления нагрузки R_n , полученные опытным путем в различных условиях освещенности.

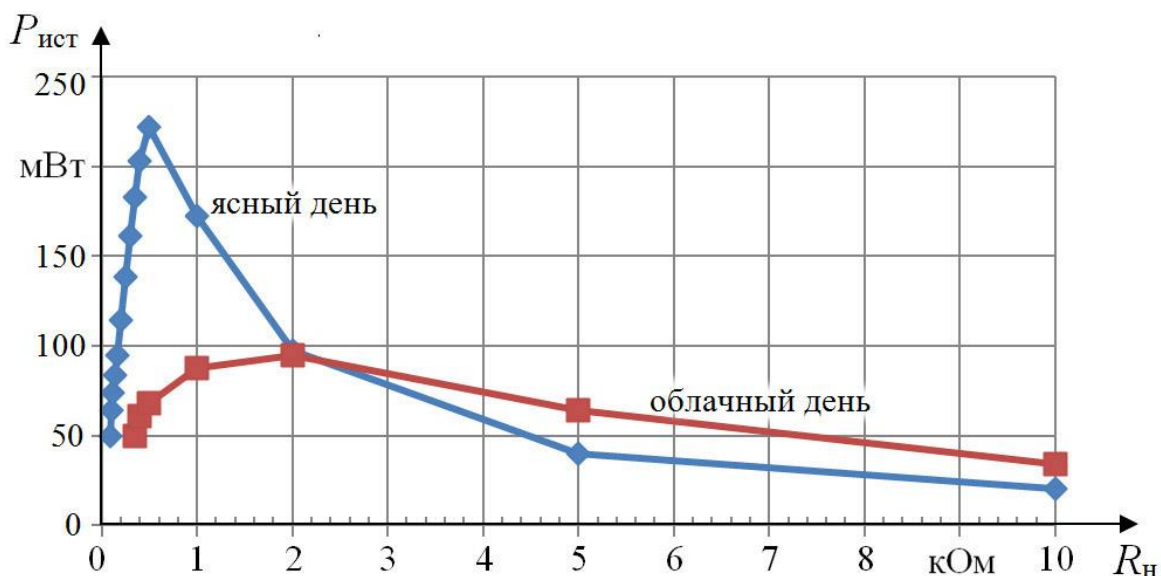


Рисунок 5 – Зависимость мощности $P_{ист}$ от сопротивления нагрузки R_n

Как видно из рисунка 5 оптимальное значение сопротивления нагрузки, как и максимально возможная мощность, сильно зависят от количества световой энергии. После продолжительной серии опытов, установлено, что оптимальный режим работы данной пятивольтовой солнечной панели наблюдается при напряжении $U = 3,73$ В. Соответственно, расчет режима работы панели на это значение напряжения приведет к максимально возможному для данной панели КПД. Ток при этом будет определяться уровнем освещенности и может лежать в диапазоне от 10 мА в пасмурную погоду до 50 мА и выше в солнечную. Максимальное значение тока, полученное экспериментально, составляет 76,4 мА. При этом мощность

$$P_{\text{ист}} = 296,8 \text{ мВт.}$$

На рисунке 6 представлены графики изменения электроэнергии, выработанной с помощью солнечной панели, полученные в различных условиях освещенности.

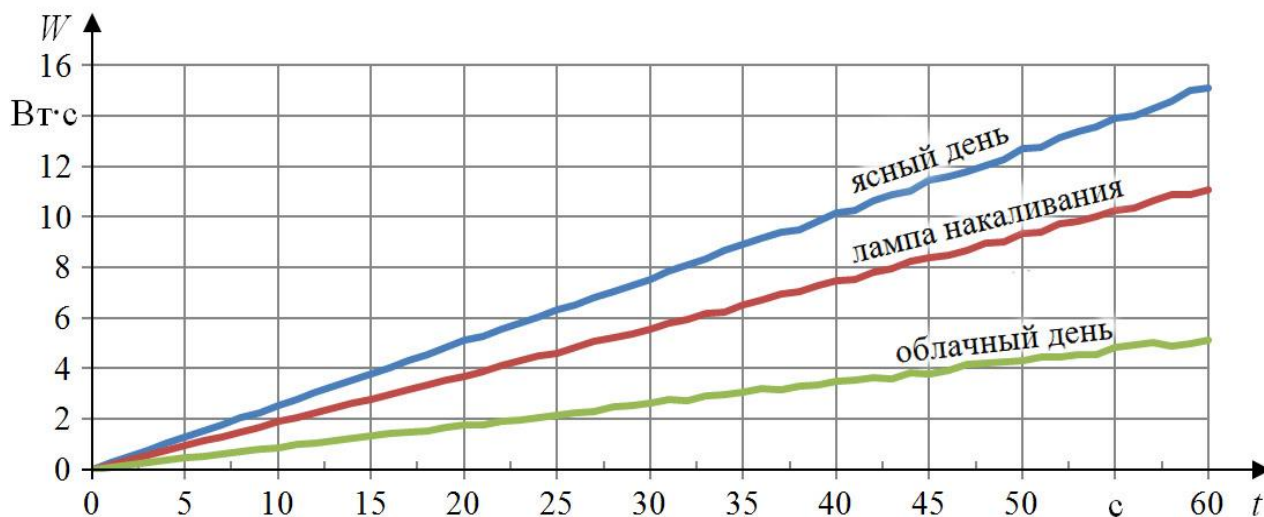


Рисунок 6 – Динамика изменения выработанной энергии в различных условиях освещенности

Для оценки эффективности работы самого трекера был проведен эксперимент, в котором источник света (лампа накаливания) перемещался вокруг солнечной панели. При включенном трекере солнечная панель поворачивалась вслед за источником света, а при отключенном трекере оставалась неподвижной.

В итоге в стационарном положении солнечная панель за три минуты выработала энергию $W_1 = 35,4$ Вт·с. При включенном трекере энергия увеличилась всего на 3,6 % до значения $W_2 = 36,6$ Вт·с. Это означает, что для маломощных панелей использование трекера не эффективно, так как небольшие объемы дополнительно полученной энергии расходуются на работу сервопривода.

Причиной низкой эффективности работы трекера может быть слабая зависимость вырабатываемой энергии от угла падения солнечных лучей, а также высокая доля отраженного света. Для выяснения причин проведена серия опытов с источником направленного света и различной отражающей способностью окружающих солнечную панель материалов.

Панель помещалась в непроницаемый контейнер закрытый с трех сторон таким образом, чтобы солнечный свет четко освещал панель лишь с одного направления. В опытах менялся угол поворота солнечной панели относительно направления падения луча света и материал окружающих панель стен. Углом в 0 градусов соответствует положение, когда свет падает перпендикулярно солнечной панели. Результаты опыта показаны на рисунке 7.

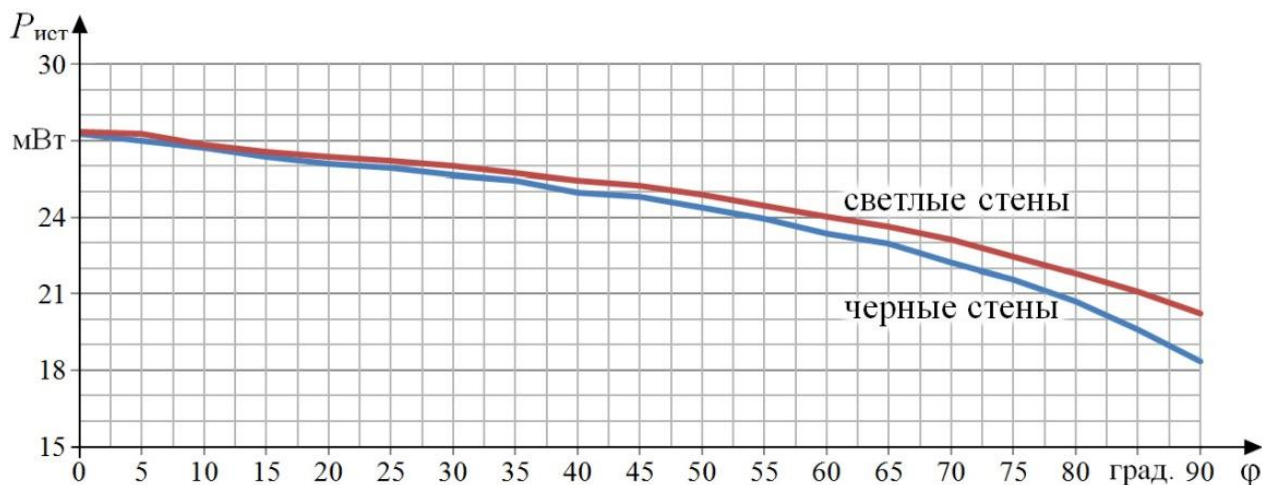


Рисунок 7 – Зависимость мощности $P_{\text{ист}}$ от угла падения света

В результате проведенных опытов можно сделать следующие выводы, что применение поворотного трекера является экономически неэффективным для маломощных солнечных панелей, так как зависимость выдаваемой мощности от угла падения света незначительна. На более крупных солнечных панелях эта разница в 3,6 % может быть ощутима. Для получения максимально возможной выходной мощности необходимо, во-первых, располагать солнечную панель на территории с прямым солнечным светом, а во-вторых, рассчитывать режим работы панели на оптимальное напряжение (например, для пятивольтовых маломощных панелей падение напряжения должно составлять порядка 3,7 В).

Список литературы

1. Блум, Дж. Изучаем Arduino. Инструменты и методы технического волшебства / Джереми Блум ; перевод с англ. В. А. Петина. – Санкт-Петербург : БХВ-Петербург, 2018. – 336 с. – Текст : непосредственный.
2. Плат, Ч. Электроника для начинающих / Чарльз Платт. – Санкт-Петербург : БХВ-Петербург, 2014. – 480 с. – Текст : непосредственный.

3. Плат, Ч. Электроника: логические микросхемы, усилители и датчики для начинающих / Чарльз Платт. – – Санкт-Петербург : БХВ-Петербург, 2015. – 464 с. – Текст : непосредственный.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Пономарев Антон Витальевич

Омский государственный университет
путей сообщения (ОмГУПС).

Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046,

Российская Федерация.

Кандидат технических наук, доцент
кафедры «Теоретическая
электротехника» ОмГУПС.

Тел.: (3812) 31-06-88.

E-mail: antonyswork@gmail.com.

Горчаков Иван Андреевич

Омский государственный университет
путей сообщения (ОмГУПС).

Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046,

Российская Федерация.

Студент Института электрического
транспорта и систем энергообеспечения
ОмГУПС.

Тел.: (3812) 31-06-88.

E-mail: antonyswork@gmail.com.

Богунов Кирилл Вадимович

Омский государственный университет
путей сообщения (ОмГУПС).

Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046,

Российская Федерация.

Студент Института электрического
транспорта и систем энергообеспечения
ОмГУПС.

Тел.: (3812) 31-06-88.

E-mail: antonyswork@gmail.com.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Ponomarev Anton Vitalievich

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx st., Omsk, 644046,

the Russian Federation.

Cand. Tech. Sci., the senior lecturer of the
department «Theoretical the electrical
engineer» OSTU.

Phone: (3812) 31-06-88.

E-mail: antonyswork@gmail.com.

Gorchakov Ivan Andreevich

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx st., Omsk, 644046,

the Russian Federation.

Student of the Institute of electric transport and
power supply systems OSTU.

Phone: (3812) 31-06-88.

E-mail: antonyswork@gmail.com.

Bogunov Kirill Vadimovich

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx st., Omsk, 644046,

the Russian Federation.

Student of the Institute of electric transport and
power supply systems.

Phone: (3812) 31-06-88.

E-mail: antonyswork@gmail.com.

К. С. Маркелова, Б. В. Мусаткина

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

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК УСТРОЙСТВ ТОКОСЪЕМА ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТРАНСПОРТА

Рассмотрено понятие экологичности устройств токосъема. Проведен анализ случаев отрывов токоприемника от токопровода и возникновения электрической дуги для разных видов электрического транспорта. Предложена модель экспериментальной установки для комплексного исследования воздействия токосъемных устройств электрического транспорта на окружающую среду.

Ключевые слова: электрический транспорт, отрыв токоприемника, искрение, контроль качества токосъема, измерительное устройство.

Ksenia S. Markelova, Bela V. Musatkina

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

RESEARCH OF ECOLOGICAL CHARACTERISTICS OF CURRENT COLLECTOR DEVICES OF ELECTRIC TRANSPORT

The concept ecological of current collector devices is considered. The analysis of the separation of the current collector from the current lead and the occurrence of an electric arc for various types of electric transport are carried out. A model of an experimental setup for a comprehensive study of the impact of current collectors of electric transport on the environment is proposed.

Keywords: electric transport, separation of the pantograph, sparking, current collector quality control, measuring device.

Экологичность устройств токосъема является одним из составных элементов качества токосъема одновременно с надежностью и экономичностью [1]. При эксплуатации электрического транспорта возникают негативные факторы, воздействующие на окружающую среду и людей: повышенные уровни электромагнитных полей (ЭМП), УФ-излучений при искрении в зоне

скользящего контакта устройств токосъема, высокие уровни шума и концентрации вредных веществ продуктов износа устройств токосъема в воздухе и почве. При взаимодействии устройств токосъема наиболее опасными являются отрывы токоприемников от токопровода и возникновение электрической дуги, которая приводит к электроэрозии токопровода и контактных элементов токоприемников. Это явление характерно не только для железнодорожного транспорта (рисунок 1 а), но и для городского наземного электрического транспорта – троллейбусов (рисунок 1 б), трамваев (рисунок 1 в), наземных участков метро и эстакадного транспорта.



а



б



в

Рисунок 1 – Возникновение электрической дуги при токосъеме электрического транспорта

Искрение, возникающее при отрыве токоприемника от токопровода, является источником интенсивных помех радиочастотного диапазона. При искрении генерируется спектр высокочастотных излучений. Для выделения из общего фоновое электромагнитного излучения сигналов, относящихся непосредственно к искрению в контакте устройств токосъема, требуются сложные алгоритмы и методики обработки данных. Также, с точки зрения электромагнитной совместимости, необходимо учитывать и оценивать влияние электромагнитных полей радиочастотного диапазона, возникающих при токосъеме электрического транспорта, на смежные электротехнические устройства.

Проводимые ранее исследования устройств токосъема электрического транспорта [2] показали, что генерируемые в скользящем контакте шум, ЭМП, УФ-излучения и износ контактных элементов являются взаимосвязанными явлениями. Частота и интенсивность их проявления зависят от контактного

нажатия и степени износа контактных элементов и токопровода, атмосферных условий (наличия влаги, льда, пыли, фоновых загрязнителей воздуха в зоне контакта), силы тока и скорости движения. Сила контактного нажатия, сила тока, скорость движения изменяются в определенных пределах и регулируются в процессе эксплуатации электрического транспорта, атмосферные воздействия в зоне контакта устройств токосъема являются случайными и носят непостоянный характер.

В целях повышения экологичности и обеспечения качества токосъема для снижения негативного воздействия электрического транспорта на окружающую среду необходимо: контролировать и обеспечивать оптимальный уровень контактного нажатия; выявлять участки повышенного износа токопровода, степень износа контактных элементов и производить их своевременную замену.

Для оценки взаимодействия токоприемника с токопроводом авторами предложено комплексное измерительное устройство [3], особенность его заключается в том, что оно позволяет проводить одновременный контроль акустического и электромагнитного излучения. Блок обработки данных, получает сигналы от блока акустического контроля и блока контроля электромагнитных излучений, обрабатывает их и выдает результаты в виде численных значений. Использование предлагаемого комплексного устройства для исследования взаимодействия токоприемника с токопроводом позволит идентифицировать и количественно оценить экологические аспекты качества токосъема (уровни шума и электромагнитных излучений) при различных режимах работы, а, следовательно, даст возможность получить более достоверную информацию о процессе их взаимодействия, что имеет большое практическое значение при проектировании новых конструкций токоприемников и токопровода при постоянно увеличивающихся требованиях к снижению негативного воздействия электрического транспорта на окружающую среду.

Оперативный одновременный инструментальный контроль интенсивности основных негативных факторов (шума, электромагнитных полей, ультрафиолетового излучения) с привязкой к конкретным координатам трассы транспортной системы позволит повысить точность выявления, локализацию источников влияния и эффективность мероприятий по защите

окружающей среды и населения от вредных техногенных воздействий электрического транспорта.

Основными преимуществами предлагаемого комплексного измерительного устройства, позволяющего исследовать ряд факторов негативного воздействия устройств токосъема на природную среду и разрабатывать эффективные мероприятия по устранению причин их возникновения и/или по снижению интенсивности воздействия, являются:

- снижение временных затрат на проведение экспериментальных исследований и обработку данных за счет использования комплексного измерительного устройства;

- снижение затрат на обслуживание устройств токосъема за счет оперативного выявления участков токопровода и контактных элементов с повышенным износом;

- предотвращенный экологический ущерб для природной среды и здоровья населения;

- возможность использования комплексного измерительного устройства для исследований экологичности и качества токосъема других видов электрического транспорта (троллейбусов, трамваев), поскольку аналогичные проблемы имеются и там.

Предотвращенный экологический ущерб для окружающей среды относится к категории «внешних» социально-экономических эффектов внедрения комплексного измерительного устройства. В настоящее время в РФ для определения предотвращённого ущерба используется «Временная методика определения предотвращенного экологического ущерба» [5]. К факторам, определяющим величину предотвращенного экологического ущерба при внедрении комплексного измерительного устройства, относятся снижение выбросов загрязняющих веществ (продуктов износа контактных элементов устройств токосъема) в атмосферу; снижение загрязненности земель химическими веществами. Предотвращенный экологический ущерб для здоровья населения относится к общественным социально-экономическим эффектам внедрения комплексного измерительного устройства. В настоящее время в РФ отсутствует утвержденная методика оценки экономического ущерба воздействия загрязненной окружающей среды на здоровье населения.

Качественно можно оценить предотвращенный социально-экономический ущерб как снижение потерь, связанных с увеличением заболеваемости населения в зоне влияния источника загрязнения, и затрат на восстановление трудоспособности людей и социальное страхование.

Список литературы

1. Михеев, В. П. Совершенствование систем контактного токосъема с жестким токопроводом : монография / В. П. Михеев, О. А. Сидоров ; Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, ОмГУПС, 2003. – 182 с. – Текст : непосредственный.
2. Сидоров, О. А. Повышение экологической безопасности системы токосъема электрического наземного транспорта / О. А. Сидоров, В. М. Филиппов, К. С. Маркелова // Омский научный вестник. – 2019. – № 4. – С. 34–38.
3. Патент № 2704379 С1. МПК В60L 3/12 (2019.08). Устройство для исследования взаимодействия токоприемника с токопроводом : № 2019102288 : заявлено 28.01.2019 : опубликовано 28.10.2019 / О. А. Сидоров, И. Е. Чертков, К. С. Маркелова, Б. В. Мусаткина, И. Л. Саля ; заявитель и патентообладатель Омский гос. ун-т путей сообщения.
4. Методика расчета эффективности инноваций на железнодорожном транспорте : утверждена ВНИИЖТ 28.12.99, № Э-25/133. – Москва: Министерство путей сообщения, 2000. – 64 с.
5. Временная методика определения предотвращенного экологического ущерба : утверждена государственным комитетом Российской Федерации по охране окружающей среды 09.03.1999 ; с изм. 01.10.2008. – Москва: Стандартиформ, 2000. – 86 с.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Маркелова Ксения Сергеевна
Омский государственный университет
путей сообщения (ОмГУПС).
Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046,
Российская Федерация.
Старший преподаватель кафедры
«Электроснабжение железнодорожного
транспорта» ОмГУПС.
Тел. (3812) 44-21-48.
E-mail: markelovaks.omgups@gmail.com

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Markelova Ksenia Sergeevna
Omsk State Transport University (OSTU).
35, Marx st., Omsk, 644046,
the Russian Federation.
Senior lecturer of Department «Railway
transportation Electrical supply» OSTU.
Phone: (3812) 44-21-48.
E-mail: markelovaks.omgups@gmail.com

Мусаткина Бэла Владимировна
Омский государственный университет
путей сообщения (ОмГУПС).
Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046,
Российская Федерация.
Старший преподаватель кафедры
«Безопасность жизнедеятельности и
экология» ОмГУПС.
Тел.: (3812) 31-07-94.
E-mail: iovv@mail.ru.

Musatkina Bela Vladimirovna
Omsk State Transport University (OSTU).
35, Marx st., Omsk, 644046,
the Russian Federation.
Senior lecturer of Department «Life Safety and
Ecology» OSTU.
Phone: (3812) 31-07-94.
E-mail: iovv@mail.ru

УДК 625.098: 504.055

Б. В. Мусаткина, А. А. Кообар

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

КАРТИРОВАНИЕ ШУМА КАК ИНСТРУМЕНТ КОНТРОЛЯ И ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

Рассмотрены правовые основы регулирования качества окружающей среды, принципы нормирования акустического загрязнения в РФ и за рубежом. Проведен сравнительный анализ существующих методик картирования транспортного шума. Приведены результаты исследований и оценок транспортного шума, выполненные на кафедре «Безопасность жизнедеятельности и экология» ОмГУПС. Представлен обзор инновационных технологий защиты окружающей среды от акустического загрязнения. Сформулированы выводы и предложения по результатам исследований.

Ключевые слова: акустическое загрязнение, картирование шума.

Bela V. Musatkina, Alexander A. Koobar

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

NOISE MAPPING AS A TOOL FOR CONTROL AND QUALITY EVALUATION OF THE ENVIRONMENT

The legal foundations of environmental quality regulation, the principles of normalization of acoustic pollution in the Russian Federation and in foreign countries are considered. A comparative analysis of existing transport noise mapping techniques has been carried out. The results of studies and assessments of transport noise performed at the Department «Life Safety and

Ecology» of OSTU are presented. A review of innovative technologies to protect the environment from acoustic pollution is presented. Conclusions and suggestions based on research results are formulated.

Keywords: acoustic pollution, noise mapping.

В Государственном докладе «О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2018 году» говорится о гигиенической значимости акустического шума, сверхнормативные уровни которого продолжают возрастать, особенно в условиях плотной застройки. Ведущим источником шума в населенных пунктах по-прежнему остается транспорт, актуальной остается проблема авиационного шума. По данным Роспотребнадзора, анализ структуры жалоб населения показывает значительный объем обращений, связанных со сверхнормативными уровнями акустического шума (16 тыс., или 58 % от общего количества в 2018 г.) [1].

Повышенный уровень шума является фактором риска для здоровья работающих и населения в целом, вызывает нарушения слуха, сердечно-сосудистые патологии, угнетение нервной системы. Международным стандартом ISO 1999:1975 (1975 г.) был определен допустимый риск развития тугоухости: при уровне шума 90 дБА в течение 5 лет риск составлял 4%, в течение 15 лет – 14%, 35 лет – 20%; а при 85 дБА – соответственно 1; 5 и 9%. Социально приемлемым критерием был признан уровень шума в 90 дБА (хотя известна категория людей, у которых потеря слуха наблюдается и при уровне 75 дБА). В стандарте ISO 1999:1990 рекомендован предельно допустимый уровень (ПДУ) шума 85 дБА и дан прогноз потерь слуха в зависимости от частоты и длительности воздействия шума, от пола и возраста людей.

Для людей, проживающих на шумных улицах (65-75 дБА), по данным ВОЗ риск сердечно-сосудистых заболеваний увеличивается на 20%. В опубликованном недавно докладе Европейского парламента «Стратегия борьбы с шумом» приведены такие цифры: ежегодно в ЕС 50 тыс. человек преждевременно умирают от сердечных приступов, вызванных уличным шумом; 200 тыс. человек страдает от сердечно-сосудистых заболеваний, связанных с уличным шумом [2]. По данным российских медиков, среди дополнительных (выше средних показателей) случаев смерти в промышленных центрах доля от заболеваний, вызванных шумом, равна 3,3% [3].

ПДУ шума для селитебных зон жилой застройки в РФ представлены в

санитарных нормах СН 2.2.4/2.1.8.562-96 [4]. Для территорий, непосредственно прилегающих к жилым домам, зданиям и учебным заведениям, эквивалентный уровень звука $L_{\text{ЭКВ}}$ не должен превышать 55 дБА днем (с 7 до 23 ч) и 45 дБА ночью (с 23 ч до 7 ч), а максимальный уровень звука $L_{\text{МАКС}}$ не должен превышать 70 дБА днем и 60 дБА ночью. Максимальные допустимые уровни звука в дБА для шума, создаваемого на территории некоторых организаций средствами автомобильного, железнодорожного транспорта, приняты на 10 дБА выше. Следует отметить, что в последнее время разница между фактическим уровнем транспортного шума в дневное и ночное время суток стремительно сокращается, особенно на территориях, прилегающих к дорогам с интенсивным транспортным потоком.

Российские нормы устанавливают более жесткие требования к ПДУ шума, чем рекомендует ВОЗ. С 2017 г. СанПиН 2.2.4.3359-16 [5] ввел новый показатель шума – пиковый скорректированный по шкале С уровень звука, дБС (измеряемый с использованием стандартизированной частотной коррекции шумомера). Тем самым в отечественную практику оценки интенсивных шумов (характерных для транспорта) внедряются международные принципы, т. к. при высоких уровнях звука частотной характеристике человеческого слухового восприятия в наибольшей степени соответствует коррекция С.

Экологическое нормирование шума в целях обоснования ПДУ воздействия шума на природные объекты в настоящее время находится в стадии исследования. Оценка воздействия техногенного шума на живые организмы, основанная на ПДУ, разработанных для человека, приобретает весьма условный характер. Это в еще большей степени относится к использованию для оценки воздействия на биоценозы эквивалентных уровней звука (в дБА), искусственно нормализованных в нескольких октавах для аудиограмм человека. Разработка и утверждение научно обоснованных норм шумового воздействия на экосистемы способствовали бы проектированию и повсеместному внедрению шумозащитных технологий, минимизирующих ущерб качеству окружающей среды [6].

В снижении шумовой нагрузки на селитебные территории важную роль играют организационные мероприятия, но для обоснованного выбора мер защиты необходимо иметь достоверные данные об уровнях шума на территориях жилой застройки. Мировая практика показывает, что мониторинг транспортного шума чаще основывается на прогнозных расчетах, т. к. измерение уровней шума во всех оцениваемых точках практически не

осуществимо по причине значительных временных затрат. ГОСТ Р 53187 [7] рекомендует составлять оперативные шумовые карты с использованием вычислительных методов [8]. Таких же принципов придерживаются в странах ЕС (Директива Европейского парламента 2002/49/ЕС от 25.06.2002 по шуму в окружающей среде).

Расчетные методики можно разделить на расчеты шумовой характеристики и на расчеты распространения шума на территории. Наиболее часто применяются методики: Schall 03 / DIN 18005 (Германия); Calculation of Railway Traffic Noise – CoRN (Англия); Nordic Rail Prediction Method (Скандинавские страны); Nord 2000 (Скандинавские страны); Российская расчетная модель (НИИСФ, 1993 г.). Результаты расчетов различаются до 10 дБА, при этом наиболее близкие к результатам измерений значения дают российская и скандинавские методики.

Применение расчетных методов стран ЕС в России связано с определенными трудностями, т. к. требует значительной адаптации к действующим нормам, шумовым характеристикам отечественных автомобилей, рельсового транспорта и т. д. Во многих моделях в ЕС принимается допущение о точечном типе источника шума, что значительно упрощает расчеты, но не соответствует российским стандартам.

Авторами проведены измерения шума транспортных потоков на территории, прилегающей к ОмГУПСу, и шума, проникающего на рабочие места сотрудников и в учебные аудитории через окна, расположенные на южном и западном фасадах корпусов №№ 1 и 3 (т. е. в наиболее шумных зонах). Измерения проводились шумомером 1 класса SVAN-912M; обработка результатов и оценка – в соответствии с требованиями нормативных документов [4, 5, 7, 9]. Расчет расширенной неопределенности измерений выполнялся в соответствии с п. 9 ГОСТ 23337-2014 [9]. По откорректированным результатам нескольких аналогичных измерений уровней звука, выполненных в одной и той же точке, вычислялось среднее значение измеренных уровней звука. Для полученной серии измерений в каждой точке оценивалась неопределенность по типу А, связанная с погрешностями методики измерений и влиянием факторов окружающей среды U_A , равная 0,681 дБА. Неопределенность по типу В, обусловленная инструментальной погрешностью U_B , принималась равной 0,7 дБА (для шумомера 1-го класса SVAN). Расширенная неопределенность измерений U (95%) для уровня доверия 95 % составила 1,95 дБА.

Результаты картирования транспортного шума на территории, прилегающей к университету, приведены на рисунке 1.

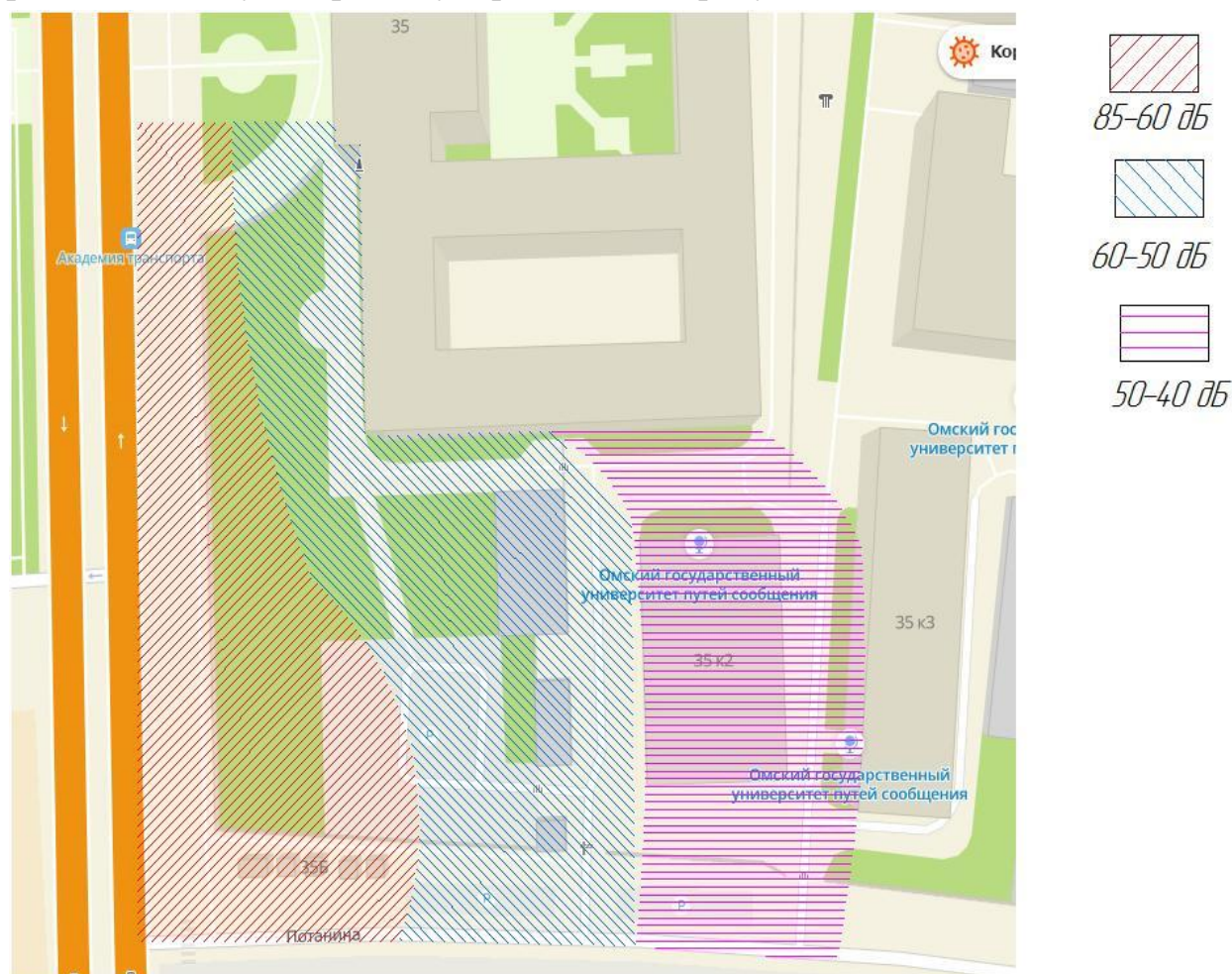


Рисунок 1 – Результаты картирования транспортного шума

Анализ частотного спектра шума транспортного потока показал, что наибольшие уровни звука фиксируются в диапазоне от 125 до 1000 Гц (т. н. среднечастотный шум).

Результаты измерений и оценок проникающего шума приведены ниже. Следует учесть, что согласно [4] допустимые уровни шума от внешних источников в помещениях устанавливаются при условии обеспечения нормативной вентиляцией помещений (для жилых помещений, палат, классов - при открытых форточках, фрамугах, узких створках окон).

В аудиториях 5 этажа 3-го корпуса ОмГУПС (западный фасад, расстояние от пр. К. Маркса 125 м, от ул. Потанина 40 м) эквивалентный и максимальный уровни проникающего транспортного шума составили соответственно: при открытом окне 45,4 дБА и 61,1 дБА; при закрытом окне – 36,0 дБА и 53,2 дБА. Это соответствует санитарным нормам [4].

В ауд. 161 1-го корпуса (западный фасад, расстояние от пр. К. Маркса 40 м, имеются поглощающие шум зеленые насаждения) эквивалентный и максимальный уровни проникающего транспортного шума составили соответственно: при открытом окне 49,2 дБА и 68,0 дБА; при закрытом окне – 45,6 дБА и 63,0 дБА. Это соответствует санитарным нормам [5].

В ауд. 156 1-го корпуса (южный фасад, расстояние от пр. К. Маркса 60 м, от ул. Потанина 80 м, нет зеленых насаждений) эквивалентный и максимальный уровни проникающего транспортного шума составили соответственно: при открытом окне 64,1 дБА и 73,7 дБА; при закрытом окне – 62,3 дБА и 69,0 дБА. Это не соответствует санитарным нормам [5], превышение эквивалентного ПДУ шума для рабочих мест с ПЭВМ составило от 2,3 до 4,1 дБА. В то же время опрос сотрудников не выявил субъективных жалоб на шум.

Методы защиты населения и среды обитания от негативного шумового воздействия транспорта подразделяются на пассивные и активные. В первом случае это меры, применяемые для защиты от неустраняемого существующего шума (шумозащитные экраны, звукоизолирующее остекление фасадов зданий вблизи дорог, шумозащитные здания с ориентацией жилых комнат преимущественно в сторону внутриквартальной территории, шумозащитные посадки деревьев и т. п.). Во втором случае – меры, позволяющие исключить или минимизировать генерацию шума за счёт существенных модернизаций конструкций транспортных средств, дорожного полотна, логистических решений. Наиболее эффективное решение – замена источника шумового воздействия, реализация приоритетного развития малотракторных видов транспорта (например, монорельсового).

Использование карт шума дает возможность обоснованно выбирать точки замеров и проводить акустический мониторинг, оценивать фоновые уровни шума в любой точке города при проектировании новой застройки, определять необходимые шумозащитные мероприятия на различных объектах, оценивать акустическое воздействие при изменении транспортных потоков и др.

Список литературы

1. Государственный доклад «О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2018 году». – Москва: Минприроды России; НПП «Кадастр», 2019. – 844 с. – Текст : непосредственный.
2. Иванов, Н. И. Концепция снижения шума в РФ / Н. И. Иванов. – Текст : непосредственный. // Защита от повышенного шума и вибрации : доклады V

всероссийской научно-практической конференции с международным участием / под ред. Н. И. Иванова. – Санкт-Петербург: Айсинг, 2015. – 701 с. – С. 12–23.

3. О методических подходах к оценке многофакторных рисков для здоровья населения, подверженного неблагоприятному воздействию среды обитания человека / М. С. Благодарева, А. С. Корнилков, С. В. Ярушин, О. Л. Малых. – Текст : непосредственный // Медицина труда и промышленная экология. – 2018. – № 11. – С. 41–45.

4. СН 2.2.4/2.1.8.562-96. Шум на рабочих местах, в помещениях жилых, общественных зданий и на территории жилой застройки : издание официальное : утвержден и введен в действие постановлением Госкомсанэпиднадзора России от 31 октября 1996 г. № 36 / разработан Научно-исследовательским институтом медицины труда Российской Академии медицинских наук, Московским НИИ гигиены им. Ф.Ф.Эрисмана. – Москва : Информационно-издательский центр Минздрава РФ, 1997. – 28 с. – Текст : непосредственный.

5. СанПиН 2.2.4.3359-16. Санитарно-эпидемиологические требования к физическим факторам на рабочих местах : издание официальное : утвержден постановлением главного государственного санитарного врача Российской Федерации от 21 июня 2016 года №81. – Москва : Стандартинформ, 2016. – 106 с. – Текст : непосредственный.

6. Холопов, Ю. А. Анализ эффективности шумозащитных мероприятий на железнодорожном транспорте / Ю. А. Холопов, Ю. Н. Хмельницкий, Б. В. Мусаткина. – Текст : непосредственный // Защита от повышенного шума и вибрации : сборник докладов всероссийской научно-практической конференции с международным участием / под ред. Н. И. Иванова. – Санкт-Петербург : ООО «Институт акустических конструкций», 2019. – 835 с. – С. 710–717.

7. ГОСТ Р 53187–2008. Акустика. Шумовой мониторинг городских территорий = Acoustics. Noise monitoring of cities : национальный стандарт Российской Федерации : издание официальное : утвержден и введен в действие приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 18 декабря 2008 г. № 638-ст : введен впервые : дата введения 2009-12-01 / разработан Научно-исследовательским институтом строительной физики (НИИСФ), Балтийским государственным техническим университетом «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф.Устинова (БГТУ), ГПУ «Мосэкомониторинг». – Москва : Стандартинформ, 2009. – 16 с. – Текст : непосредственный.

8. СП 51.13330-11. Защита от шума. Актуализированная редакция СНиП 23-03-2003 : издание официальное : утвержден приказом Министерства регионального развития Российской Федерации (Минрегион России) от

28 декабря 2010 г. № 825 : дата введения 2011-05-20 : зарегистрирован Федеральным агентством по техническому регулированию и метрологии (Росстандарт). Пересмотр СП 51.13330.2010 / исполнители Научно-исследовательский институт строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук (НИИСФ РААСН). – Москва : Минрегион России, 2011. – 89 с.

9. ГОСТ 23337–2014 Шум. Методы измерения шума на селитебной территории и в помещениях жилых и общественных зданий = Noise. Methods of noise measurement in residential areas and in the rooms of residential, public and community buildings : национальный стандарт Российской Федерации : издание официальное : утвержден приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 18 ноября 2014 г. № 1643-ст : дата введения 2015-07-01 / разработан Федеральным государственным бюджетным учреждением «Научно-исследовательский институт строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук» (НИИСФ РААСН). – Москва: Стандартинформ, 2014. – 26 с.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Мусаткина Бэла Владимировна

Омский государственный университет
путей сообщения (ОмГУПС).

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

Старший преподаватель кафедры
«Безопасность жизнедеятельности и
экология» ОмГУПС.

Тел.: +7(3812) 31-07-94.

E-mail: iovv@mail.ru.

Кообар Александр Александрович

Омский государственный университет
путей сообщения (ОмГУПС).

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

Старший преподаватель кафедры
«Безопасность жизнедеятельности и
экология» ОмГУПС.

Тел.: +7(3812) 31-07-94.

E-mail: koobar_a_a@mail.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Musatkina Bela Vladimirovna

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx st., Omsk, 644046,

the Russian Federation.

Senior lecturer of the department «Life safety and
ecology» OSTU.

Phone: +7(3812) 31-07-94.

E-mail: iovv@mail.ru.

Koobar Alexander Alexandrovich

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx st., Omsk, 644046,

the Russian Federation.

Senior lecturer of the department «Life safety and
ecology» OSTU.

Phone: +7(3812) 31-07-94.

E-mail: koobar_a_a@mail.ru.

Секция 4 «Метрологическое обеспечение, аттестация лабораторий и подтверждение соответствия»

УДК 331.5.024.52

О. М. Кирилюк, Е. Ю. Легчилина, Т. В. Цалко

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

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЦИФРОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ РЕЗУЛЬТАТОВ ПЕНСИОННОГО РЕФОРМИРОВАНИЯ

В статье рассматривается значимость использования цифровых технологий при проведении опросов в сети Интернет. Авторы на примере диагностики результатов пенсионной реформы РФ, направленной на увеличение пенсионного возраста, демонстрируют актуальность и действительную необходимость использования социологических и маркетинговых исследований с помощью современного программного обеспечения. Авторы делают попытки увязать цифровизацию и развитие рынка с помощью таких индикаторов, как экономический рост и качество жизни населения. В статье представлена разработанная авторами модель диагностики на примере проведения онлайн-опроса. Авторы отмечают, что интеграция программного обеспечения с возможностями сети Интернет ускорит процесс сбора социологических или маркетинговых данных и даст возможность для принятия эффективных организационных решений.

Выполнено при поддержке гранта РФФИ № 19-010-00362.

Ключевые слова: пенсионная реформа, цифровые технологии, диагностика, онлайн-опрос.

Olga M. Kiriliuk, Elena Y. Legchilina, Tatiana V. Tsalko

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

THE USE OF DIGITAL TECHNOLOGIES TO DIAGNOSE THE RESULTS OF PENSION REFORM

The article discusses the importance of using digital technologies in conducting surveys on the Internet. The authors, using the example of diagnostics of the results of the pension reform of the Russian Federation aimed at increasing the retirement age, demonstrate the relevance and actually need to use sociological and marketing research using modern software. The authors attempt to link digitalization and market development with indicators such as economic growth and

the quality of life of the population. The article presents the diagnostic model developed by the authors using the example of conducting an online survey. The authors note that the integration of software with the capabilities of the Internet will accelerate the process of collecting sociological or marketing data and will provide an opportunity for making effective organizational decisions.

Implemented with the support of RFBR grant No. 19-010-00362.

Keywords: pension reform, digital technologies, diagnostics, online survey.

В настоящее время, наблюдается активная поддержка развития цифровизации как в глобальном масштабе, так и на уровне Российской Федерации. Не смотря на активность населения в использовании цифровых гаджетов, smart техники, длительном проведении времени за компьютером, возможностях удаленной работы, в нашей стране всё же происходит отставание, по сравнению с мировыми тенденциями проникновения цифровизации во многие виды человеческой и профессиональной деятельности. Это касается и методов мониторинга, сбора и обработки данных, диагностики результатов, как необходимый процесс любого социологического, маркетингового исследования.

Тема использования цифровых технологий для диагностики результатов авторами выбрана не случайно. Поддержанная РФФИ тема гранта № 19-010-00362, реализация которого продолжается до конца 2020 года, стала вектором для проведения большого научного исследования, которое, безусловно, предполагает работу с большим объемом информации, статистических данных, результатов социологических опросов. Обойтись без использования сети Интернет, программного обеспечения, прочих информационно-коммуникационных технологий не представляется возможным.

Сегодня цифровые технологии – уникальный массив, открывающий широкие возможности при проведении опросов для ученых и исследователей, профессиональных социологов, маркетологов и прочих. Системность социологических и маркетинговых исследований является базой информационного обеспечения по тем или иным проблемам.

Так, к положительным чертам проведения «цифровых» исследований относятся:

- автоматический сбор, переработка, точечная аналитика и аккумулирование большого объема данных;
- возможность совместного и одновременного использования

информации заинтересованными лицами;

- применение искусственного интеллекта при построении возможных решений;
- появление сетевых потоков информации по направлениям;
- замена бумажных носителей на электронные.

В некоторых источниках приводятся выводы о том, что состояние российского рынка социологических и маркетинговых исследований значительно отстает от мировых показателей, количественные и качественные методы сбора и обработки данных с помощью цифровых технологий чаще используются в маркетинговой практике, нежели в социологии [2,4]. При этом отмечаются прогнозные ожидания от мировой цифровизации – это доступность сети интернет для 50% численности населения Земли [2]. Таким образом, ожидаемые эффекты заключаются в сокращении географических барьеров при проведении онлайн исследований, в повышении доступности научно-исследовательских данных, в оптимизации методов диагностики в ходе исследований, в развитии информационной среды (Big Data), в возможном преобладании онлайн-взаимодействия над личным, в развитии рынка цифровых технологий.

Используя инструменты онлайн-исследований, авторы провели оценку влияния пенсионной реформы РФ на социально-трудовые отношения, экономический рост и качество жизни.

Модель диагностики заключалась в том, что спецификой онлайн-опроса, в отличие от опроса в офлайн, являются возможные условия использования данных, полученных в ходе научного социологического исследования разными заинтересованными группами. В этом случае авторы предполагают выделение внутренних и внешних пользователей (потребителей) результатов полученной информации.

Например, к внутренним потребителям относится группа ученых, представителей высшей школы – авторов методики онлайн-опроса, целью которого являлась оценка влияния пенсионной реформы РФ на социально-трудовые отношения, экономический рост и качество жизни. В этом случае онлайн-опрос проводился с применением ресурсов группы и вуза (человеческих, информационных, материально-технических и пр.).

Внутренним потребителем может выступать респондент онлайн-опроса, если проявит интерес к результатам исследования, или имеет иную мотивацию.

Так как респондентом являлся любой человек, попавший случайным образом в выборочную совокупность, то в случае авторского исследования ими стали работодатели, работники (в том числе работающие пенсионеры), самозанятые, безработные граждане, пенсионеры, обучающиеся.

Так как научная тематика авторов поддержана и профинансирована российским фондом фундаментальных исследований, он также становится внутренним пользователем результатов онлайн-опроса.

Внутренним потребителем может стать юридическое лицо, которое осуществляет свою деятельность на рынке социологических или маркетинговых исследований. Тогда проводятся ad hoc исследования по заказу, или организуются синдикативные исследования. В случае изучения влияния пенсионной реформы на социально-трудовые отношения, экономический рост и качество жизни, авторы не прибегли к этим возможным участникам, так как имеют опыт проведения социологических исследований.

В числе внешних пользователей проведенной диагностики результатов пенсионной реформы могут быть органы власти при мониторинге социальных процессов и явлений, для информирования населения о ходе пенсионной реформы, а также получения обратной связи на политические решения.

Так как результаты исследований изложены в научных отчетах и публикациях и имеются в сети Интернет, то они становятся доступными и полезными для научных сотрудников, педагогов и обучающихся.

Интерес к опросу проявлен работодателями, которые являются внешними пользователями. Проведенное исследование позволяет принять организационные решения (например, в кадровой политике, юридических вопросах социально-трудовых отношений, корпоративной культуры и других).

Осуществление информационного обмена между внутренними и внешними пользователями хода онлайн-опроса обеспечивает глобальная сеть Интернет за счет основных ее инструментов (e-mail рассылка, интернет-форумы, онлайн-фокус группы, самозагружающиеся опросники, стандартные веб-опросники, опросники на сайте) и результатов онлайн-опроса с помощью гиперссылок и тегов, ссылок совместного и общего доступа, HTML-кода, поисковой оптимизации.

Модель, описанная выше, разработана одним из авторов и представлена в печати [5]. Однако следует отметить, что она касалась модели использования информационно-коммуникационных технологий при проведении

маркетинговых онлайн-опросов, в настоящей же статье она адаптирована для использования в социологическом исследовании оценки пенсионного реформирования.

Проведение исследования в онлайн позволило авторам:

- 1) существенно увеличить число и географическую удаленность респондентов (около 6000 опрошенных по всей России);
- 2) понести значительно низкие затраты, чем при проведении опроса в офлайне (основные затраты - оплата трафика пользования интернетом);
- 3) упростить разработку анкеты (технические характеристики сервиса «Google Формы») (см. рисунок 1);
- 4) увеличить скорость сбора и обработки данных, по сравнению с «бумажным» процессом исследования (автоматическая оптимизация анализа данных с помощью сервиса «Google Формы») (см. рисунок 2);
- 5) создать удобные условия для ответов респондентов (возможность выбора времени участия в опросе и носителя (смартфон, планшет, десктоп);
- 6) достичь анонимности при ответах.

Рисунок 1 – Фрагмент анкеты Google Формы

В статье приведен лишь один метод социологического исследования в ракурсе цифровых технологий – это онлайн-опрос с помощью сервиса «Google Формы». На сегодняшний день он самый популярный, удобный и универсальный инструмент сбора и обработки данных. Сервис позволяет не

только создать опрос (анкету, тест и др.), но и видеть в режиме реального времени ход опроса, позволяет анализировать ответы и формировать отчёты автоматически, может содержать ответы до 2 млн респондентов, возможна отправка ссылки на опрос по почте, в социальных сетях или в прочее интернет пространство, обладает и другими возможностями.

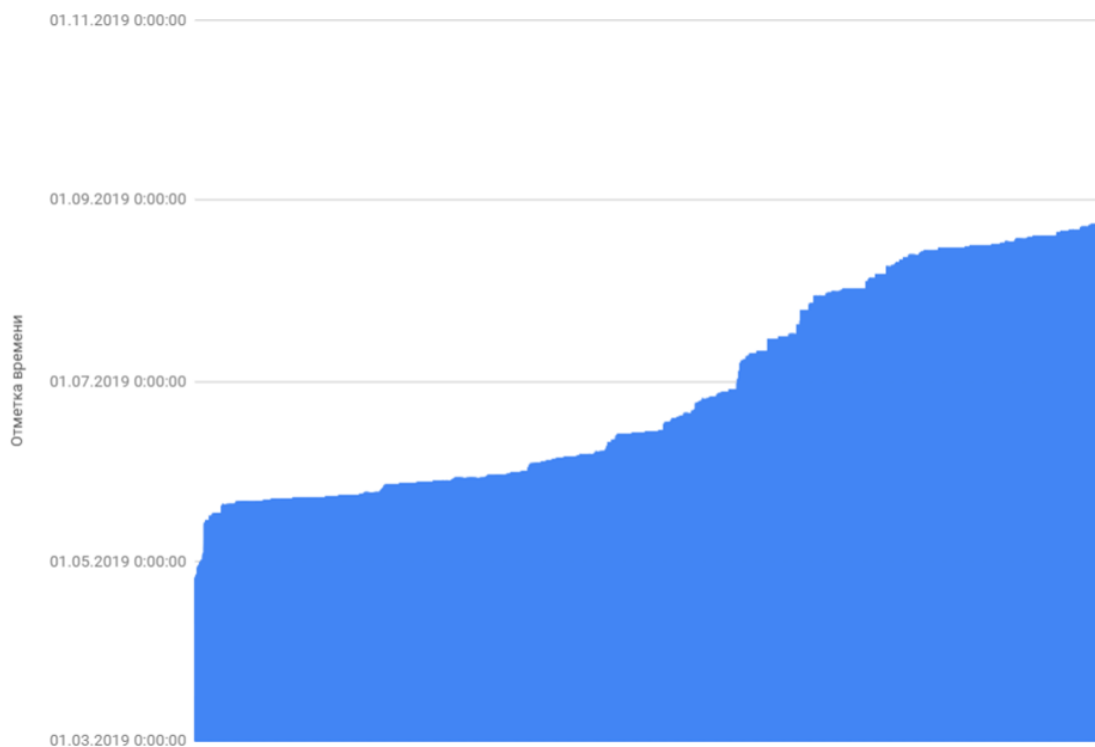


Рисунок 2 – Фрагмент динамики хода онлайн-опроса

В ходе онлайн-опроса, авторы изучали мнения людей относительно пенсионной реформы РФ, трудовых ценностей и удовлетворенности условиями труда, трудового поведения в период активной цифровизации, а также морально-психологический климат в трудовом коллективе в адрес лиц предпенсионного и пенсионного возраста (подробнее о результатах опроса [1,3]). Выводы позволили авторам расширить научную концепцию и взгляды в области построения модели трансформации социально-трудовых отношений, влияющих на качество жизни населения и экономический рост в рамках аксиологического подхода.

Диагностика результатов пенсионного реформирования позволила разработать показатели, критерии и модели влияния изменений в системе социально-трудовых отношений на качество жизни и экономический рост в условиях любых социальных реформ.

Список литературы

1. Методика оценки влияния пенсионной реформы Российской Федерации на социально-трудовые отношения, экономический рост и качество жизни населения / С. Н. Апенько, О. М. Кирилюк, Е. Ю. Легчилина, Т. В. Цалко. – Текст : непосредственный // Фундаментальные исследования. – 2019. – № 11. – С. 21–30.
2. Индикаторы цифровой экономики: 2018 : статистический сборник / Г. И. Абдрахманова, К. О. Вишневский, Г. Л. Волкова [и др.]. – Москва : Высшая школа экономики, 2018. – 268 с. – Текст : непосредственный.
3. Оптимизация анализа опроса // Google Формы : сайт. – URL: <https://docs.google.com/forms/d/e/1FAIpQLSc-BZsRCiSaUh1NK5g-fn1wdOUq30r5yQD-iiYvkbM1plRG-A/viewanalytics> (дата обращения: 03.10.2020). – Текст: электронный.
4. Онлайн популярнее САТІ: исследователи измерили структуру и объем своего рынка // Sostav : сайт. – URL: <https://www.sostav.ru/publication/onlajn-populyarnee-cati-issledovateli-izmerili-obem-i-strukturu-svoego-rynka-38370.html> (дата обращения: 02.10.2020). – Текст: электронный.
5. Цалко, Т. В. Цифровизация в маркетинговых исследованиях (на примере онлайн-опросов) / Т. В. Цалко. – Текст : электронный // ЦИТИСЭ : электрон. науч. журн. – 2019. – № 1(18). – URL: <http://ma123.ru/wp-content/uploads/2019/03/docx.pdf>. – Дата публикации: 30.03.2019.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Кирилюк Ольга Михайловна

Омский государственный университет
путей сообщения (ОмГУПС).
Маркса пр., д. 35, г. Омск 644046,
Российская Федерация.
Кандидат экономических наук, доцент
кафедры «Менеджмент, маркетинг и
коммерция» ОмГУПС.
Тел.: +7 (3812) 31-18-33.
E-mail: olgaomgau@yandex.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Kiriliuk Olga Mikhailovna

Omsk State Transport University (OSTU).
35, Marx av., Omsk, 644046,
the Russian Federation.
Candidate of Economics, docent of the
Department of “Management, Marketing and
Commerce” OSTU.
Phone: +7 (3812) 31-18-33.
E-mail: olgaomgau@yandex.ru.

Легчилина Елена Юрьевна

Омский государственный университет
путей сообщения (ОмГУПС).

Маркса пр., д. 35, г. Омск 644046,

Российская Федерация.

Кандидат экономических наук, доцент,
заведующий кафедрой «Менеджмент,
маркетинг и коммерция» ОмГУПС.

Тел.: +7 (3812) 31-18-33.

E-mail: legcelena@yandex.ru.

Legchilina Elena Yuryevna

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx av., Omsk, 644046,

the Russian Federation.

Candidate of Economics, Associate Professor,
Head of the Department of “Management,
Marketing and Commerce” OSTU.

Phone: +7 (3812) 31-18-33.

E-mail: legcelena@yandex.ru.

Цалко Татьяна Валерьевна

Омский государственный университет
путей сообщения (ОмГУПС).

Маркса пр., д. 35, г. Омск 644046,

Российская Федерация.

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

Тел.: +7 (3812) 31-18-33.

E-mail: bt_tv@mail.ru.

Tsalko Tatiana Valerievna

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx av., Omsk, 644046,

the Russian Federation.

Candidate of Economics, docent of the
Department of “Management, Marketing and
Commerce” OSTU.

Phone: +7 (3812) 31-18-33.

E-mail: bt_tv@mail.ru.

УДК 697.322:697.341:658.511

А. П. Стариков, Е. В. Москвина

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС),

г. Омск, Российская Федерация,

ТАРИРОВКА ФОРСУНОК ГАЗОМАЗУТНЫХ ГОРЕЛОК

Форсунка занимает одно из главных мест в устройстве котла, которое отвечает за качественный процесс распыливания и дальнейшего горения топлива в котельной установке. В случае несоответствия наилучшим производственным характеристикам, заложенным заводом изготовителем, мы получаем экономически не эффективное сжигание топлива, не полное сжигание топлива, что приводит к повышению концентраций вредных веществ в уходящих газах, а так же внутри топки котла. Повышение оксидов азота, из-за увеличения коэффициента избытка воздуха, приводит к преждевременному выходу из строя экранных труб котла.

При анализе имеющегося рынка, а в дальнейшем и патентного поиска, было выявлено

что данных установок нет в открытой продаже, а так же не имеется предприятий предоставляющих услуги по тарировке и /или поверки мазутных форсунок.

Ключевые слова: мазут, газ, газовые форсунки, мазутные форсунки, промышленные котельные, производство, тарировка, стенд для тарировки, теплообменник.

Alexander P. Starikov, Elena V. Moskvina

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

CALIBRATION OF GAS AND OIL BURNERS

The nozzle occupies one of the main places in the boiler design, which is responsible for the high-quality process of atomization and further combustion of fuel in the boiler plant. In case of non-compliance with the best production characteristics laid down by the manufacturer, we get economically ineffective combustion of fuel, incomplete combustion of fuel, which leads to an increase in the concentration of harmful substances in the exhaust gases, as well as inside the boiler furnace. An increase in nitrogen oxides, due to an increase in the excess air ratio, leads to premature failure of the boiler wall tubes.

When analyzing the existing market, and later on a patent search, it was revealed that these installations are not available for sale, and there are no enterprises providing services for calibration and / or verification of fuel oil injectors.

Keywords: fuel oil, gas, gas injectors, fuel oil injectors, industrial boiler houses, production, calibration, calibration stand, heat exchanger.

Форсунка занимает одно из главных мест в устройстве котла, которое отвечает за качественный процесс распыливания и дальнейшего горения топлива в котельной установке. В случае несоответствия наилучшим производственным характеристикам, заложенным заводом изготовителем, мы получаем экономически не эффективное сжигание топлива, не полное сжигание топлива, что приводит к повышению концентраций вредных веществ в уходящих газах, а так же внутри топки котла. Повышение оксидов азота, из-за увеличения коэффициента избытка воздуха, приводит к преждевременному выходу из строя экранных труб котла.

Тарировка форсунок - процесс проверки форсунок на различные производственные характеристики, такие как дисперсность распыла, угол раскрытия распыливающей смеси, объем распыливающей смеси в единицу времени и др. с целью сравнения с заводскими параметрами. Процедуру

тарировки необходимо проводить для выявления: заводского брака, устаревшего оборудования, не достаточно подготовленного в ходе ремонта (неправильная сборка, чистка). Данная процедура производится перед установкой форсунок на котельное оборудование на специальном водяном стенде при давлении, близком или равном к рабочему. Согласно Правил технической эксплуатации электрических станций и сетей Российской Федерации (тепловых энергоустановок, ОПО работающих под давлением) форсунки, работающие на жидком топливе, перед установкой на место должны быть испытаны на водяном стенде в целях проверки их производительности, качества распыливания и угла раскрытия факела. Разница в номинальной производительности отдельных форсунок в комплекте, устанавливаемом на мазутный котел, должна быть не более 1,5%. Применение нетарированных форсунок не допускается.

Наиболее полный стенд, с точки зрения приближения к котельному оборудованию, запатентован полезной моделью №170700 U1 от 5 марта 2017 г. – «Стенд для тарировки мазутных форсунок». В данном стенде нами было обнаружен недостаток в части фиксирования воздушно-воздушной смеси в «камере сгорания» с помощью видеокамеры и координатных линеек. Нам пришла идея для этих целей воспользоваться тепловизором, который осуществляет фиксацию облака даже самых мелкодисперсных капель и будет давать нам более полную картину распыления «факела».

Так же, в связи с имеющей большую актуальность газообразного топлива, возникла идея дополнить стенд возможностью фиксировать газозоодушную смесь, для этого был добавлен воздухоподогреватель. Теперь данный стенд может тарировать не только форсунки для жидкого топлива, но и для газообразного.

Данные идеи оформлены в заявку, и переданы в Федеральный Институт Промышленной Собственности для получения патента на полезную модель. Схема патентуемой установки представлена на рисунке 1.

Назначение и взаимодействие узлов и элементов в тарировочном стенде следующие: камера 2 предназначенная для удерживания распыленной диспергированной и закрученной воздушно-водяной смеси 17 во взвешенном состоянии, имитирующей факел воздушно-топливной смеси в топке котла.

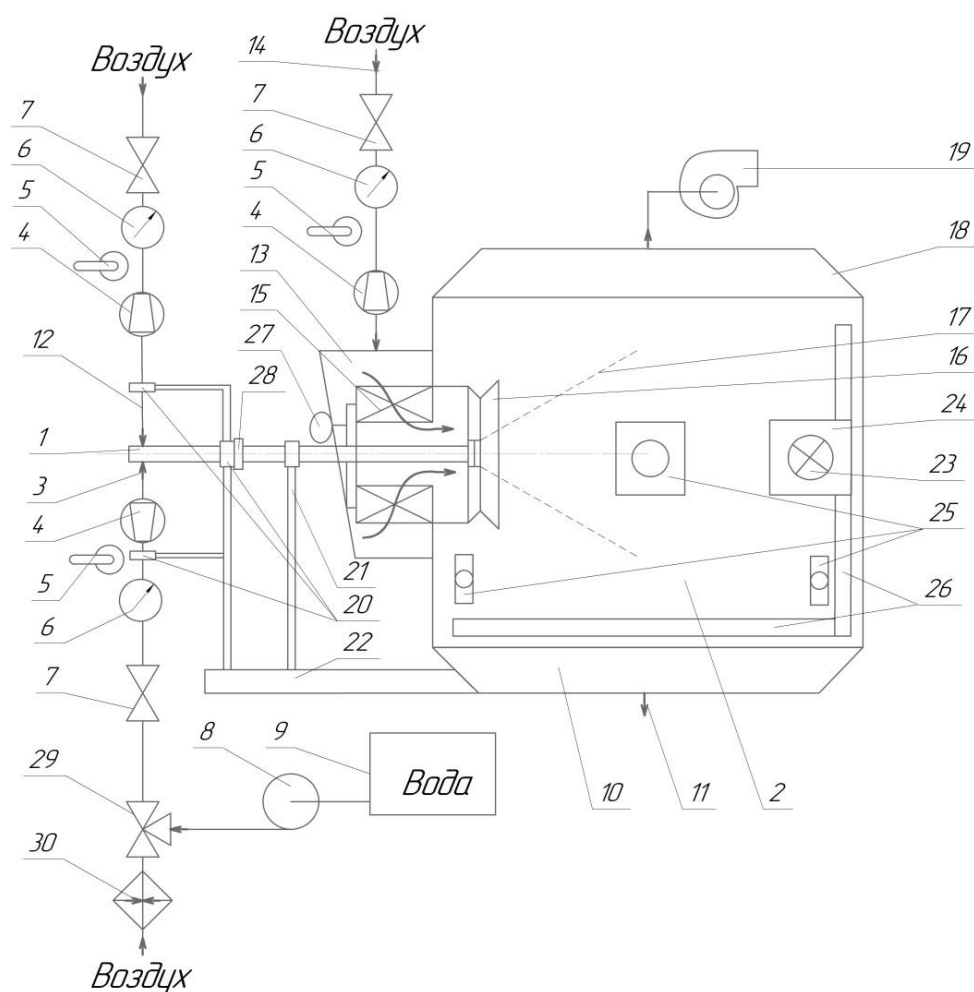


Рисунок 1 – Стенд для тарировки мазутных и газовых форсунок

Труба 3 для подачи воды или подогретого через теплообменник 30 воздуха, с расходомером 4, термометром 5, манометром 6 и запорно-регулирующим вентилем 7. Электрический насос 8 подает воду из бака воды 9 после прохождения через форсунку 1 и пребывания в виде мелко раздробленных частиц во взвешенном состоянии в камере в виде «холодного тумана» вода конденсируется и стекает в поддон 10, откуда стекает через трубу слива 11 в отстойник для последующего использования. При необходимости осуществлять моделирование газообразного топлива, используется трехходовой кран 29, для прекращения подачи воды из бака, для подачи подогретого воздуха от теплообменника подаваемого из ресивера и нагнетаемого компрессором при различных давлениях.

С помощью трубопровода 12 для подачи распыливающего воздуха производится дробление капель воды потоком воздуха непосредственно в форсунке.

Приемный воздушный короб 13, выполненного идентично коробу горелок на котле, служит для равномерного подвода по окружности воздуха, подаваемого через трубопровод 14 на лопатки завихрителя 15, который создает закрученные струи воздуха для дальнейшего перемешивания частиц жидкости с воздухом. В окончательном виде образуется диспергированная и закрученная воздушно-водяная смесь, моделирующая аэродинамику струи факела в топке котла. Параметры этой взвеси: диаметр, длина, конрисунокурация факела и размер микрочастиц в этой факельной струе, регистрируются тепловизором через смотровые окна в камере впрыска и с помощью оптических датчиков координатных линеек 26.

Поворот лопаток завихрителя производится механическим узлом 27. Воздух в трубопровод подается от ресивера компрессора. Диффузор 16 служит для первоначального развертывания под определенным углом выхода диспергированной и закрученной воздушно-водяной смеси от торца форсунки.

Вытяжной короб 18 и электровентилятор 19 служат для выброса избыточных воздушно-капельных взвесей в атмосферу и моделируют разрежение в топке котла.

Кронштейны 20 служат для фиксации на стойках 21 для поддержания веса форсунки при ее размещении на стенде, и веса трубопроводов. Стойки и поддон камеры впрыска фиксируются на основании 22. Узел 28 механического осевого перемещения форсунки позволяет изменять направление корпуса форсунки при ее продольном движении. Защитный колпак 24 предохраняет лампу 23 от попадания на нее капель воды.

От линейного расстояния по оси торца форсунки относительно пережима диффузора (пережим - наименьший диаметр диффузора) зависит угол раскрытия факела - диспергированной и закрученной воздушно-водяной (воздушно-воздушной) смеси и длина факела, которая необходима для полного выгорания мазута (газа) в реальных условиях. В известном стенде эта оптимальная длина определяется не в полной мере, так как отклонение «оседания» капель водно-воздушной смеси не даёт точную картину «факела» и, следовательно, в реальных условиях горение топлива в топке невозможно точно установить оптимальное положение торца форсунки относительно диффузора амбразуры топки котла и исключить недогорание мазута в топке. Это является положительным эффектом заявляемого стенда по отношению к известной конструкции.

Заявляемая конструкция стенда работает следующим образом. Тарированная форсунка устанавливается в направляющих кронштейнах и крепится в узле механизированного осевого перемещения форсунки.

Уплотняется место прохода форсунки через приемный воздушный короб. К форсунке подсоединяются трубы подачи воды (нагретого воздуха), трубопроводы для подачи распыливающего воздуха.

Включаются последовательно вентилятор выброса влажного (подогретого) воздуха, лампа, подача воздуха в приемный воздушный короб и на лопатки завихрителя, подача воздуха в форсунку, подача воды (подогретого воздуха) по трубе в форсунку.

В форсунке происходит дробление воды на капли с помощью распыливающего воздуха и давления воды (подогретого воздуха) и последующая закрутка смеси потоком воздуха, выходящим после лопаток завихрителя.

В смотровых окнах (по очереди с 3х сторон) производится фото/видео регистрация с помощью тепловизора регистрируются длина, диаметр и границы конрисунокурация модельного факела, которые получаются в результате дробления капель воды в форсунке при заданном положении относительно диффузора среза форсунки, отмечаемого с помощью узла механизированного осевого перемещения форсунки.

Полученная информация с тепловизора, значения давления, температуры, расходы распыливающего воздуха, воды (подогретого воздуха) и значения углов расположения лопаток крутки воздуха фиксируются.

На основании этих данных в табличной и графической форме по компьютерной программе строятся зависимости расхода от давления воды и воздуха, диаметра капель от давления воды и воздуха, длины и диаметра модельного факела от давления воды (нагретого воздуха) и воздуха, в зависимости от направления крутки воздуха на лопатках и положения торца форсунки относительно диффузора. Выбирается оптимальное положение торца форсунки относительно диффузора, при котором получается необходимая длина и диаметр факела и мелкодисперсность дробления жидкости. Затем производится перерасчет расходных и регулировочных характеристик форсунки с модельной среды - воды на мазут, (нагретого воздуха на газ).

Процедура тарировки форсунки имеет неоспоримое значение для осуществления экономичного и качественного сжигания топлива в котле энерго-

хозяйства. При тарировании форсунки, мы имеем возможность исключить из работы не работоспособные экземпляры, или своевременно устранить неисправность. При правильно настроенной и оттарированной форсунки мы добиваемся: экономии топлива, равномерности поля распыла топливно-воздушной смеси, уменьшаем процент недожога топлива, уменьшаем загрязнение окружающей среды, а так же сокращаем расход материальных средств на преждевременный, дорогостоящий ремонт топки котла с заменой экранных труб.

Список литературы

1. Кадцын, И. И. Экономический анализ использования теплотрансформаторов на объектах ОАО «РЖД» в Сибирском Федеральном округе / И. И. Кадцын, А. П. Стариков. – Текст : непосредственный // Инновационные проекты и технологии в образовании, промышленности и на транспорте : материалы научной конференции, посвященной Дню Российской науки. / отв. ред. И. И. Галиев. – Омск : Омский гос. ун-т путей сообщения, 2020. – С. 151–160. – ISBN 978-5-949-41255-8.
2. Хороших, О. В. Исследование возможности улучшения технико-экономических показателей теплообеспечения индивидуальных потребителей / О. В. Хороших, А. П. Стариков, И. И. Кадцын. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2019. – № 4 (40). – С. 86–95.
3. Патент № 70700 U1 Российская Федерация, МПК G01F 25/00 (2006.01). Стенд для тарировки мазутных форсунок : № 2016135455 : заявлено 31.08.2016 : опубликовано 03.05.2017 / Таймаров М. А., Лавирко Ю. В., Ахметова Р. В.; патентообладатель Казанский гос. архитектурно-строительный ун-т. – 1 с. – Текст : непосредственный.
4. Патент № 105438 U1 Российская Федерация, МПК G01F 25/00 (2006.01). Стенд для тарировки мазутных форсунок : № 2011102660/28 : заявлено 24.01.2011 : опубликовано : 10.06.2011 / Таймаров М. А., Мазитов А. И.; патентообладатель Казанский гос. архитектурно-строительный ун-т. – 14 с. : ил. – Текст : непосредственный.
5. Адамов, В. А. Сжигание мазута в топках котлов / В. А. Адамов. – Санкт-Петербург : Недра, 1989 г. – 304 с. – Текст : непосредственный.
6. Экология / В. Н. Большаков, В. В. Качак, В. Г. Коберниченко [и др.] ; под. ред. Тягунов Г. В., Ярошенко Ю. Г. – Изд. 2-е., перераб. и доп. – Москва : Логос, 2013. – 504 с. – Текст : непосредственный.

7. Филиппова, Т. А. Оптимизация режимов электростанций и энергосистем / Т. А. Филиппова, Ю. М. Сидоркин, А. Г. Русина. – Изд. 2-е. – Новосибирск : Новосибирский гос. технический университет, 2016. – 359 с. – Текст : непосредственный.

8. Стрелков, А. К. Охрана окружающей среды и экология гидросферы / А. К. Стрелков, С. Ю. Теплых. – Изд. 2-е., перераб. и доп. – Самара : Самарский гос. архитектурно-строительный ун-т, 2013. – 488 с. – Текст : непосредственный.

9. Скобелев, Д. О. Наилучшие доступные технологии : учебное пособие / Д. О. Скобелев, Б. В. Боравский, О. Ю. Чечеватова. – Москва : Академия стандартизации, метрологии и сертификации, 2015. – 176 с. – Текст : непосредственный.

10. Иссерлин, А. С. Газовые горелки : практическое пособие / А. С. Иссерлин. – Изд. 2-е, перераб. и доп. – Москва : Недра, 1966. – 234 с. – Текст : непосредственный.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Стариков Александр Петрович

Омский государственный университет
путей сообщения (ОмГУПС).
Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046,
Российская Федерация.
Кандидат технических наук, доцент,
заведующий кафедрой «Теплоэнергетика»
ОмГУПС.
Телефон: +7 (3812) 31-06-23
E-mail: StarikovAP@omgups.ru

Москвина Елена Владимировна

Омский государственный университет
путей сообщения (ОмГУПС).
Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046,
Российская Федерация.
Аспирант кафедры «Теплоэнергетика»
ОмГУПС.
Тел.: +7 (960) 994-82-19.
E-mail: moskvina-ev@bk.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Starikov Alexander Petrovich

Omsk State Transport University (OSTU).
35, Marx st., Omsk, 644046,
the Russian Federation.
Ph. D. in Technical Sciences, associate
Professor, head of the department «Heat power
engineering» OSTU.
Phone: +7 (3812) 31-06-23.
E-mail: StarikovAP@omgups.ru.

Moskvina Elena Vladimirovna

Omsk State Transport University (OSTU).
35, Marx st., Omsk, 644046,
the Russian Federation.
Postgraduate student of the department
«Heat Power engineering» OSTU.
Phone: +7 (960) 994-82-19.
E-mail: moskvina-ev@bk.ru.

Секция 5 «Цифровые технологии, алгоритмы и программное обеспечение автоматизированных систем измерений, контроля и диагностики»

УДК 656.25

П. М. Меркулов, В. С. Кузьмин

Акционерное общество «Научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт информатизации, автоматизации и связи на железнодорожном транспорте» (АО «НИИАС»),
г. Москва, Российская Федерация

К ВОПРОСУ О ДИАГНОСТИКЕ ЛОКОМОТИВНЫХ УСТРОЙСТВ АЛСН

В работе на основе существующих тенденций развития локомотивных устройств безопасности рассматриваются вопросы совершенствования процесса технического обслуживания релейной локомотивной аппаратуры автоматической локомотивной сигнализации непрерывного действия (АЛСН). Проведен анализ возможностей реализации алгоритмов предиктивной диагностики. По результатам проведенного исследования предложена структура устройства предиктивной диагностики локомотивной аппаратуры АЛСН.

Ключевые слова: автоматическая локомотивная сигнализация, диагностика.

Pavel M. Merkulov, Vladislav S. Kuz'min

Research and design institute for information technology, signaling and telecommunications
in railway transportation (JSC NIIAS), Moscow, the Russian Federation

TO THE QUESTION ABOUT DIAGNOSTICS OF LOCOMOTIVE DEVICES ALSN

Based on existing trends in the development of locomotive safety devices, the paper considers the issues of improving the maintenance process of relay locomotive equipment of continuous automatic locomotive signaling (ALSN). The analysis of the possibilities of implementing predictive diagnostic algorithms is carried out. According to the results of the study, the structure of the predictive diagnostics device of locomotive equipment ALSN is proposed.

Keywords: automatic locomotive signaling, diagnosis.

Функционирование локомотивных устройств безопасности, в том числе устройств автоматической локомотивной сигнализации непрерывного действия

(АЛСН), осуществляется в сложной помеховой обстановке. В случае, если параметры элементов локомотивных устройств безопасности в процессе эксплуатации выходят за границы диапазона допустимых значений, происходят сбои в ее работе, которые могут приводить как к экономическим издержкам, так и к снижению уровня безопасности движения поездов.

Одним из наиболее перспективных направлений снижения числа сбоев в работе локомотивных устройств безопасности является совершенствование процесса их технического обслуживания, включая применение искусственного интеллекта и технологии BigData. На базе искусственного интеллекта предполагается развитие алгоритмов предиктивной диагностики с полной автоматизацией процесса самодиагностики, основной целью которого является внедрение локомотивных устройств безопасности, не требующих регулярного обслуживания [1]. Следует, однако, отметить, что применение указанных технологий и алгоритмов для совершенствования диагностики релейной локомотивной аппаратуры АЛСН до настоящего момента в открытых источниках широко не рассматривалось.

В соответствии с вышеизложенным, целью настоящей работы является рассмотрение возможности применения принципов предиктивной диагностики для совершенствования процесса технического обслуживания релейных локомотивных устройств АЛСН.

Релейные локомотивные устройства АЛСН представляют собой в общем случае совокупность соединенных последовательно приемных катушек и размещенных в общем ящике локомотивного усилителя и дешифратора. Указанный состав аппаратуры характерен для тяги постоянного тока. При тяге переменного тока между приемными катушками и локомотивным усилителем включается локомотивный фильтр. При этом следует отметить, что для измерения доступны следующие параметры:

- напряжение питания локомотивных устройств АЛСН;
- суммарная величина напряжения, наведенная в приемных катушках (при тяге переменного тока может рассматриваться и как напряжение на входе локомотивного фильтра);
- величина напряжения на входе локомотивного усилителя (при тяге переменного тока может рассматриваться и как напряжение на выходе локомотивного фильтра);

- состояние контактов импульсного реле ИР локомотивного усилителя, определяющее сигналы, поступающие на вход локомотивного дешифратора;
- текущее показание локомотивного светофора, определяемое локомотивным дешифратором;
- фиксация нажатия рукоятки бдительности;
- фиксация осуществления дешифратором проверки бдительности машиниста;
- состояние контактов скоростемера.

Указанные параметры, среди прочего, позволяют осуществить расчет ряда важных эксплуатационных характеристик релейной локомотивной аппаратуры АЛСН. Так может быть осуществлен расчет времени реакции машиниста на проверку бдительности, длительность периода проверки бдительности машиниста, периода кодовой комбинации и как следствие - типа кодового путевого транзиттера (КПТ), время замедления на отпускание реле соответствия СР локомотивного дешифратора и время смены показания локомотивного светофора.

Последние две рассчитываемые характеристики в целом позволяют оценить уровень помехоустойчивости работы комплекта локомотивной аппаратуры АЛСН. Однако, указанные параметры позволяют лишь идентифицировать блок, параметры элементов которого отличаются от диапазона допустимых значений.

Следует также отметить, что повышение глубины диагностики (т.е. возможность выявления отдельных элементов внутри блока аппаратуры, имеющих параметры вне диапазона допустимых значений) в значительной степени затруднено. Во-первых, это связано с тем, что внешние выводы каждого из блоков аппаратуры позволяют получить ограниченную информацию о работе отдельных элементов. В ряде случаев, получить с их помощью информацию об отдельных элементах не представляется без специальных тестовых воздействий в принципе. А, во-вторых, для подключения к отдельным элементам или группам элементов требуется доступ внутрь корпуса. Так, например, может быть получен доступ к вспомогательному разъему дешифратора. Однако это сопряжено с модификацией самих блоков релейной локомотивной аппаратуры АЛСН, что ведет к значительному удорожанию устройства, реализующего алгоритмы предиктивной диагностики. С другой стороны, потребность в такой глубине

диагностики в условиях эксплуатации в большинстве случаев отсутствует и может быть заменена более детальной диагностикой посредством специализированных стендов как в условиях контрольных пунктов АЛСН, так и контрольно-ремонтных пунктов депо отдельных блоков, для которых выявлено, что основные их параметры не соответствуют установленным нормативным значениям [2].

Таким образом, сущность применения алгоритмов предиктивной диагностики применительно к релейным локомотивным устройствам АЛСН заключается в непрерывной фиксации указанных параметров и характеристик работы локомотивной аппаратуры АЛСН: измерения рабочих воздействий на входе аппаратуры (приемных катушках) и соответствующих реакций каждого из блоков аппаратуры (фильтра ФЛ-25/75, усилителя УК-25/50 и дешифратора ДКСВ и их модификаций). При этом, например, для релейного дешифратора представляется возможным осуществлять измерения временных параметров работы каждого из реле в каждом цикле работы дешифратора. Полученные результаты измерений должны быть соответствующим образом проанализированы с тем, чтобы сформировать и передать специалистам производственных участков Дирекции по ремонту тягового подвижного состава (ТРПУ) рекомендации по техническому обслуживанию и ремонту.

На основе вышеизложенного представляется возможным составить обобщенную функциональную схему устройства предиктивной диагностики релейной локомотивной аппаратуры АЛСН (рисунок 1).

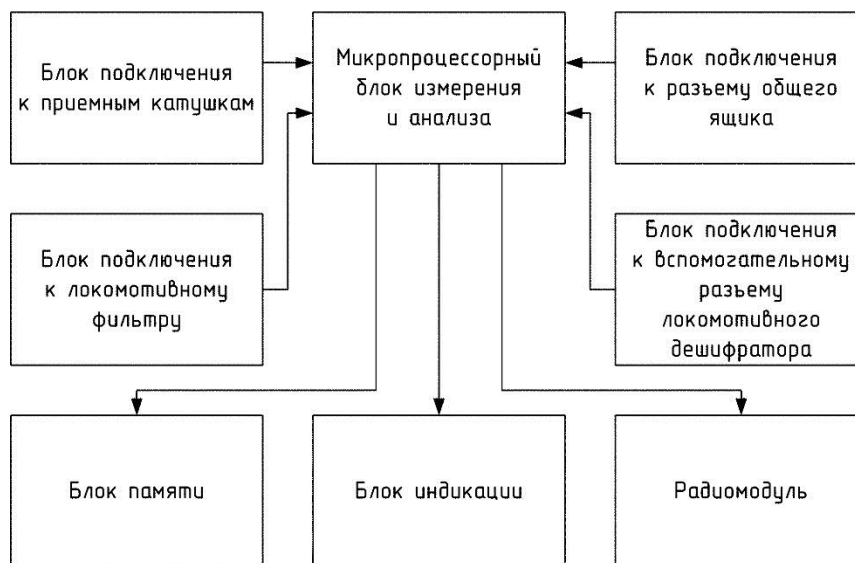


Рисунок 1 – Обобщенная функциональная схема устройства предиктивной диагностики релейных локомотивных устройств АЛСН

Устройство предиктивной диагностики релейной локомотивной аппаратуры АЛСН, размещаемое на единице тягового железнодорожного подвижного состава, следует подключать к локомотивной аппаратуре АЛСН однократно, в момент установки. Устройство получает питание от аккумуляторной батареи тягового железнодорожного подвижного состава.

Собирая информацию от каждого из блоков релейной локомотивной аппаратуры АЛСН, микропроцессорный блок измерения и анализа осуществляет сопоставление измеренных параметров и рассчитанных на их основании характеристик. Далее осуществляется их сравнение с соответствующими параметрами, получаемыми от идеальной модели. На основании поведения реальной аппаратуры и характеристик, получаемых от идеальной модели, формируется прогноз момента времени, когда параметры отдельного блока или группы блоков релейной аппаратуры АЛСН выйдут за пределы допустимых значений.

Указанный прогноз может быть передан к блоку индикации, на котором в режиме реального времени осуществляется отображение состояния как каждого из блоков релейной аппаратуры АЛСН, так и комплекта в целом. Более детально прогноз, а также измеренные параметры и рассчитанные характеристики сохраняются в блоке памяти, что позволяет в дальнейшем определять, в том числе и условия возникновения сбоя в работе релейной локомотивной аппаратуры АЛСН. Для связи с внешними системами с целью оперативного информирования причастного персонала устройство предиктивной диагностики релейной локомотивной аппаратуры АЛСН содержит радиомодуль, обеспечивающий передачу протоколов о работе комплекта аппаратуры по беспроводному каналу передачи информации.

В ходе работы специалистами АО «НИИАС» была подготовлена заявка, по которой был получен патент на изобретение [3]. В настоящее время сформулированы технические требования к устройству предиктивной диагностики релейной локомотивной аппаратуры АЛСН и ведутся переговоры с заводом изготовителем и потенциальными заказчиками.

Список литературы

1. Концепция развития локомотивных устройств безопасности : утверждена распоряжением ОАО «РЖД» от 28.01.2019 г. №123/р. – Текст : непосредственный.

2. Табунщиков, А. К. Новые принципы и направления работ по повышению помехоустойчивости АЛСН / А. К. Табунщиков, Ю. А. Барышев, С. М. Якимов. – Текст : непосредственный // Проблемы безопасности на транспорте : материалы VIII Междунар. науч.-практ. конф., посвященной году науки: в 2 ч. Ч. 1 / Белорус. гос. ун-т транспорта ; под общ. ред. Ю. И. Кулаженко. – Гомель, 2017. – С. 201–202.

3. Пат. 2715101 Российская Федерация, МПК⁷ В 61 L 25/02, В 61 L 15/00. Устройство контроля и предиктивной диагностики бортовой аппаратуры автоматической локомотивной сигнализации непрерывного действия : № 2019119574 : заявлено 24.06.19 : опубликовано 25.02.20 / Кузьмин В. С., Меркулов П. М.; заявитель и патентообладатель Акционерное общество «Научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт информатизации, автоматизации и связи на железнодорожном транспорте». – 17 с.: ил. – Текст : непосредственный.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Меркулов Павел Михайлович

Акционерное общество «Научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт информатизации, автоматизации и связи на железнодорожном транспорте» (АО «НИИАС»).

Нижегородская ул., 27 стр. 1, г. Москва, 109029, Российская Федерация.

Заместитель руководителя центра.

Тел.: + 7(916)709-3109.

E-mail: p.merkylov@vniias.ru.

Кузьмин Владислав Сергеевич

Акционерное общество «Научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт информатизации, автоматизации и связи на железнодорожном транспорте» (АО «НИИАС»).

Нижегородская ул., 27 стр. 1, г. Москва, 109029, Российская Федерация.

Ведущий специалист.

Тел.: +7(903)709-0586.

E-mail: vs.kuzmin@vniias.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Merkulov Pavel Mihajlovich

Research and design institute for information technology, signaling and telecommunications in railway transportation (JSC NIIAS).

27 bldg 1 Nizhegorodskaya St., Moscow, 109029, the Russian Federation.

Deputy Head of the Center.

Phone: + 7(916)709-3109.

E-mail: p.merkylov@vniias.ru.

Kuz'min Vladislav Sergeevich

Research and design institute for information technology, signaling and telecommunications in railway transportation (JSC NIIAS).

27 bldg 1 Nizhegorodskaya St., Moscow, 109029, the Russian Federation.

Leading Specialist.

Phone: +7(903)709-0586.

E-mail: vs.kuzmin@vniias.ru.

О. И. Гордеев, В. А. Захаренко

Омский государственный технический университет (ОмГТУ), г. Омск, Российская Федерация

**ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ОБРАБОТКИ ПАРАМЕТРОВ
ПОТРЕБЛЯЕМОЙ МОЩНОСТИ ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ
ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ АГРЕГАТОВ**

Сформулированы основные требования к разрабатываемому программно-аппаратному комплексу для его использования в задаче проведения исследований с целью сравнения различных методов диагностики электромеханических агрегатов по параметрам потребляемой электрической мощности. Представлена функциональная схема программного обеспечения для измерительного блока комплекса и описаны основные алгоритмы его работы. Обоснованы технические требования к входным измеряемым сигналам.

Ключевые слова: диагностика электромеханического оборудования, программно-аппаратный комплекс, спектральный анализ, токовая диагностика.

Oleg I. Gordeev, Vladimir A. Zakharenko

Omsk State Technical University (OmSTU), Omsk, the Russian Federation

**SOFTWARE FOR PROCESSING OF ELECTRICAL POWER
CONSUMPTION PARAMETERS FOR DIAGNOSTICS OF
ELECTROMECHANICAL UNITS**

The main requirements for the software and hardware complex that is currently being developed for its use in the task of conducting researches in order to compare various diagnostic methods of electromechanical units by the electrical power consumption parameters are formulated. The functional diagram of the software for the measuring unit of the complex is presented and the main algorithms of its operation are described. The technical requirements for the input measured signals are justified.

Keywords: diagnostics of electromechanical equipment, software and hardware complex, motor current signature analysis.

В настоящее время в ОмГТУ выполняется научно-исследовательская работа (далее – НИР) с целью разработки метода технического

диагностирования электромеханических агрегатов по параметрам потребляемой электрической мощности. Целью метода является выявление дефектов, из-за которых происходят отказы в работе электромеханических агрегатов, при этом алгоритм программного обеспечения предполагает использование минимально возможного количества диагностических параметров [1].

Одной из задач, решаемых в рамках указанной НИР, является проведение экспериментальных исследований для сравнения существующих и разрабатываемых методов диагностики. Для решения поставленной задачи планируется создание стационарного программно-аппаратного комплекса для измерения параметров потребляемой электрической мощности электромеханических агрегатов. Актуальность разработки комплекса и его функциональные схемы представлены в работе [2].

Для обеспечения корректности сравнения различных методов диагностики необходимо, чтобы они были применены к одним и тем же наборам исходных данных, получаемых путем измерения мгновенных значений токов и напряжений в цепи питания электромеханического агрегата. Следовательно, результаты измерений программно-аппаратного комплекса должны удовлетворять требованиям сразу всех методов диагностики, которые предполагается сравнивать.

Для методов диагностики, основанных на анализе спектра потребляемого тока или активной мощности, одним из наиболее важных параметров является амплитудно-частотная характеристика измерительного устройства, а точнее – ширина полосы пропускания. В работе [3] отмечается, что по мере появления и развития дефектов электромеханического агрегата, наблюдается изменение относительных величин нечетных гармонических составляющих тока статора. При этом для количественной оценки текущего состояния оборудования считается достаточным контролировать параметры гармоник вплоть до одиннадцатой. В работе [4] подчеркивается, что (для двигателя с частотой питающей сети 50 Гц) при наличии эксцентриситета воздушного зазора характерные частотные составляющие могут быть обнаружены в диапазоне частот от 200 до 1500 Гц. Учитывая также необходимость учета влияния изменения питающего напряжения на результаты анализа [5], в программно-аппаратном комплексе следует предусмотреть возможность контроля качества потребляемой электроэнергии. Согласно ГОСТ 32144-2013 [6], для этого

требуется контролировать коэффициенты гармонических составляющих до сорокового порядка. Тогда, на основании всего вышеизложенного, требуется обеспечить полосу пропускания как минимум до 2 кГц.

Другим важным параметром для методов спектрального анализа является разрешающая способность по частоте (df). Для конкретной программной реализации этот параметр определяется по формуле [7]:

$$df = f_{\text{дискр}} / N, \quad (1)$$

где $f_{\text{дискр}}$ – частота дискретизации, Гц; N – величина выборки измеренных мгновенных значений, шт.

Согласно имеющимся данным [4, 5], в отдельных случаях, для однозначной идентификации наличия или отсутствия отдельных частотных составляющих, может потребоваться разрешающая способность до 0,01 Гц.

Для обеспечения корректной цифровой обработки измеренных сигналов частота дискретизации должна быть как минимум вдвое больше, чем максимальная рабочая частота плюс небольшой запас на переходную полосу цифрового фильтра [7]. Согласно ГОСТ 32144-2013 [6] предельно допустимое отклонение частоты питающей сети составляет 5 Гц, тогда максимальный запас на переходную полосу равен 45 Гц, а наибольшая рабочая частота (сороковая гармоника) – 2,2 кГц. Следовательно, частота дискретизации должна быть не меньше, чем 4 490 Гц.

Для вышеописанных условий из формулы (1) может быть найдена минимальная величина выборки:

$$N = f_{\text{дискр}} / df = 4\,490 / 0,01 = 449\,000.$$

Учитывая получившийся размер выборки, было принято решение использовать алгоритм Быстрого Преобразования Фурье (далее – БПФ) [7] для снижения вычислительных затрат при разложении измеренного сигнала в спектр. Особенностью данного алгоритма является то, что величина выборки должна быть равна числу, полученному в результате возведения двойки в натуральную степень [7]. Следовательно, для получения требуемой разрешающей способности, необходима выборка величиной:

$$N' = 2^{19} = 524\,288.$$

Тогда, частота дискретизации из формулы (1) может быть найдена как:

$$f_{\text{дискр}}' = df \cdot N' = 0,01 \cdot 524\,288 = 5\,242,88 \text{ Гц}.$$

Таким образом, частота дискретизации при измерениях должна находиться в пределах от 4 490 до 5 242,88 Гц, в противном случае либо не будет

обеспечена требуемая разрешающая способность, либо придется увеличивать выборку в два раза. Согласно [7], при недостаточном количестве отсчетов в выборке ее можно дополнить нулями, это даст дополнительную информацию о форме спектра, но не позволит различать близкорасположенные частотные составляющие, поэтому для задач диагностирования представляется необходимым формировать выборку целиком из измеренных мгновенных значений. Подобный подход требует дополнительной проработки решений по организации хранения и передачи измерительной информации в рамках принятого разделения программно-аппаратного комплекса на измерительный блок и блок обработки [2].

Время формирования выборки необходимого размера N' , в зависимости от частоты дискретизации, будет равно:

$$t_{N'_{\text{мин}}} = N' / f_{\text{дискр}} = 524\,288 / 5\,242,88 = 100 \text{ с} ,$$

$$t_{N'_{\text{макс}}} = N' / f_{\text{дискр}} = 524\,288 / 4\,490 = 116,768 \text{ с} .$$

Размер выборки в байтах будет зависеть от разрядности используемого аналого-цифрового преобразователя (далее – АЦП). В качестве граничных значений примем 16 и 24 бита, так как меньшая разрядность не позволяет обеспечить требуемую точность измерений, а промышленно выпускаемые АЦП большей разрядности являются дорогостоящими. Тогда:

$$16 \cdot N' = 16 \cdot 524\,288 = 2^4 \cdot 2^{19} = 2^{23} \text{ бит} = 2^{20} \text{ байт} = 1 \text{ Мбайт} ,$$

$$24 \cdot N' = 24 \cdot 524\,288 = 3 \cdot 2^3 \cdot 2^{19} = 3 \cdot 2^{22} \text{ бит} = 3 \cdot 2^{19} \text{ байт} = 1,5 \text{ Мбайта} .$$

Измерения тока статора для спектрального анализа с целью диагностики, как правило, выполняются только на одной из фаз [5]. Однако, во-первых, существуют методы диагностики, в которых для определения наличия или отсутствия дефекта требуется производить математическую обработку мгновенных значений тока по всем трем фазам (например, анализ с применением вектора Парка [2, 5]); во-вторых, для учета влияния изменения сетевого напряжения на результаты диагностики, необходимо иметь максимально возможно полную информацию о процессах в цепи питания электромеханического агрегата. Следовательно, существует необходимость записи мгновенных значений тока и напряжения по всем трем фазам во время формирования выборки. Таким образом, рассчитанные ранее возможные размеры выборок необходимо увеличить в шесть раз, получив 6 и 9 Мбайт соответственно.

Учитывая, что измерительный блок программно-аппаратного комплекса

должен поддерживать режим автономной работы в течение как минимум месяца [2], а также принимая во внимание вероятность потери данных при передаче по каналу связи, представляется очевидной необходимость хранения выборок в энергонезависимой памяти измерительного блока. При выборке размером 9 Мбайт и двух записях в сутки в течение тридцати дней, требуемый объем памяти составит: $9 \cdot 2 \cdot 30 = 540$ Мбайт. Учитывая стандартные объемы коммерчески реализуемых накопителей, потребуется элемент с 1024 Мбайтами памяти, объем которой позволит хранить 113 выборок размером 9 Мбайт.

Для практического применения программно-аппаратного комплекса следует также предусмотреть возможность проверки метрологических характеристик измерительного блока, так как только в таком случае можно будет хотя бы приблизительно определить точность расчета диагностических параметров, и соответственно, формулировать выводы о точности определения степени развития неисправности тем или иным методом диагностирования. Так как исходными данными для любого метода диагностирования по параметрам потребляемой электрической мощности являются мгновенные значения тока и напряжения [2], то требуется осуществлять проверку погрешности измерения именно их. В то же время, существующие методики проверки точности электроизмерительного оборудования предполагают формирование эталонного сигнала постоянного или переменного тока с известными параметрами, который измеряется испытуемым прибором, с последующим сравнением результата измерений и параметров эталонного сигнала. Отсюда следует, что измерительный блок программно-аппаратного комплекса должен рассчитывать на основе мгновенных значений некоторый набор параметров, удобных для проведения проверки метрологических характеристик, что позволит дать оценку точности измерения самих мгновенных значений. В качестве такого набора параметров предлагается среднеквадратичное и амплитудное значения на основной, двадцатой и сороковой гармонике (имеются в виду частоты 50, 1000 и 2000 Гц), а также среднее значение входного сигнала для каждого из шести входных параметров. Это позволит контролировать как точность измерения мгновенных значений, так и частотную характеристику измерительного блока.

Обобщая все вышеизложенное, а также технические решения, упомянутые в работе [2], была разработана функциональная схема программного обеспечения измерительного блока, приведенная на рисунок 1.

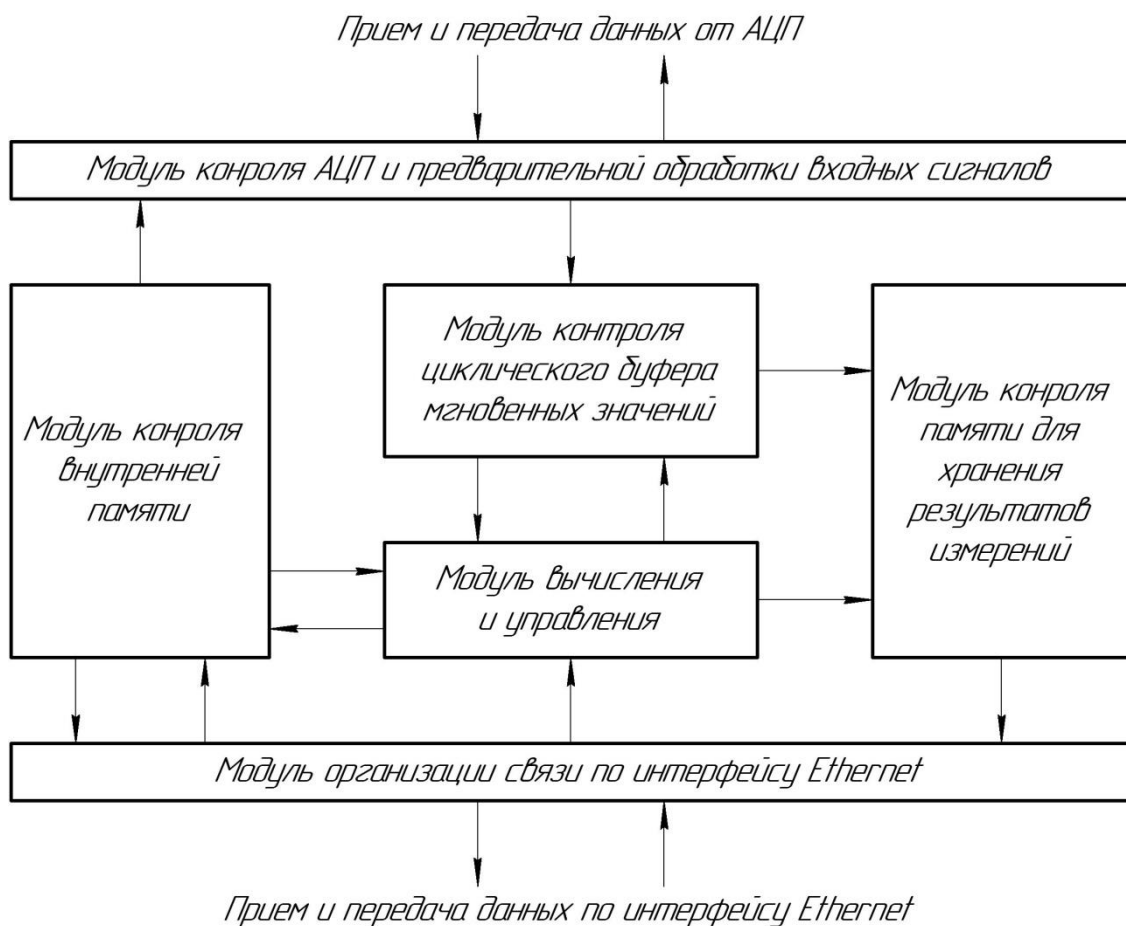


Рисунок 1 – Функциональная схема программного обеспечения измерительного блока

В работе программного обеспечения измерительного блока можно выделить следующие процессы:

- инициализация – настройка и запуск составных модулей (выполняется один раз после включения измерительного блока);
- ожидание запроса по интерфейсу связи и его последующая обработка с выполнением требуемых действий (после завершения инициализации процесс осуществляется постоянно и непрерывно);
- получение текущих мгновенных значений от АЦП, их корректировка и запись в циклический буфер (после завершения инициализации процесс осуществляется постоянно и непрерывно);
- расчет параметров входных сигналов на основе мгновенных значений и запись результатов в энергонезависимую память (процесс запускается или останавливается через интерфейс связи);
- формирование выборки – модуль вычисления и управления формирует управляющий сигнал (по определенному событию; подробнее – см. в работе

[2]), после чего содержимое циклического буфера начинает транслироваться в энергонезависимую память до тех пор, пока не будет сформирована выборка требуемого объема; дополнительно присваивается метка времени начала и окончания процесса [2].

Внутренняя память, как и память для хранения результатов измерений является энергонезависимой и предназначена для хранения настроечных коэффициентов, используемых для предварительной обработки мгновенных значений с целью корректировки ошибок смещения и усиления АЦП и других элементов измерительной схемы [2].

Разработанная функциональная схема программного обеспечения при условии соблюдения сформулированных в данной работе требований позволит применять разрабатываемый программно-аппаратный комплекс для экспериментальных исследований с целью сравнения различных методов диагностики электромеханических агрегатов по параметрам потребляемой электрической мощности.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-38-90166.

Список литературы

1. Сведения о начинаемой научно-исследовательской работе №AAAA-A19-119103090012-1 // ЕГИСУ НИОКТР: сайт. – URL: <https://www.rosrid.ru/nioctr/FV1CAEDD3CCG5FOLNX4QKC1Z> (дата обращения: 28.09.2020). – Текст: электронный.
2. Gordeev, O. I. Diagnostics of electromechanical equipment by electrical power consumption parameters / O. I. Gordeev, V. A. Zakharenko. – Text: electronic // Journal of Physics: Conference Series. – 2020. – № 012014. – Vol. 1546. – URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1546/1/012014>. – Дата публикации: 10.05.2020. – DOI: 10.1088/1742-6596/1546/1/012014.
3. Баширов, М. Г. Оценка поврежденности насосных агрегатов по значениям параметров гармоник токов и напряжений электропривода: монография / М. Г. Баширов, И. В. Прахов. – Уфа: Уфимский гос. нефтяной технический ун-т. – 2013. – 96 с. – Текст : непосредственный.
4. Завидей, В. И. Состояние и перспективы внедрения систем мониторинга и технического диагностирования электрических машин и

аппаратов / В. И. Завидей, М. А. Свиридов, В. Н. Рущинский. – Текст : непосредственный // Экспозиция Нефть Газ. – 2019. – № 1. – С. 68–72.

5. ГОСТ ISO 20958-2015 Контроль состояния и диагностика машин. Сигнатурный анализ электрических сигналов трехфазного асинхронного двигателя = Condition monitoring and diagnostics of machine systems. Electrical signature analysis of three-phase induction motors национальный стандарт Российской Федерации : издание официальное : утвержден и введен в действие приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 17 марта 2016 г. № 155-ст : введен впервые : дата введения 2016–11–01 / разработан Открытым акционерным обществом «Научно-исследовательский центр контроля и диагностики технических систем». – Москва : Стандартинформ, 2016. – 27 с. – Текст : непосредственный.

6. ГОСТ 32144-2013 Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения = Electric energy. Electromagnetic compatibility of technical equipment. Power quality limits in the public power supply systems : издание официальное : утвержден и введен в действие приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 22 июля 2013 г. № 400-ст : введен впервые : дата введения 2014–07–01 / разработан Обществом с ограниченной ответственностью «ЛИНВИТ» и Техническим комитетом по стандартизации ТК 30 «Электромагнитная совместимость технических средств». – Москва : Стандартинформ, 2014. – 20 с. – Текст : непосредственный.

7. Lyons, R. G. Understanding digital signal processing / R. G. Lyons. – Upper Saddle River : Prentice Hall PTR, 2001. – 518 p. – Text: direct.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Гордеев Олег Игоревич

Омский государственный технический университет (ОмГТУ).
Мира пр., д. 11, г. Омск, 644050,
Российская Федерация.
Аспирант кафедры «Электроника» ОмГТУ.
Тел.: +7 (3812) 65-26-69.
E-mail: oki.gordeev_ai@rambler.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Gordeev Oleg Igorevich

Omsk State Technical University (OmSTU).
11, Mira av., Omsk, 644050,
the Russian Federation.
Post-graduate student of the department
«Electronics» OmSTU.
Phone: +7 (3812) 65-26-69.
E-mail: oki.gordeev_ai@rambler.ru.

Захаренко Владимир Андреевич
Омский государственный технический
университет (ОмГТУ).
Мира пр., д. 11, г. Омск, 644050,
Российская Федерация.
Доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой «Электроника»
ОмГТУ.
Тел.: +7 (3812) 65-26-69.
E-mail: zaha_vl@mail.ru.

Zakharenko Vladimir Andreevich
Omsk State Technical University (OmSTU).
11, Mira av., Omsk, 644050,
the Russian Federation.
Ph.D. in Technical Sciences, Professor, head of
the department «Electronics» OmSTU.
Phone: +7 (3812) 65-26-69.
E-mail: zaha_vl@mail.ru.

УДК 629.4.05

О. Е. Пудовиков, М. Д. Киселев

Российский университет транспорта (РУТ (МИИТ)), г. Москва, Российская Федерация

ПРИМЕНЕНИЕ АДАПТАЦИИ В СИСТЕМАХ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ СКОРОСТЬЮ ДВИЖЕНИЯ ГРУЗОВЫХ ПОЕЗДОВ

Система автоматического управления САУ скоростью грузового поезда с распределенной тягой должна удовлетворять целому ряду требований. Среди них – инвариантность показателей качества управления от параметров объекта. Одним из рациональных способов обеспечения данного требования является применение адаптации параметров САУ к параметрам объекта управления. Для этого разработана методика параметрического синтеза параметров САУ.

Ключевые слова: распределенная тяга, система автоматического управления скоростью локомотива, адаптация, параметрический синтез, качество управления.

Oleg E. Pudovikov, Maxim D. Kiselev

Russian University of Transport (RUT (MIIT)), Moscow, the Russian Federation

APPLICATION OF ADAPTATION IN AUTOMATIC SPEED CONTROL SYSTEMS FOR FREIGHT TRAINS

The automatic speed control system for a distributed traction freight train must meet a number of requirements. Among them is the invariance of management quality indicators from object parameters. One of the rational ways to meet this requirement is to adapt the parameters of

the ACS to the parameters of the control object. For this purpose, a method of parametric synthesis of ACS parameters has been developed.

Keywords: distributed traction, automatic locomotive speed control system, adaptation, parametric synthesis, control quality.

Обеспечение безопасности движения на железнодорожном транспорте является основной задачей любого железнодорожного оператора. При вождении длинносоставных тяжеловесных поездов действие неблагоприятных факторов, таких, как нерациональный способ формирования тяжеловесных поездов (например, наличие легковесных вагонов в головной части поезда), нарушение технологии управления тяговыми и тормозными средствами локомотивов и состава из-за ошибок локомотивной бригады, ведет к разрыву поезда из-за разрушения автосцепок в результате действия продольных сил значительной величины. Дополнительное негативное влияние оказывают накопления усталостных повреждений в них. Помимо этого, ошибки в управлении поездом приводят к нарушению условий оптимального взаимодействия подвижного состава и пути, и, как следствие, его сход с рельсов из-за выжимания вследствие недопустимых величин и времени действия продольных сжимающих сил, или выдёргивание внутрь кривой из-за превышения допустимых растягивающих сил [1].

Применение распределенной тяги при вождении тяжеловесных длинносоставных поездов позволяет значительно снизить максимальные величины продольных сил [2], однако, при этом важным является вопрос организации взаимодействия локомотивов, распределённых по составу. Данную проблему можно решить применением средств автоматизации управления САУ [3].

С учетом особенностей грузового поезда как объекта управления и принятых показателей качества управления [4], была предложена [5] адаптивная САУ скоростью грузового поезда для распределенной тяги с функциональной схемой (применительно к ведущему локомотиву), представленной на рисунок 1, особенностью которой является наличие эталонной модели поезда (ЭМ), позволяющей вычислять величины продольных динамических сил, действующих в поезде в переходных и установившемся режимах движения.

случае будут параметры системы управления ведущего локомотива и ведомого локомотива:

- k_1^1, k_2^1 параметры закона управления ведущего локомотива;
- p_a^1, T_1^1, T_2^1 параметры устройства ПУ2 ведущего локомотива;
- k_1^2, k_2^2 параметры закона управления ведомого локомотива;
- p_a^2, T_1^2, T_2^2 параметры устройства ПУ2 ведомого локомотива;
- $\Delta a_{\text{кор}}$ величина корректировки заданного ускорения;
- $\Delta v_{\text{кор}}$ величина корректировки заданной скорости.

Используемый векторный критерий качества состоит из разнородных частных критериев, т.е. для получения наилучших значений к системе управления скоростью должны предъявляться различные требования, поэтому отыскание параметров САУ, удовлетворяющих всем критериям одновременно, невозможно. Поэтому был использован метод многокритериальной оптимизации, в котором задача нахождения оптимальных параметров рассматривается как задача отыскания компромисса между отдельными частными критериями U_i . В этом случае вводится дополнительная целевая функция Π , которая описывает условия компромисса между отдельными частными критериями, для которой и выполняется минимизация:

$$\Pi = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left\{ \frac{U_i - U_i^*}{U_i^{**} - U_i^*} \right\}^2},$$

где U_i^* – минимальное значение i -го частного критерия, получаемое при решении задачи однокритериальной оптимизации по этому i -му критерию;

U_i^{**} – максимальное или допустимое значение i -го критерия;

n – количество частных критериев оптимизации.

Для отыскания минимумов частных критериев U_i^* , а также целевой функции Π , использован метод деформируемого многогранника (Нелдера–Мида) [7]. Численное решение задачи параметрического синтеза предлагаемой САУ проводилось с применением разработанной программы для параметрического синтеза САУ [8].

Проведем оценку работы САУ скоростью для распределенной тяги с использованием найденных в результате параметрического синтеза параметров САУ. Рассмотрим результаты моделирования движения поезда, были

реализованы следующие режимы: разгон с места до 50 км/ч, стабилизация скорости на этом уровне в режиме тяги на всем участке пути, затем электрическое торможение до 30 км/ч. В первом случае рассматривалось движение поезда с исходными параметрами САУ (рисунок 2). Во втором случае, были использованы параметры, найденные в результате решения задачи параметрического синтеза (рисунок 3).

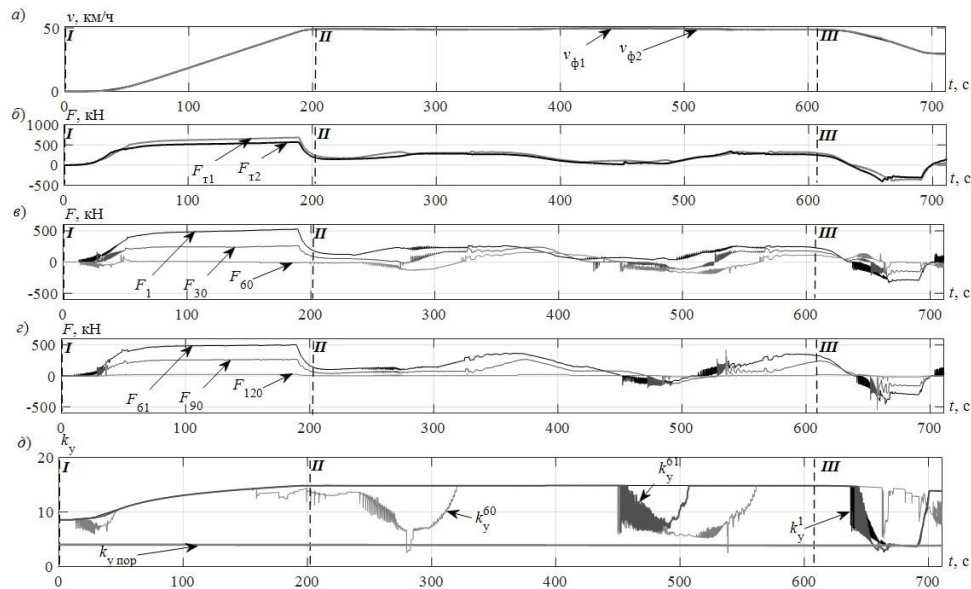


Рисунок 2 – Результаты моделирования движения поезда при использовании параметров САУ скоростью, найденных в результате выполнения пробных расчётов

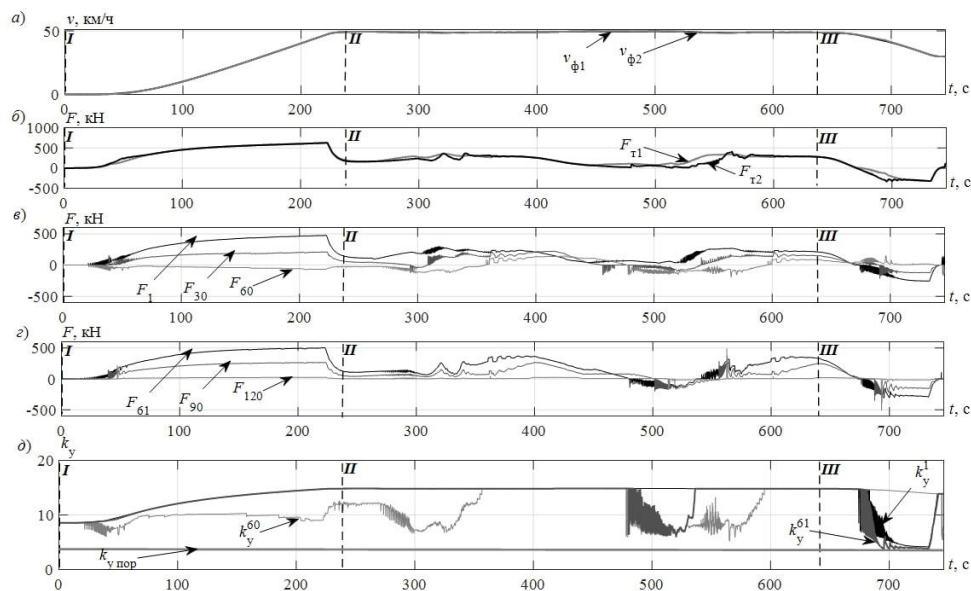


Рисунок 3 – Результаты моделирования движения поезда при использовании параметров САУ скоростью, найденных в результате выполнения параметрического синтеза

Как видно из графиков (рисунок 3) и по результатам имитационного эксперимента в первом случае, для варианта с применением предложенной САУ с базовыми параметрами, показатели качества управления равны

$$t_{\text{пер}} = 711 \text{ с}; F_{\text{max}} = 571 \text{ кН}; a = 8,53 \cdot 10^{-8}; k_{y_{\text{мин}}} = 1,7.$$

Для варианта САУ с параметрами, найденными в результате решения задачи параметрического синтеза (рисунок 4), показатели качества управления получились равными

$$t_{\text{пер}} = 746 \text{ с}; F_{\text{max}} = 499 \text{ кН}; a = 7,56 \cdot 10^{-8}; k_{y_{\text{мин}}} = 3,25.$$

В результате использования параметров САУ, найденных при решении задачи параметрического синтеза и найденных для них аппроксимирующих кривых в зависимости от введенной машинистом массы поезда и режима движения, в рассмотренном варианте движения поезда максимальная сила в поглощающем аппарате F_{max} снизилась на 15%, сумма накопленных усталостных повреждений a уменьшилась на 12%, а минимальная достигнутая величина коэффициента запаса устойчивости вагонов от выжимания $k_{y_{\text{мин}}}$ увеличилась на 91%.

Таким образом, применение адаптации САУ к изменению параметров поезда в сочетании с использованием параметров, найденных в результате решения задачи параметрического синтеза, позволило значительно повысить качество управления скоростью движения поезда при использовании распределённой тяги, что способствует повышению безопасности движения поездов.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 17-20-03043.

Список литературы

1. Вершинский, С. В. Динамика вагона : учебник для вузов ж.-д. транспорта / С. В. Вершинский, В. Н. Данилов, И. И. Челноков. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва : Транспорт, 1978. – 352 с. – Текст : непосредственный.
2. Лисицын, А. Л. Нестационарные режимы тяги (Тяговое обеспечение перевозочного процесса) / А. Л. Лисицын, Л. А. Мугинштейн. – Москва : Интекст, 1996. – 159 с. – Текст : непосредственный.
3. Автоматизированные системы управления электроподвижным составом : учебник : в 3 частях. Ч. 1: Теория автоматического управления /

Л. А. Баранов, А. Н. Савоськин, О. Е. Пудовиков [и др.] ; под ред. Л. А. Баранова и А. Н. Савоськина. – Москва : Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте, 2013. – 400 с.

4. Киселев, М. Д. Система критериев качества для оценки перспективных систем автоматического управления скоростью грузовых поездов с распределенной тягой / М. Д. Киселев, О. Е. Пудовиков. – Текст : непосредственный // Электроника и электрооборудование транспорта. – 2016. – № 2. – С. 11–14.

5. Система автоматического управления скоростью грузового поезда с распределенной тягой / О. Е. Пудовиков, В. Г. Сидоренко, Н. Н. Сидорова, М. Д. Киселев. – Текст : непосредственный // Электротехника. – 2019. – № 9. – С. 47–55.

6. Пудовиков, О. Е. Параметрический синтез системы автоматического управления скоростью движения грузового поезда / О. Е. Пудовиков. – Текст : непосредственный // Транспорт: наука, техника, управление : научный информационный сборник. – 2010. – № 4. – С. 22–27.

7. Химмельблау, Д. Прикладное нелинейное программирование / Д. Химмельблау ; пер. с англ. – Москва : Мир, 1975. – 534 с. – Текст : непосредственный.

8. Мугинштейн, Л. А. Тяговое обеспечение тяжеловесного движения и управление поездами повышенной массы с использованием автоматизированных систем / Л. А. Мугинштейн. – Текст : непосредственный // Бюллетень Объединенного ученого совета ОАО «РЖД». – 2016. – № 6. – С. 13–18.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Пудовиков Олег Евгеньевич

Российский университет транспорта
(РУТ (МИИТ)).

ул. Образцова 9, стр. 9, г. Москва, 127994,
Российская Федерация.

Доктор технических наук, доцент,
заведующий кафедрой «Электропоезда и
локомотивы» РУТ (МИИТ).

Тел.: +7 (495) 684-23-86.

E-mail: olegap@mail.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Pudovikov Oleg Evgen'ievich

Russian University of Transport
(RUT (MIIT)).

Obrazcova 9, Moscow, 127994,
the Russian Federation.

Doctor of Technical Science, Docent, head of
the department «Electro Multiple Units and
Locomotives» RUT (MIIT).

Phone: +7 (495) 684-23-86.

E-mail: olegap@mail.ru.

Киселев Максим Дмитриевич
Российский университет транспорта
(РУТ (МИИТ)).
ул. Образцова 9, стр. 9, г. Москва, 127994,
Российская Федерация.
Тел.: +7 (495) 684-23-86.
E-mail: dr.max.kiselev@yandex.ru.

Kiselev Maxim Dmitrievich
Russian University of Transport
(RUT (MIIT)).
Obrazcova 9, Moscow, 127994,
the Russian Federation.
Phone: +7 (495) 684-23-86.
E-mail: dr.max.kiselev@yandex.ru.

УДК 629.423.31

С. Н. Найден, Ю. В. Москалев

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

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ВИДЕОИЗМЕРИТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА ОЦЕНКИ КОММУТАЦИИ ДЛЯ НАСТРОЙКИ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ТЯГОВЫМИ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯМИ

В статье проведен анализ режимов работы тяговых электродвигателей в условиях эксплуатации, описан метод оценки коммутации тяговых электродвигателей по видеоизображению, описан процесс настройки системы управления БЕЛАЗ 7530 с учетом коммутации на тяговых электродвигателях, представлены положительные результаты проведенной работы в отношении коммутации тяговых электродвигателей.

Ключевые слова: тяговый электродвигатель, коммутация машин постоянного тока, автоматизированный видеоизмерительный комплекс.

Sergei N. Naiden, Yuri V. Moskaev

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

USING OF AUTOMATED VIDEO MEASURING COMPLEX FOR COMMUTATION ESTIMATION TO CONFIGURE THE MANAGEMENT SYSTEM TRACTION MOTOR

The article analyzes the operating parameters of traction motors under operating conditions, describes a method for assessing commutation of traction motors by video image, describes the process of

tuning the BELAZ 7530 control system taking into account commutation of traction motors, and presents the positive results of the work carried out in commutation of traction motors.

Keywords: traction motor, commutation of DC machines, automated video measuring complex.

Существенное влияние на коммутационные свойства МПТ и, следовательно, на её надежность оказывает контакт щетка-коллектор. Проведенные исследования показали, что при неудовлетворительной коммутации существенно возрастает износ щеток и коллектора, что существенно увеличивает эксплуатационные расходы на замену щеток и проведение технического обслуживания коллектора [1].

По данным из эксплуатации пробег до замены электрощеток в среднем составляет 15-20 тыс. км или около 1200-1500ч, и демонтаж ТЭД для проточки коллектора 4-6 раз за срок службы (10 лет).

Для проверки качества работы тяговых электродвигателей постоянного тока, используемых в карьерных самосвалах БЕЛАЗ, разработан универсальный автоматизированный видеоизмерительный комплекс оценки состояния коммутации (АВК-ОК) (рисунок 1) и проведены опытные работы в условиях эксплуатации угольного разреза Кемеровской области [2].

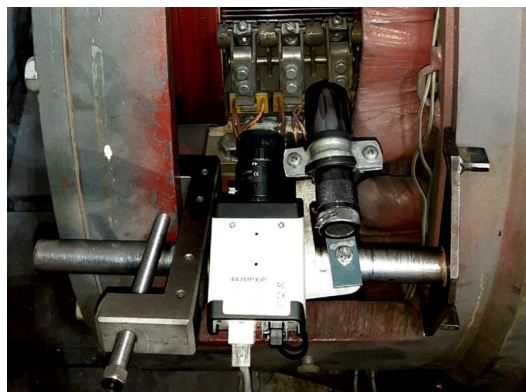
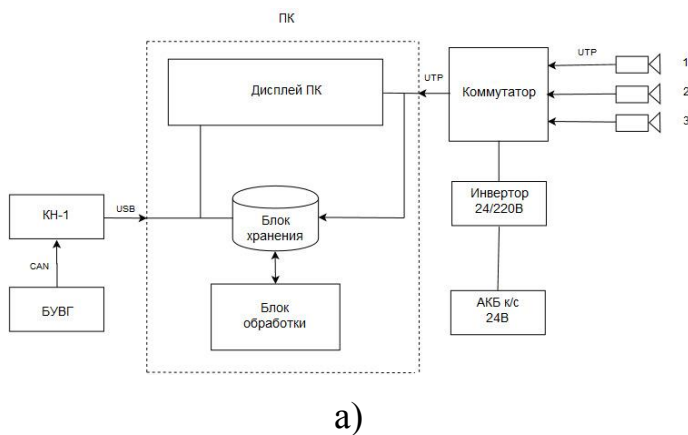
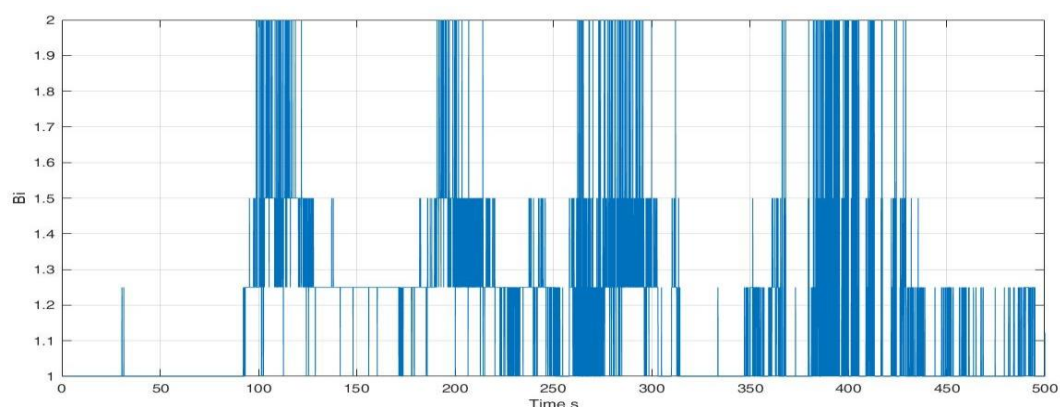


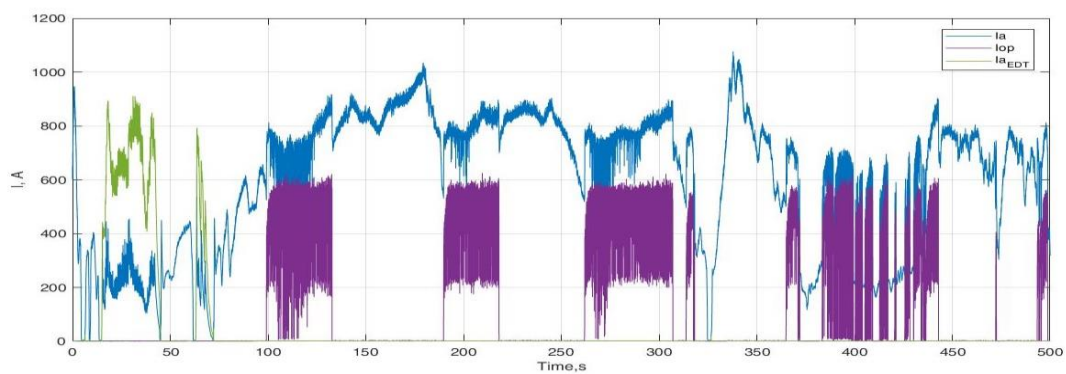
Рисунок 1 – АВК-ОК:

а) структура комплекса; б) фото крепления видеокамеры к остоу ТЭД

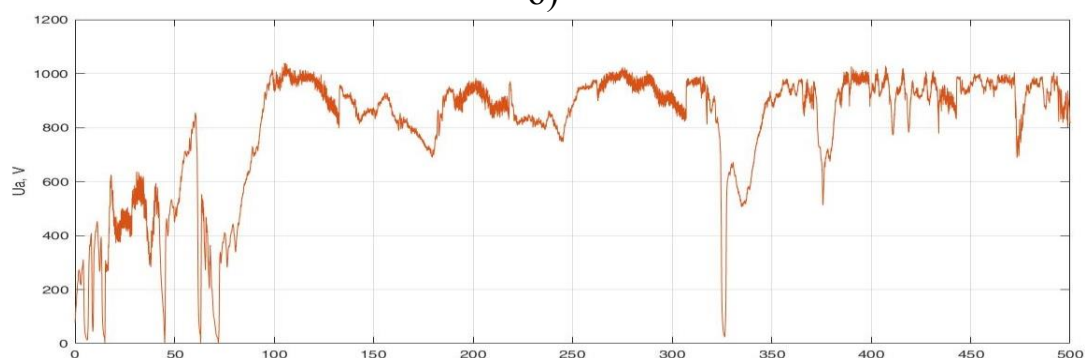
В результате тестовых поездок были сделаны видеозаписи работы КЩУ и считаны электрические параметры работы электромеханической трансмиссии (ЭМТ). С помощью программы «DC motor Commutation» проведена обработка полученной информации и построены графики работы ТЭД в условиях эксплуатации (рисунок 2) [3]. Так же для анализа работы ТЭД проведены расчеты коэффициента пульсации тока якоря и коэффициента возбуждения.



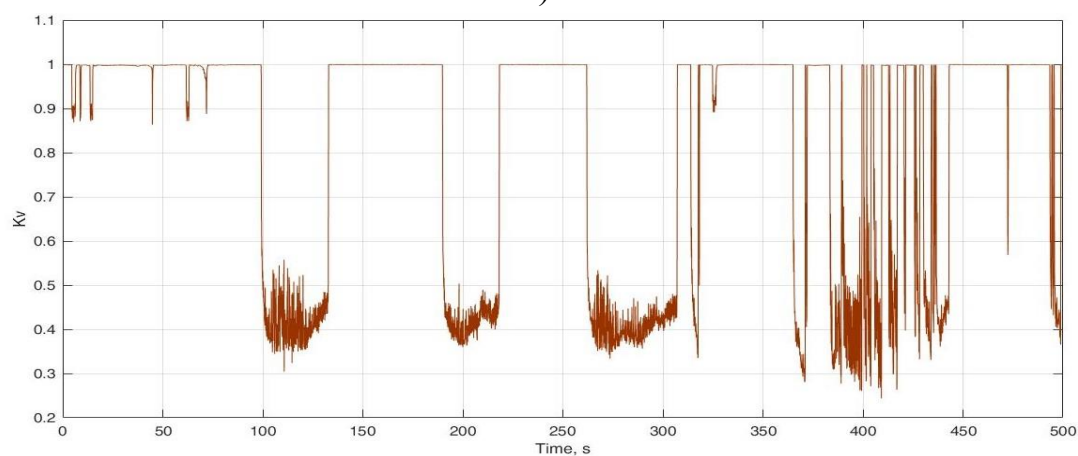
а)



б)



в)



г)

Рисунок 2 – Параметры работы ТЭД а/с БЕЛАЗ в эксплуатации:

а) Балл коммутации $Bi(t)$; б) Ток якоря (синий) $Ia(t)$, ток ослабления поля $Iop(t)$ (желтый), ток якоря в режиме ЭДТ $Ir(t)$ (зеленый); в) напряжение якоря $Ua(t)$; коэффициент возбуждения $Kv(t)$

В отношении качества коммутации ТЭД, наиболее неблагоприятным оказался режим ослабления поля, в этом режиме электродвигатели работают с коммутацией класс 2 и более на протяжении 25% времени (рисунок 3).

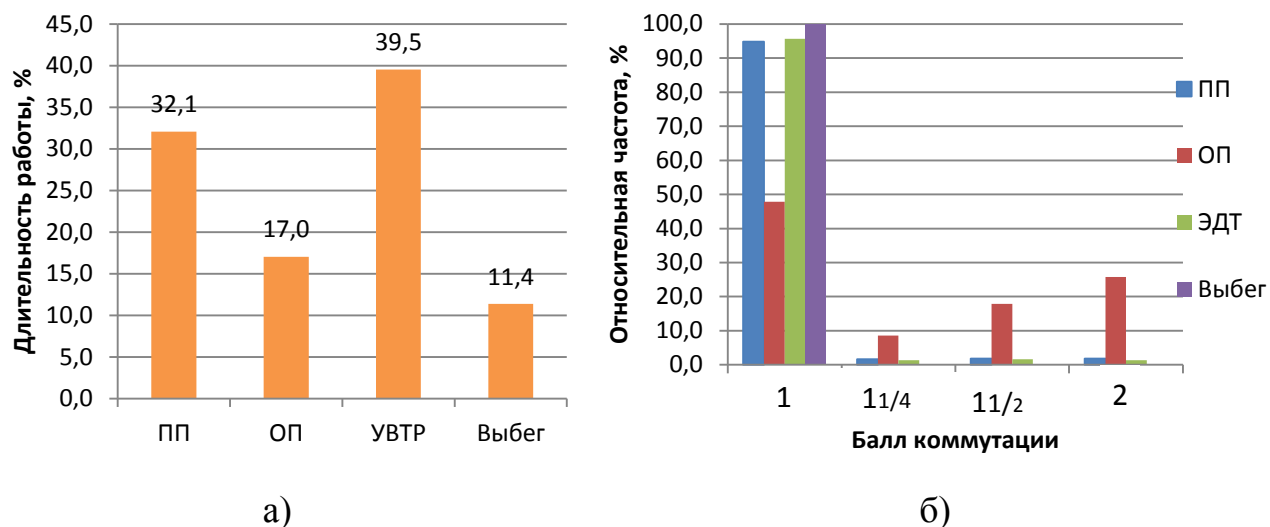


Рисунок 3 – Анализ режимов работы:

а) распределение продолжительности режимов работы тэд; б) распределение времени работы по коммутации для каждого режима работы ТЭД

Выявлено, что в режиме ОП система управления не контролирует величину коэффициента возбуждений (K_v) и допускает глубину более 32%, так же наблюдаются резкие изменения в токе якоря, что приводит к увеличению коэффициента пульсации (K_p). При ослаблении поля главных полюсов усиливается влияние магнитной асимметрии, что особенно заметно сказывается при глубоком ослаблении поля и влияет на качество коммутации [4,5].

При пульсирующем токе происходят пульсации реактивной ЭДС e_r , поэтому для ее компенсации необходимо, чтобы коммутирующая ЭДС e_k изменялась точно в соответствии с изменениями реактивной ЭДС e_r . Однако создать такой пульсирующий поток в добавочных полюсах не представляется возможным, так как этому препятствуют вихревые токи, которые замедляют изменение потока добавочных полюсов и сдвигают во времени изменения ЭДС e_k относительно изменений ЭДС e_r . В результате эффективность действия добавочных полюсов по компенсации реактивной ЭДС уменьшается и в коммутируемой секции действует некоторая некомпенсированная ЭДС, вызывающая искрение под щетками [5,6].

Для повышения качества выпускаемой продукции специалисты ОАО «БЕЛАЗ» и ООО «Сибэлектропривод» провели опытные работы по

настройке системы управления автосамосвалов серии 7513 и 7530 с ЭМТ переменного-постоянного тока. Главной задачей проведенных работ было снижение уровня коммутации ТЭД при сохранении тяговой и тормозной характеристик автосамосвала на заявленном уровне.

Специалистами ОАО «СТРИМ» были проведены изменения программного обеспечения системы контроля автомобильной трансмиссии (СКАТ):

1) оптимизирован алгоритм работы блока управления тиристорами ослабления поля (БУТОП) – ограничена скорость изменения тока ослабления поля при включении режима;

2) оптимизирован алгоритм работы модуля высоковольтных сенсоров (МВС) – изменено формирование сигнала управления тиристорами возбуждения тягового генератора при работе в режиме ограничения мощности.

Опытные работы проводились в два этапа, на первом этапе в условиях полигона ОАО «БЕЛАЗ» г.Жодино, Республика Беларусь проверялась работа автосамосвалов с обновленным ПО и проводилась предварительная настройка параметров работы режима ослабления поля: скорость включения-отключения режима, ограничения тока якоря в этом режиме. Второй этап проходил в «Талдинском» угольном разрезе в Кемеровской области, проводилась окончательная проверка программного обеспечения и настроек ЭМТ в условиях эксплуатации.

В результате проведенных работ удалось:

1. Ограничить коэффициент возбуждения на уровне не ниже 0,32 (рисунок 4).

$$K_B = \frac{I_{a<1/10>} - I_{op<1/10>}}{I_{a<1/10>}} \quad (1)$$

где $I_{a<1/10>}$ – среднее значение тока якоря за 1/10 с;

$I_{op<1/10>}$ – среднее значение тока ослабления поля за 1/10 с.

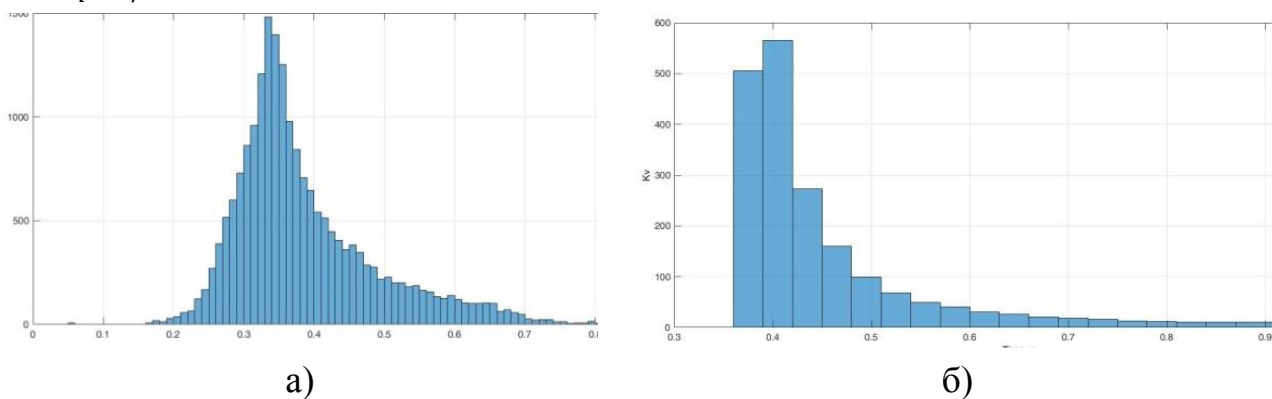


Рисунок 4 – Распределение коэффициента возбуждения в режиме ослабления поля:

а) до настройки ЭМТ; б) после настройки ЭМТ

2. Уменьшить коэффициент пульсации тока якоря до уровня 0,2 (рисунок 5).

$$K_p = \frac{I_{aMax<1/10>} - I_{aMin<1/10>}}{2 \cdot I_{aAv<1/10>}}, \quad (2)$$

где $I_{aMax<1/10>}$ – максимальное значение тока якоря за 1/10 с;

$I_{aMin<1/10>}$ – минимальное значение тока якоря за 1/10 с;

$I_{aAv<1/10>}$ - среднее значение тока якоря за 1/10 с.

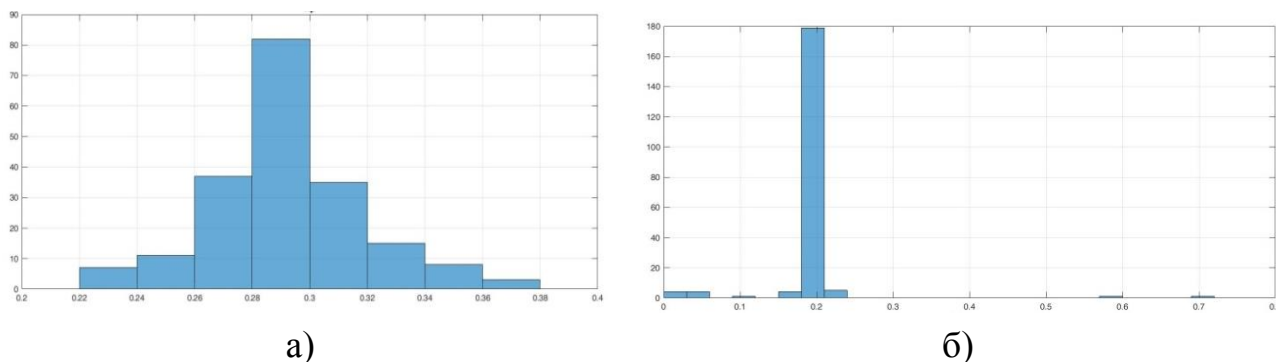


Рисунок 5 – Распределение коэффициента пульсации в режиме ослабления поля:

а) до настройки ЭМТ; б) после настройки ЭМТ

Критерием для оценки результатов проведенных работ являлся уровень коммутации ТЭД и суммарная продолжительность искрения, которые оценивались с помощью АВК-ОК. Проведенные мероприятия позволили снизить уровень неудовлетворительной коммутации и увеличить время безискровой работы ТЭД (рисунок 6) в режиме ослабления поля.

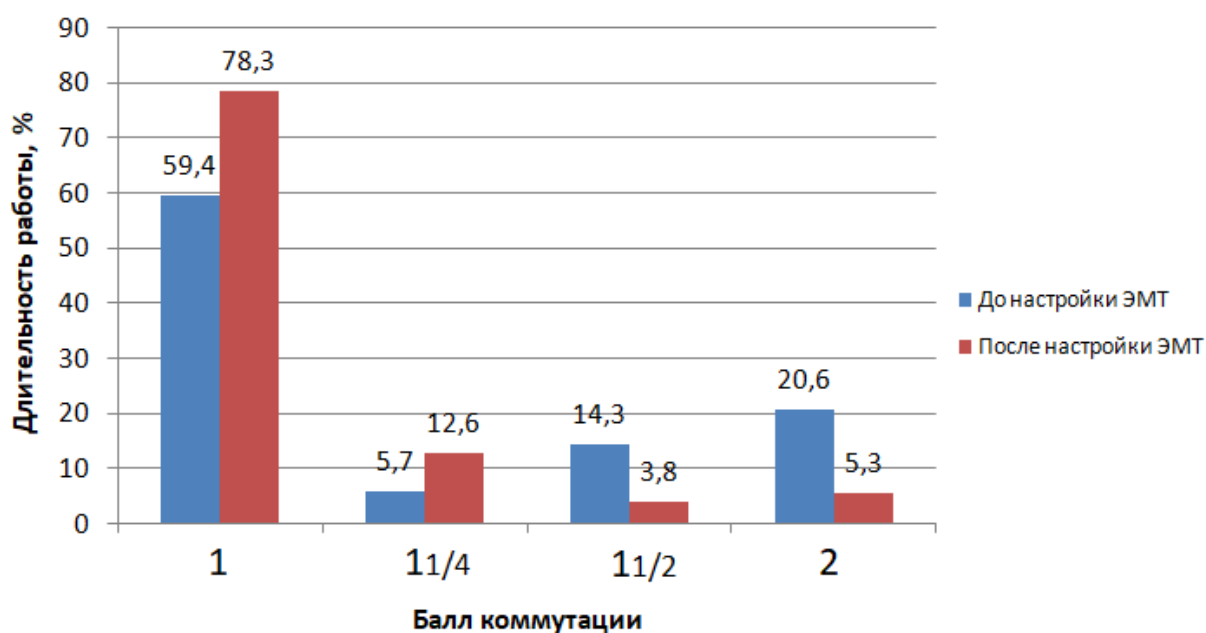


Рисунок 6 – Гистограммы частот возникновения различных классов коммутации в соответствии со стандартной шкалой искрения

Утвержденные настройки и новые версии ПО приведены в таблице 1.

Таблица 1

Уставки и новые версии ПО

Показатель	Макс.ток ОП, А (БУТОП)	Ток ослабления поля (ток якоря), А (МВС)	Скорость включения режима ОП, км/ч	Скорость отключения режима ОП, км/ч	Версия ПО БУТОП	Версия ПО МВС
Уставка (версия ПО)	450	800	17	14	2.0.31	2.1.74

Таким образом, АВК-ОК показал свою эффективность при диагностике работы КЩУ ТЭД автосамосвалов БЕЛАЗ. При небольших доработках АВК-ОК возможно адаптировать для работы в машинах постоянного других транспортных средств и промышленных установок использующих машины постоянного тока для диагностики и настройки коммутации.

Список литературы

1. Харламов, В. В. Оценка интенсивности износа электрических щеток машин постоянного тока методом гранулометрического анализа / В. В. Харламов, М. Ф. Байсадыков, А. С. Хлопцов. – Текст : непосредственный // Омский научный вестник. – 2015. – №3 (143). – С. 226–229.
2. Найден, С. Н. Видеоизмерительный комплекс оценки состояния коммутации тяговых электродвигателей карьерного самосвала БЕЛАЗ 75306 в условиях эксплуатации / С. Н. Найден. – Текст : непосредственный // Приборы и методы измерений, контроля качества и диагностики в промышленности и на транспорте : материалы III всероссийской научно-технической конференции с международным участием / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2018. – С. 88–94.
3. Методика оценки состояния коммутации тяговых электродвигателей карьерных самосвалов в условиях эксплуатации / В. В. Харламов, С.Н. Найден [и др.]. – Текст : непосредственный // Омский научный вестник. – 2019. – № 4 (166). – С. 23–28.

4. Тяговые электродвигатели электровозов / В. И. Бочаров, В. И. Захаров, Л. Ф. Коломейцев [и др.] ; под редакцией В. Г. Щербакова. – Новочеркасск : Агентство Наутилус, 1998. – 672 с. – Текст : непосредственный.

5. Курбасов, А. С. Проектирование тяговых электродвигателей : учебное пособие для вузов ж.-д. трансп. / А. С. Курбасов, В. И. Седов, Л. Н. Сорин ; под ред. А. С. Курбасова. – М. : Транспорт, 1987. – 535 с. – Текст : непосредственный.

6. Харламов, В. В. Моделирование процесса коммутации тягового двигателя постоянного тока карьерного самосвала / В. В. Харламов, Ю. В. Москалев, С. Н. Найдено. – Текст : непосредственный // Омский научный вестник. – 2020. – № 2 (170). – С. 31–36.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Найден Сергей Николаевич

Омский государственный университет
путей сообщения (ОмГУПС).
Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046,
Российская Федерация.
Аспирант кафедры «Электрические машины
и общая электротехника» ОмГУПС, ведущий
конструктор ООО «Сибэлектропривод».
Тел.: +7-923-737-10-27.
E-mail: sergeynayden@gmail.com.

Москалев Юрий Владимирович

Омский государственный университет
путей сообщения (ОмГУПС).
Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046,
Российская Федерация.
Кандидат технических наук, доцент
кафедры «Электрические машины и общая
электротехника» ОмГУПС.
Тел.: (3812) 31-18-27.
E-mail: yuriyvm@mail.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Naiden Sergei Nikolaevich

Omsk State Transport University (OSTU).
35, Marx st., Omsk, 644046,
the Russian Federation.
Post-graduate student of the Department of
“Electrical Machines and General Electrical
Engineering” OSTU, Leading designer of
Sibelektroprivod LLC.
Phone: +7-923-737-10-27.
E-mail: sergeynayden@gmail.com

Moskalev Yuri Vladimirovich

Omsk State Transport University (OSTU).
35, Marx st., Omsk, 644046,
the Russian Federation.
Cand. Tech. Sci., the senior lecturer of the
department «Electric machines and electrical
engineering» OSTU.
Phone: (3812) 31-18-27.
E-mail: yuriyvm@mail.ru.

С. В. Люханова

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

МЕТОДИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ТРАНСПОРТНО-ЛОГИСТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

Транспортно-логистическая система (ТЛС) любой страны определяет ее экономическое развитие, от качества ее функционирования зависит эффективность работы многих отраслей экономики. В статье формулируется понятие «качество функционирования ТЛС», приводятся деятельностные характеристики ТЛС, которые отображают процесс ее работы и конечный результат, а также показатели для оценки качества транспортного обслуживания грузоотправителей и грузополучателей, работы персонала ТЛС (показатель компетентности), показатели цифровизации транспортно-логистических процессов.

Ключевые слова: качество функционирования транспортно-логистической системы, цифровизация логистических процессов, компетенции персонала ТЛС, показатели качества транспортного обслуживания.

Svetlana V. Lukhanova

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

OF THE METHODUS ASPECT OF THE REVIEW OF THE SERVICE TRANSPORT-LOGISTICS SYSTEM

The transport and logistics system of any country determines its economic development, the quality of its functioning depends on the efficiency of many sectors of the economy. The article formulates the concept of "quality of TLC operation", provides operational characteristics of TLC, which reflect the process of its work and the end result, as well as indicators for assessing the quality of transport services for shippers and shippers, the work of TLC personnel (competence indicator), indicators of digitization of transport and logistics processes.

Keywords: the quality of the transport and logistics system, the digitization of logistics processes, the competence of TLC staff, the quality of transport services.

Под транспортно-логистической системой понимается совокупность транспортно – логистической инфраструктуры и субъектов ТЛС, использующих для принятия решений определенный методологический аппарат и инструментарий и осуществляющих различные логистические функции, взаимосвязанные транспортным процессом для воздействия на материальный и сопутствующие ему потоки с целью удовлетворения спроса потребителей на своевременную доставку материальных предметов или людей с одного физического места в другое. [1]

Транспортно-логистическая система любой страны определяет уровень ее экономического развития. Данная система относится к классу больших и сложных систем и имеет в своем составе ряд относительно самостоятельных и самоорганизующихся подсистем, каковыми являются субъекты ТЛС, выполняющие транспортно-логистические функции или управляющие ими. Транспортно-логистическую систему можно рассматривать на мировом уровне, уровне страны, региона, предприятия, цеха, участка и даже отдельного рабочего места. И в зависимости от масштаба рассмотрения показатели для оценки качества ее функционирования будут меняться.

Категория «качество» является обязательной составляющей, которая должна иметь высокую оценку для достижения эффективности функционирования любых систем. Если качество работы системы в целом и внутри системы низкое, речи не может быть о достижении ей высокой эффективности. [2]

Оценка качества функционирования больших и сложных экономических систем – вопрос, недостаточно хорошо изученный в экономической литературе. Необходимо сформулировать понятие качества функционирования транспортно-логистической системы, выявить влияющие факторы, рассмотреть показатели для оценки качества.

Под качеством международный стандарт ГОСТ Р ИСО 9000-2015 понимает степень соответствия совокупности присущих (объекту) характеристик требованиям. Любой объект (процесс, продукция, услуга, система), созданный в результате целенаправленной деятельности человека, характеризуется своим качеством. В рыночной экономике и в ее цифровой трансформации требования к любым объектам в конечном счете формирует потребитель и заинтересованные в работе системы стороны. Качество

определяется мерой соответствия товаров и услуг условиям и требованиям стандартов, договоров, контрактов, запросов потребителей. [3]

Характеристикой называется отличительное свойство объекта. Характеристики делятся на классы: физические (механические, электрические, химические или биологические); органолептические (связанные с запахом, осязанием, вкусом, зрением, слухом); этические (вежливость, честность, правдивость); связанные со временем (пунктуальность, безотказность, доступность, непрерывность); эргономические (соответствие гигиеническим, антропометрическим, физиологическим и психологическим свойствам человека); функциональные (скорость).

Качество функционирования транспортно-логистической системы – это степень соответствия совокупности ее деятельностных характеристик требованиям и ожиданиям пассажиров, грузоотправителей, грузополучателей, а также государственных органов надзора и регулирования транспортно-логистической деятельности при учете требований и ожиданий других заинтересованных сторон (сотрудников, инвесторов, партнеров, поставщиков).

Деятельностные характеристики ТЛС отображают процесс ее работы и конечный результат. К таким характеристикам можно отнести:

1. Эксплуатационную работу транспорта.
2. Транспортное обслуживание грузополучателей, грузоотправителей, пассажиров.
3. Управленческие решения в ТЛС.
4. Внутрисистемное (внутрипроизводственное) обслуживание функциональных логистических подсистем (закупочной, снабжения, запасов, складирования, сбыта).
5. Использование информационных компьютерных моделей для оптимизации транспортно-логистических систем.
6. Цифровизацию транспортно-логистических процессов.
7. Компетентность персонала всех уровней, категорий и звеньев ТЛС.

Так показателями транспортного обслуживания грузоотправителей и грузополучателей являются:

- доступность услуг перевозки;
- простота оформления документации на заказ по доставке груза;
- надежность операторов грузовых вагонов;

- интермодальность перевозок;
- наличие оперативного информирования в режиме он-лайн о месте нахождения груза, процессе перевозки, других интересующих клиента данных;
- сохранность груза без изменения исходных свойств и параметров;
- своевременность доставки грузов;
- готовность к изменениям условий платежа;
- возможность переадресации доставки груза;
- полнота удовлетворения спроса по объемам перевозки;
- культура обслуживания;
- несение транспортной компанией материальной и правовой ответственности за нарушение стандартов и гарантий качества перевозки;
- выполнение графиков и расписаний движения транспорта.

К компетентности персонала ТЛС можно отнести степень его соответствия требованиям профессиональных стандартов и общекорпоративных, профессиональных требований разработанных моделей компетенций. Каждой компетенции соответствует перечень знаний и навыков, которыми должен обладать работник и которые измеряются с помощью различных инструментов: ассессмент-центров, тестов и опросников. Индикаторы для оценки компетентности персонала разрабатываются на разных уровнях управления организацией и исполнительском уровне.

Так, например, в ОАО «РЖД» компетенция «Комплексное мышление» измеряется на разных уровнях управления в конкретной функции – в Дирекции управления движением. На уровне составителя поездов речь идет об аналитическом мышлении, которое позволяет правильно понимать и исполнять инструкции в конкретных рабочих условиях: например, при оперативном анализе плана маневровых работ и выполнении установленных операций. На уровне начальника железнодорожной станции от руководителя требуется системное мышление, которое предполагает понимание ситуации в целом, учет всех влияющих на работу станции факторов. Руководитель должен уметь принимать взвешенные решения, взаимодействуя со смежными подразделениями. Уровень начальника дирекции в первую очередь требует стратегического видения. Он отвечает за ключевые показатели дирекции и должен уметь оценивать разные сценарии развития событий, учитывать

множество факторов, влияющих на производственные процессы дирекции и бизнеса всего Холдинга в долгосрочной перспективе. [4]

Актуальные на сегодняшний день тенденции цифровизации российской экономики затрагивают и ТЛС России. Под цифровизацией понимают процесс перехода предприятия или целой экономической отрасли на новые модели бизнес-процессов, менеджмента и способов производства, основанные на информационных технологиях [5].

К показателям цифровизации транспортно-логистических процессов можно отнести:

- использование электронной системы контроля (например, система «Интертрансавто»);
- технологии оптимизации погрузочно-разгрузочных работ (например, Программа "Мой склад");
- программы, оптимизирующие процесс транспортировки (например, Sellora, грузовой калькулятор Searates);
- программы, обеспечивающие безопасность перевозки (например, программа Drive Safely и другие технические средства, обеспечивающие контроль за состоянием водителя транспортного средства);
- использование для транспортировки дронов и технологии 3D-печати
- применение роботизированных устройств в складских операциях (например, комплекс RONA VI) и т.д. [6, 7, 8]

Список литературы

1. Люханова, С. В. Стрoение транспортно-логистической системы / С. В. Люханова. – Текст : непосредственный // Маркетинг и логистика. – 2020. – 2 (28). – С. 53–64.
2. Люханова, С. В. Качество и эффективность управления: отличия и взаимосвязь / С. В. Люханова, Н. М. Морозов. – Текст : непосредственный // Менеджмент в России и за рубежом. – 2015. – № 4.
3. ГОСТ 15467-79. Управление качеством продукции. Основные понятия. Термины и определения = Product-quality control. Basic concepts. Terms and definitions : утвержден и введен в действие постановлением Государственного комитета СССР по стандартам от 26.01.79 № 244 : издание (май 2009 г.) с изменением №1, утвержденным в январе 1985 г. (ИУС 4-85) /

разработан Государственным комитетом СССР по стандартам. – Текст : электронный // Техэксперт : сайт. – URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200001719/>.

4. Положение о модели корпоративных компетенций ОАО «РЖД» // Протокол заседания правления ОАО «РЖД» от 13.05.2019 г. – № 25.

5. Negroponte, N. Being Digital / N. Negroponte. – New York Knopf, 1995. 252 p. – Text: electronic // Информационно-аналитический Центр (ИАЦ) : сайт. – URL: <http://inance.ru/2017/09/cifrovaya-ekonomika/> (дата обращения: 22.08.2020).

6. Николаева, А. И. Передовые логистические технологии в международных перевозках / А. И. Николаева. – Текст : непосредственный // Современные проблемы транспортного комплекса России – 2017. – № 1. – С. 15–18.

7. Кравченко, А. Е. Управление цепями поставок в эпоху цифровой трансформации / А. Е. Кравченко. – Текст : электронный // VC.ru : сайт. – URL: <https://vc.ru/transport/78912-upravlenie-cepuyami-postavok-v-epohu-cifrovoy-transformacii> (дата обращения: 05.10.2020).

8. Домина, Е. Е. Роботизация складов – далекое будущее или объективная реальность? / Е. Е. Домина. – Текст : электронный // Известия – информационный портал : сайт. – URL: <https://iz.ru/686120/elena-domina/robotizatsiia-skladov-dalekoe-budushchee-ili-obektivnaia-realnost> (дата обращения: 05.10.2020).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Люханова Светлана Валерьевна
Омский государственный университет
путей сообщения (ОмГУПС).
Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046,
Российская Федерация.
Доцент кафедры «Экономика транспорта,
логистика и управление качеством»
ОмГУПС.
Тел: 89507961801.
E-mail: svetl-05@mail.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Luchanova Svetlana Valerievna
Omsk State Transport University (OSTU).
35, Marx st., Omsk, 644046,
the Russian Federation.
Associate Professor of Transport Economics,
Logistics and Quality Management OSTU.
Тел: 89507961801.
E-mail: svetl-05@mail.ru.

В. Ю. Кобенко, И. В. Чувочина, А. Е. Зольников

Тобольский индустриальный институт – филиал «Тюменский индустриальный университет»
в г. Тобольске (филиал ТИУ в г. Тобольске), г. Тобольск, Российская Федерация

МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ И КЛАССИФИКАЦИИ ТРЕНДОВ СИГНАЛОВ

Описан метод, предназначенный для решения задач измерения и классификации трендов сигналов. Метод основан на вычислении относительного расстояния между выборочной реализацией исследуемого сигнала и двумя эталонными последовательностями, образованными из исходного сигнала путем его прямой и обратной сортировки. Приведен алгоритм реализации метода.

Ключевые слова: измерение тренда, классификация, обнаружение, сигнал, сортировка, тренд, эталонные последовательности.

Vadim Yu. Kobenko, Irina V. Chuvochina, Alexander E. Zolnikov

Tobolsk Industrial Institute – branch of the "Tyumen Industrial University" in Tobolsk
(branch of TIU in Tobolsk), Tobolsk, the Russian Federation

METHOD FOR MEASURING AND CLASSIFYING SIGNAL TRENDS

A method is described for solving problems of measuring and classifying signal trends. The method is based on calculating the relative distance between the sample implementation of the signal under study and two reference sequences formed from the original signal by direct and reverse sorting. An algorithm for implementing the method is given.

Keywords: measurement of trend, classifying, detection, signal, sorting, trend, reference sequences.

При решении задач интеллектуализации технических комплексов, в том числе в области электроэнергетики, возникает необходимость в разработке адаптивных систем мониторинга, управления, релейной защиты и автоматики. Работа таких комплексов основана на структурном и параметрическом анализе электрических сигналов [1]. При проведении подобного анализа решается ряд задач, одной из которых является обнаружение и количественная оценка «силы» временных трендов в исследуемых сигналах. Во многих случаях эти

тренды определяют развитие либо негативных, либо позитивных тенденций явлений и процессов. Своевременное и надежное обнаружение наличия трендов сигналов позволяет оперативно принимать адекватные решения, что особенно важно для задач контроля и диагностирования [2].

Известные методы выделения трендов сигналов используют в основном два подхода: фильтрацию и статистическую обработку [3]. При использовании метода фильтрации необходимо знать и задавать параметры (например, коэффициенты передачи и частоты среза) фильтров. Использование же статистических методов, предполагает наличие предварительного неформального этапа определения типа тенденции и выдвижения гипотез относительно моделей тренда. При этом алгоритмы статистического усреднения (например, скользящего среднего) предполагают знание статистических параметров сигнала для правильного выбора ширины окна сканирования. В любом случае, условием эффективного использования указанных методов является наличие априорных данных об исследуемом сигнале, что далеко не всегда возможно.

Предлагаемый метод не требует предварительных знаний характеристик процесса и позволяет не только обнаруживать тренд, но также измерять его «силу» и проводить классификацию.

Предлагаемый метод (рисунок 1) основан на вычислении относительного расстояния между тремя списками, названными авторами прямым (Direct List), обратным (Reverse List) и измерительным (Measurement List) и образованными из исходной выборочной реализации сигнала $X(t)$, объема N . Первый список (Direct List) получается путем сортировки значений (X_i) выборочной реализации сигнала по возрастанию, а обратный (Reverse List) – по убыванию. Измерительный список (Measurement List) представляется самой выборочной реализацией сигнала.

На рисунке 1 идея метода поясняется изображением компонент алгоритма и его программным кодом, выполненным в среде LabVIEW. Упорядоченные списки (Direct List и Reverse List) образуют, соответственно, левый и правый граничные последовательности, между которыми располагается выборка анализируемого сигнала. На нижнем дисплее изображено их совместное представление. Количественно тренд оценивается величиной M , равной относительному расстоянию между анализируемым сигналом и его упорядоченными граничными эталонами. Алгоритм вычисления

этого расстояния представлен на рисунке 2, где d_1 , d_2 , d – расстояния между указанными списками, определяемые через сумму абсолютных разностей значений отсчетов, находящихся в одинаковых ячейках. Физический смысл меры относительного расстояния (M) заключается в том, что она характеризует степень неупорядоченности (хаотичности) измерительного списка по отношению к упорядоченным прямым и обратным спискам (шкалам). Подобный подход был применен к решению задач классификации [4], измерения [5] и диагностирования [6].

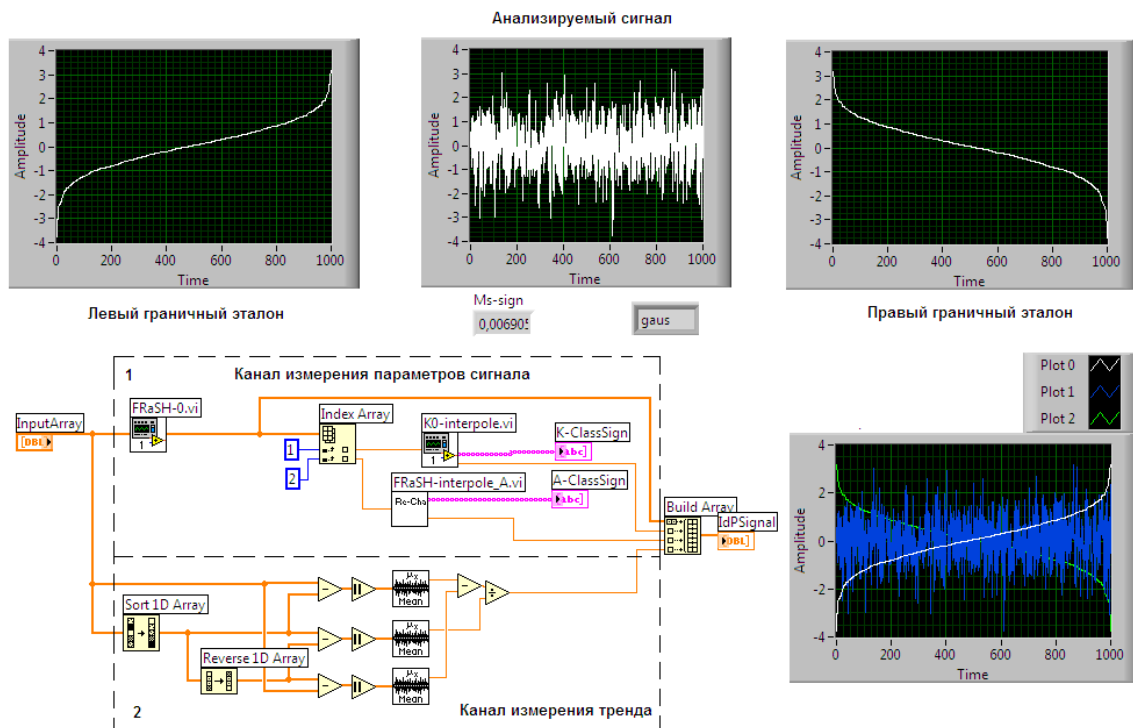


Рисунок 1 – Иллюстрация метода измерения тренда сигналов

Исследование данного алгоритма в отношении разнообразных сигналов позволило постулировать несколько классификационных правил.

Правило №1. Если $M \approx 0$, тренд отсутствует. Если $M \approx -1$, имеет место монотонно возрастающий тренд с закономерностью левой границы. Если $M \approx 1$, имеет место монотонно убывающий тренд с закономерностью правой границы.

Правило №2 определяет вид закономерности возрастания или убывания тренда и выражается именем распределения мгновенных значений анализируемого сигнала. Даже при отсутствии тренда ($M \approx 0$) имя распределения существует и определяется путем идентификационных измерений.

$$d_1 = \sum |r_d - r_m| \quad d = \sum |r_d - r_r| \quad d_2 = \sum |r_r - r_m|$$

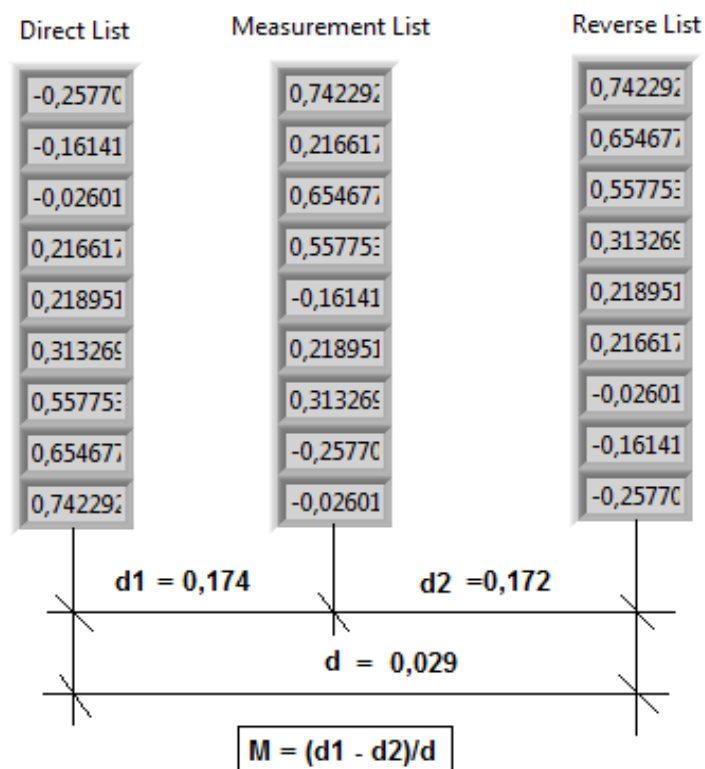


Рисунок 2 – Алгоритм оценки «силы» тренда сигнала

Суть идентификационных измерений заключается в количественном оценивании формы какой-либо характеристики сигнала [7, 8]. При этом неизвестной форме приписывается имя ближайшего эталона. В частности, на рисунке 1 показан сигнал, имеющий нормальное (имя «gaus») распределение мгновенных значений.

В соответствии с данными работы [9], можно различить 8 основных типов трендов: двумодальный (2mod), арксинусный (asin), равномерный (even), трапецеидальный (trap), треугольный (simp), нормальный (gaus), двусторонний экспоненциальный (lapl) и Коши (kosh).

Правило №3 относится к условию сравнения сигналов. Если два сигнала имеют одинаковую силу тренда ($M1 \approx M2$), но разные виды закономерности (имя1 $\neq$ имя2), то сигналы – разные. Иначе (имя1 = имя2; $M1 \neq M2$), сигналы – похожи. Отсюда следует, что сравнивать, в первую очередь, надо сигналы одного типа, т.е. с одинаковыми распределениями мгновенных значений.

На рисунке 3 показан пример сравнения трех фрактальных сигналов с одинаковым показателем Херста $H = 1$.

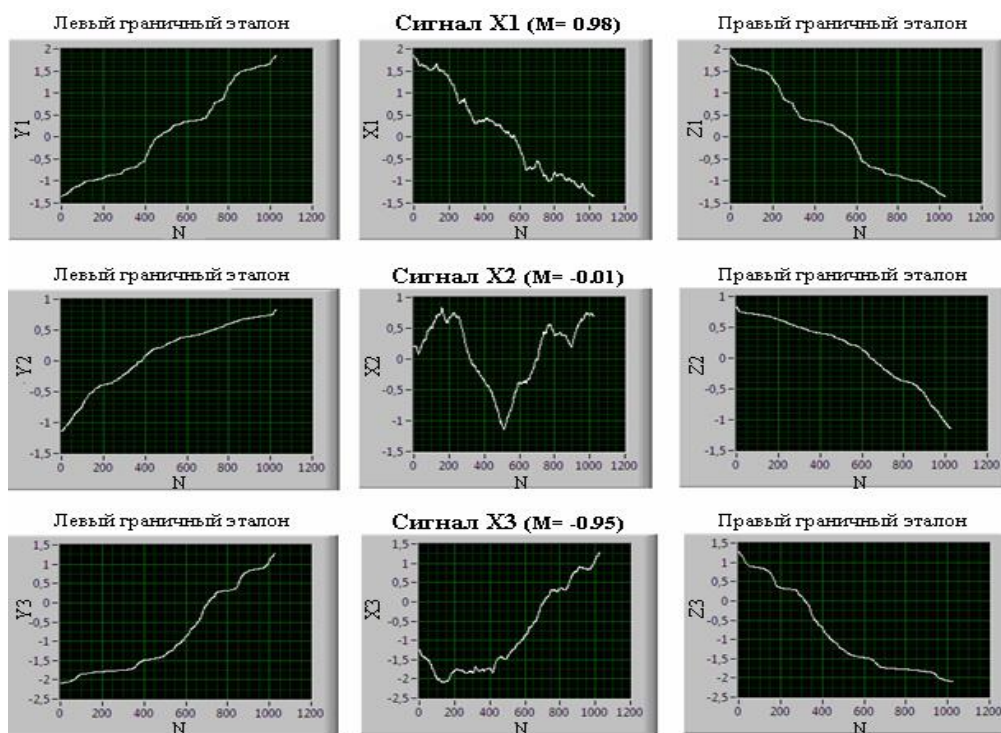


Рисунок 3 – Пример сравнения трендов фрактальных сигналов с $N=1$

Сравниваемые сигналы (средний столбец дисплеев) подобраны так, чтобы их тренды охватывали полный диапазон измерения - от левой до правой границ, отображенных в левом и правом столбцах, соответственно. Все сигналы имеют одинаковое распределение (равномерное, «even») мгновенных значений, но разные количественные оценки «силы» тренда. Например, верхний сигнал имеет явный убывающий тренд $M=0,98$, практически полностью (на 98%) совпадающий с правой границей. Нижний сигнал, наоборот, обладает тенденцией к возрастанию $M=-0,95$ и потому на 95% совпадает с левой границей трендового диапазона.

Средний сигнал имеет явно выраженную переменную компоненту, показатель «силы» тренда этого сигнала оказывается близким к нулю. Однако, это не означает, что тренд вовсе отсутствует: за время наблюдения $N = 1024$ конечное значение сигнала увеличилось по сравнению с начальным с 0,2 до 0,6 что говорит о наличии некоторой возрастающей тенденции.

Для полноты исследования было изучено поведение алгоритма при анализе периодических сигналов. В таблице 1 представлены некоторые характерные данные, указывающие на присутствие двух закономерностей: зависимости показателя M от начальной фазы и частоты периодических сигналов.

Результаты анализа «силы» тренда М периодических сигналов

№ п/п	Сигнал	Р – количество периодов за время наблюдения N = 1000		
		1	10	100
1	Синусоида	0,75	0,05	0,005
2	Косинусоида	0,0025	0,0016	0
3	Треугольный импульсный	0,67	0,05	0,005
4	Прямоугольный импульсный	1	0,006	0
5	Пилообразный импульсный	0,5	0,029	-0,01

На рисунке 4 показаны зависимости показателя тренда (М) от сдвига (Shift) на примере синусоидального и косинусоидального сигналов в диапазоне от 0 до N/2, где N – объем выборки (частота = 1). Полученные данные позволяют ввести аналитическое описание зависимости показателя тренда М от сдвига фаз для сигналов типа синусоида (sin) и косинусоида (cos):

$$M[\sin] = 0,75\cos(2\pi n/N); M[\cos] = 0,75\sin(2\pi n/N), \text{ где } 0 \leq n \leq N/2.$$

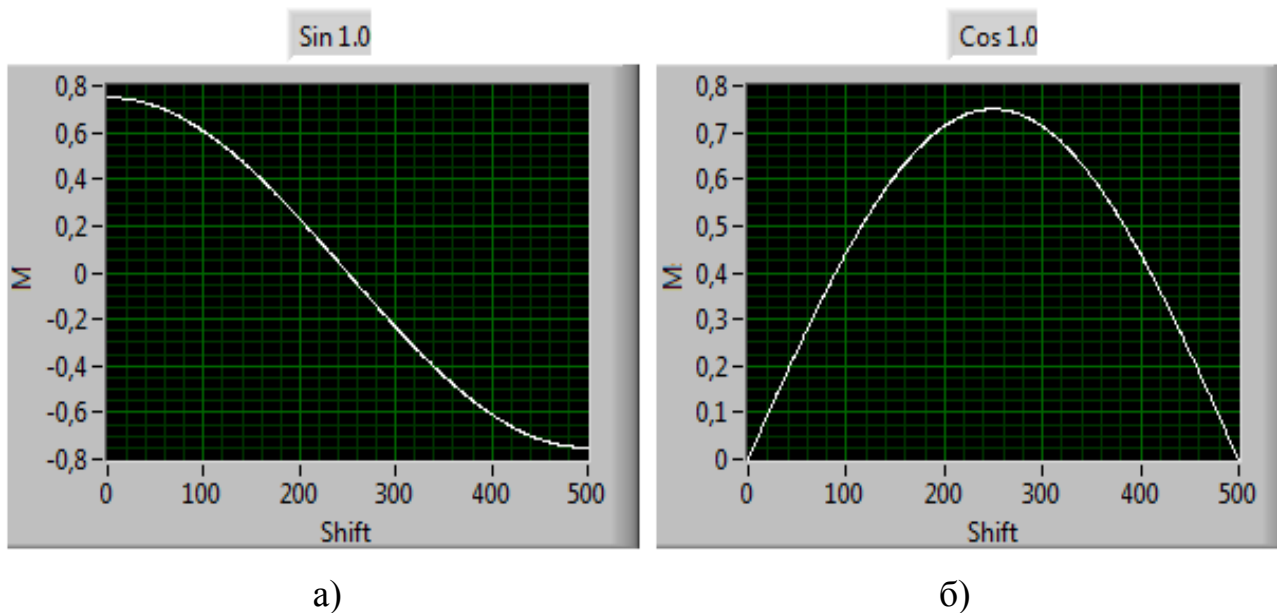


Рисунок 4 – Зависимость показателя М от сдвига фаз Shift для синусоиды (а) и косинусоиды (б)

Выводы по результатам проведенных исследований.

1) Предложенный метод является универсальным, поскольку, во-первых, не требует априорных знаний об исследуемом процессе. Во-вторых, в нем используется модель измерения неупорядоченности (хаоса), как всеобщей меры состояния сложных объектов и процессов. В-третьих, для реализации процедур измерения не требуется никаких специальных шкал – эти шкалы (списки) формируются непосредственно из отсчетов исследуемого процесса.

2) Предложенная мера «силы» тренда M на самом деле является комплексным показателем соотношения колебательности и тренда исследуемого сигнала: колебательность максимальна, когда тренд равен нулю и наоборот. Именно поэтому стационарные случайные сигналы можно классифицировать как «колебательные», а фрактальные – как «трендовые». В периодических сигналах имеется возможность управлять границей перехода из класса «трендовых» (на низких частотах) в класс «колебательных» (на высоких частотах) с помощью задания частоты колебаний.

3) Метод использует автоматическую классификацию типов тренда, устанавливая правила сравнения сигналов между собой.

Список литературы

1. Антонов, В. И. Адаптивный структурный анализ электрических сигналов: теория и ее приложения в интеллектуальной электроэнергетике / В. И. Антонов. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та. – 2018. – 334 с. – Текст : непосредственный.

2. Алгоритм оценки состояния гидроагрегата на основе идентификационных измерений вибросигналов / Ю. Н. Кликушин, К. Т. Кошеков, В. Ю. Кобенко, Е. С. Трунин. – Текст : непосредственный // Дефектоскопия. – 2014. – №7. – Т.50. – С. 44–50.

3. Елисеева, И. И. Общая теория статистики : учебник / И. И. Елисеева, М. М. Юзбашев. – Москва : Финансы и статистика, 2001. – 480 с. – Текст : непосредственный.

4. Кликушин, Ю. Н. Идентификационный способ классификации сигналов / Ю. Н. Кликушин, В. Ю. Кобенко. – Текст : непосредственный // Омский научный вестник. – 2013. – №2(120). – С. 267–272.

5. Кобенко, В. Ю. Определение качества поверхности бумаги методом фрактального анализа / В. Ю. Кобенко, С. З. Ихлазов, А. В. Голунов. – Текст : непосредственный // Омский научный вестник. – 2011. – №3(103). – С. 330–334.

6. Диагностика насосного агрегата на основе идентификационных измерений вибросигналов / К. Т. Кошеков, Ю. Н. Кликушин, В. Ю. Кобенко [и др.]. – Текст : непосредственный // Дефектоскопия. – 2016. – №5. – С. 36–43.

7. Кликушин, Ю. Н. Основы идентификационных измерений / Ю. Н. Кликушин, В. Ю. Кобенко ; Омский гос. техн. ун-т. – Омск, 2006.–18 с. – Деп. в ВИНТИ № 1540-B2006. – Текст : непосредственный.

8. Кобенко, В. Ю. Фрактальная идентификационная шкала / В. Ю. Кобенко. – Текст : непосредственный // Омский научный вестник. – 2009. – №3(83). – С. 205–213.

9. Классификационные измерения: методы и реализация / В. В. Губарев, А. А. Горшенков, Ю. Н. Кликушин, В. Ю. Кобенко. – Текст : непосредственный // Автометрия. – 2013. – № 2. – Т. 49. – С. 76–84.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Кобенко Вадим Юрьевич

Тобольский индустриальный институт – филиал «Тюменский индустриальный университет» (филиал ТИУ в г. Тобольске).
Зона ВУЗов, № 5, корп. 1, г. Тобольск 626158, Тюменская обл., Российская Федерация.
Доктор технических наук, профессор кафедры электроэнергетики филиала ТИУ в г. Тобольске.
Тел.: +7 (3456) 27-77-12.
E-mail: kobra_vad@rambler.ru.

Чувочина Ирина Владимировна

Тобольский индустриальный институт – филиал «Тюменский индустриальный университет» (филиал ТИУ в г. Тобольске).
Зона ВУЗов, № 5, корп. 1, г. Тобольск 626158, Тюменская обл., Российская Федерация.
Заведующий лабораторией кафедры электроэнергетики филиала ТИУ в г. Тобольске.
Тел.: +7 (3456) 27-77-12.
E-mail: chuvochinaiv@tyuiu.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Kobenko Vadim Yuryevich

Tobolsk Industrial Institute – branch of the "Tyumen Industrial University" (branch of TIU in Tobolsk).
Zone of higher education institutions, No. 5, building 1, Tobolsk 626158, Tyumen region, the Russian Federation.
Doctor of Technical Science, Professor of the Department of electric power engineering of the branch of TIU in Tobolsk.
Phone: +7 (3456) 27-77-12.
E-mail: kobra_vad@rambler.ru.

Chuvochina Irina Vladimirovna

Tobolsk Industrial Institute – branch of the "Tyumen Industrial University" (branch of TIU in Tobolsk).
Zone of higher education institutions, No. 5, building 1, Tobolsk 626158, Tyumen region, the Russian Federation.
Head of the laboratory of the Department of electric power engineering of the branch of TIU in Tobolsk, branch of TIU in Tobolsk.
Phone: +7 (3456) 27-77-12.
E-mail: chuvochinaiv@tyuiu.ru.

Зольников Александр Евгеньевич
Тобольский индустриальный институт –
филиал «Тюменский индустриальный
университет» (филиал ТИУ в г. Тобольске).
Зона ВУЗов, № 5, корп. 1, г. Тобольск 626158,
Тюменская обл., Российская Федерация.
Обучающийся группы ЭСб-17 филиала
ТИУ в г. Тобольске.
Тел.: 8-982-946-44-26.
E-mail: zolnicovalex@yandex.ru.

Zolnikov Alexander Evgenievich
Tobolsk Industrial Institute – branch of the
"Tyumen Industrial University" (branch of TIU
in Tobolsk).
Zone of higher education institutions, No. 5,
building 1, Tobolsk 626158, Tyumen region,
the Russian Federation.
Student of the ESB-17 group of the TIU branch
in Tobolsk.
Phone: 8-982-946-44-26.
E-mail: zolnicovalex@yandex.ru.

УДК 681.518.5; 510.644.4; 629.4

В. Ю. Тэттер, А. Ю. Тэттер, И. В. Денисова, И. Л. Корнейчук
Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС),
г. Омск, Российская Федерация

ПРИМЕНЕНИЕ НЕЧЕТКОЙ ЛОГИКИ ДЛЯ ЗАДАЧ ВИБРОДИАГНОСТИКИ

В статье показано, что традиционные математические подходы, используемые для постановки правильного диагноза, имеют ограничения в силу особенностей и технологии диагностирования. Для улучшения качества диагностирования предложено использовать аппарат нечетких множеств. Произведен выбор наиболее подходящих функций принадлежности. Выделено два подхода (метод анализа иерархий и метод нечеткого логического вывода), на которых основана модель системы принятия решения в условиях нечетких входных данных.

Ключевые слова: Диагностирование, роторные механические узлы, вибрация, нечеткие множества, лингвистическая переменная, лингвистический терм, нечеткий логический вывод.

Vladimir Y. Tetter, Alexandr Y. Tetter, Inna V. Denisova, Ivan L. Korneychuk
Omsk State Transport University (OSTU), Omsk, the Russian Federation

APPLYING THE FUZZY SET THEORY TO SOLVE VIBRATION DIAGNOSTICS PROBLEMS

The article shows that traditional mathematical approaches used for making an accurate diagnosis have limitations due to the diagnostic features and techniques. The article offers to use the fuzzy set theory to improve the quality of diagnostics. The article introduces the most suitable membership function selection. The authors have distinguished two approaches such as a hierarchy analysis method and a fuzzy inference method on which a decision-making system model under conditions of fuzzy input data is based.

Keywords: Diagnostics, rotary mechanical components, vibration, fuzzy sets, linguistic variable, linguistic term, fuzzy inference.

Современные тенденции развития вибродиагностического оборудования.

Анализ состояния дел по вибродиагностированию как в России, так и за рубежом показывает, что аппаратная часть вибродиагностического оборудования экспертного класса соответствует современному уровню электроники, но имеются большие резервы в алгоритмах диагностирования, методах обработки вибросигнала, использовании относительно новых математических подходов.

Задачей настоящего исследования является оценка применимости математического аппарата нечетких множеств для решения задач диагностирования роторных механических узлов по сигналам вибрации.

Состояние вопроса. Традиционные методы обработки и анализа вибросигналов.

Чаще всего в вибродиагностическом (ВДО) оборудовании используют анализ параметров временного сигнала (средневыпрямленное значение, среднеквадратичное значение, пик фактор, коэффициент формы, коэффициент импульсности) и спектральный анализ на основе преобразования Фурье (дает большую часть информации о состоянии объекта).

Кепстральный анализ. По отношению к спектру кепстр является таким же сжатием данных как сам спектр по отношению к временной реализации [1]. Известны попытки применения кепстров для обработки вибросигнала, которые не показали обнадеживающих результатов.

Вейвлет преобразование. Это наиболее перспективный метод, дающий возможность исследовать изменения спектров во времени, т.е. анализировать трехмерную спектральную модель вибросигнала с третьей координатой по времени.

Особенности диагностирования вибросигнала дефектного узла.

1) Относительная нестабильность во времени амплитуды случайного сигнала. Девиация частоты вращения при диагностировании во время эксплуатации.

2) Наличие пограничных состояний, характеризующихся тем, что амплитуды характерных частот, определяющих вид дефекта, колеблются около пороговых значений, то превышая их, то становясь меньше. То есть объект диагностирования переходит в течение короткого промежутка времени из одной категории в другую в смысле оценки его технического состояния.

3) В жестком алгоритме поиска диагностических признаков практически невозможно формализовать отслеживание проявления таких особенностей.

Указанные особенности могут проявляться в постановке неправильного диагноза: например, вместо сильного дефекта может быть признан слабым и наоборот или дефект вообще может быть не обнаружен. Цена таких ошибок может быть очень велика [2].

Путем решения обозначенных проблем может быть использование при диагностировании подшипников по вибросигналу математического аппарата нечетких множеств.

Основные понятия математического аппарата нечетких множеств.

Математический аппарат нечетких множеств «*fuzzisets*» представляет собой относительно новый подход к формализации неопределенностей различных видов.

Суть нововведения, предложенного Лотфи Заде, заключалась в том, что человеческие рассуждения на основе словесного описания не могут быть выражены традиционными математическими средствами. Для решения этого противоречия он предложил расширить классическую трактовку понятия множества, введя в употребление функцию принадлежности (или характеристическую функцию) отдельного элемента к множеству, которая может принимать значения не только 0 или 1 (как для обычных множеств), а любые значения в интервале от 0 до 1. Функция принадлежности в этом случае является показателем «близости» отдельного элемента множества к 0 или 1.

Для дальнейшего понимания проблемы необходимо привести несколько базовых определений из теории множеств [3].

В теории множеств вводится ряд обозначений: $x \in A$ – читается « x принадлежит A » и $x \notin A$ – читается « x не принадлежит A », (здесь x – элемент, A

– множество). Для обозначения того факта, что элемент x может принадлежать или не принадлежать множеству A вводится характеристическая функция $\mu_A(x)$, принимающая только лишь два значения 0 или 1 (1):

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 1, & \text{если } x \in A \\ 0, & \text{если } x \notin A \end{cases} \quad (1)$$

В этом случае выполняется четкая, однозначная классификация элемента x на принадлежность его к множеству A . Во многих практических случаях не всегда удается выполнить такую четкую классификацию.

Пусть E — универсальное множество, x — элемент E , а R — некоторое свойство. Обычное (четкое) подмножество A универсального множества E , элементы которого удовлетворяют свойству R , определяется как множество упорядоченных пар.

$A = \{\mu_A(x)/x\}$, где $\mu_A(x)$ — характеристическая функция, принимающая значение 1, если x удовлетворяет свойству R , и 0 — в противном случае.

Нечеткое подмножество отличается от обычного тем, что для элементов x из E нет однозначного ответа «да-нет» относительно свойства R . В связи с этим нечеткое подмножество A универсального множества E определяется как множество упорядоченных пар $A = \{\mu_A(x)/x\}$, где $\mu_A(x)$ — характеристическая функция принадлежности (или просто **функция принадлежности**), принимающая значения в некотором вполне упорядоченном множестве M (например, $M = \{0,1\}$).

Функция принадлежности указывает степень (или уровень) принадлежности элемента x подмножеству A . Множество M называют множеством принадлежностей. Если $M = \{0,1\}$, то нечеткое подмножество A может рассматриваться как обычное или четкое множество [4].

«Лингвистическая переменная» это переменная, которая задана на количественной шкале базисной переменной x и принимает значения в виде слов и словосочетаний естественного языка. В нашем случае, при диагностировании роторных механических узлов, в частности, подшипников качения в качестве первой лингвистической переменной целесообразно принять термин «Техническое состояние». Каждое отдельное значение лингвистической переменной называют «*лингвистическим термом*», который задается не в виде конкретного числа, а с помощью одной функции принадлежности. Таким образом, каждому терму одной лингвистической переменной соответствует

свое нечеткое множество, которое задается не в виде числа, а при помощи функции принадлежности $\mu_A(x)$.

В зависимости от объекта диагностирования для лингвистической переменной «Техническое состояние» целесообразно вводить разное количество термов. Так, например, для подшипников буксового узла колесной пары вагона достаточно двух термов – «годен» и «не годен» или «допустить в эксплуатацию» и «не допустить в эксплуатацию». Для подшипников колесно-моторного блока локомотива такого количества термов недостаточно, и они могут быть определены как «годен», «обратить внимание», «не годен». Может быть введен и четвертый терм – «провести внеочередное диагностирование».

Процедура определения значения функции принадлежности $\mu_A(x^*)$, соответствующего конкретному значению x^* переменной x , называется **фаззификацией**.

Основной операцией фаззи-логики является процедура **нечеткого вывода** (англ. – *fuzzyreasoning*). При помощи этой процедуры из нечетких условий получают **приближенные решения**.

Приведем так же определения нечеткого логического вывода и нечеткой базы знаний [3].

Нечетким логическим выводом (*fuzzylogicinference*) называется аппроксимация зависимости $y = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ с помощью нечеткой базы знаний и операций над нечеткими множествами.

Нечеткой базой знаний (*fuzzyknowledgebase*) о влиянии факторов ($x_1, x_2, \dots, x_n$) на значение отклика y называется совокупность логических высказываний (предикатных правил Π_i) типа (3):

$$\begin{aligned} \Pi_1: & \text{если } x \text{ есть } A_1, \text{ то } y \text{ есть } B_1, \\ \Pi_2: & \text{если } x \text{ есть } A_2, \text{ то } y \text{ есть } B_2, \\ \Pi_n: & \text{если } x \text{ есть } A_n, \text{ то } y \text{ есть } B_n, \end{aligned} \quad (2)$$

где x – входная переменная (имя для известных значений данных),

y – переменная вывода (имя для значения данных, которое будет вычислено),

A и B – функции принадлежности, определенные, соответственно, на x и y .

Фаззификацию производят с помощью двух основных методов [5]:

Прямой метод. В этом случае при определении нечеткого множества функции принадлежности задаются на основании экспертных оценок и в

значительной степени субъективны. При этом функции задаются не точно – фиксируется вид функции и ее характерные значения.

Косвенный метод. Этот метод используют, если формализуемый объект a имеет измеримые свойства. К такому способу определения функции принадлежности относят метод попарных сравнений на конечных дискретных множествах. Определение функции принадлежности (фаззификация) сводится к нахождению некоторого вектора μ из системы линейных уравнений $A\mu = \lambda\mu$, где λ – максимальное из возможных собственных значений матрицы A . Построение функции принадлежности зависит от индивидуальных восприятий объекта описания экспертом.

Практические процедуры нахождения функций принадлежности решаются уже как типовые задачи в универсальной компьютерной математической среде *MATLAB* и с помощью специального программного инструментария – программы *fuzzyTECH* и пакета программ *Simulink*.

Для принятия решения при диагностировании роторных механических узлов подвижного состава по сигналам вибрации в условиях неопределенности (неоднозначности) входной информации можно использовать одновременно две процедуры ее обработки, что было предложено И. З. Мухаметзяновым [6]. Первая процедура – методика анализа иерархий (МАИ), использующая нечеткие числовые оценки приоритетов в матрице парных сравнений [7], вторая – методика нечеткого логического вывода (НЛВ) [8].

Метод анализа иерархий (МАИ) [9] оценивается как мощный метод для решения сложных задач принятия решений. В основе многокритериального метода МАИ лежит процесс *взвешивания альтернатив*. При этом множество атрибутов – участников процесса распределяются в соответствии с их важностью – весом, а сами веса атрибутов определяются путем проведения процедуры попарного сравнения.

Достоинство использования нечеткого подхода состоит в назначении относительного значения атрибутов с использованием нечетких чисел, вместо точных [6].

Метод нечеткого логического вывода (НЛВ). В случае, когда эксперты затрудняются в расстановке весовых коэффициентов, вместо МАИ можно использовать метод нечеткого логического вывода (НЛВ), который позволяет экспертам оперировать лингвистическими переменными – лингвистическими термами о которых уже было сказано выше. Применительно к оценке

технического состояния роторных механических узлов могут использоваться логические термы «работоспособен», «обратить внимание», «не работоспособен» и т.п.

Предпочтительными видами функций принадлежности для обработки выходной вибродиагностической информации являются Треугольная (*trimf*) (рисунок 1) и Трапецеидальная (*trapmf*) (рисунок 2), так как эти функции хорошо работают с неопределенностями типа: «приблизительно равно», «среднее значение», «расположен в интервале», «подобен объекту», «похож на предмет» и т.д.

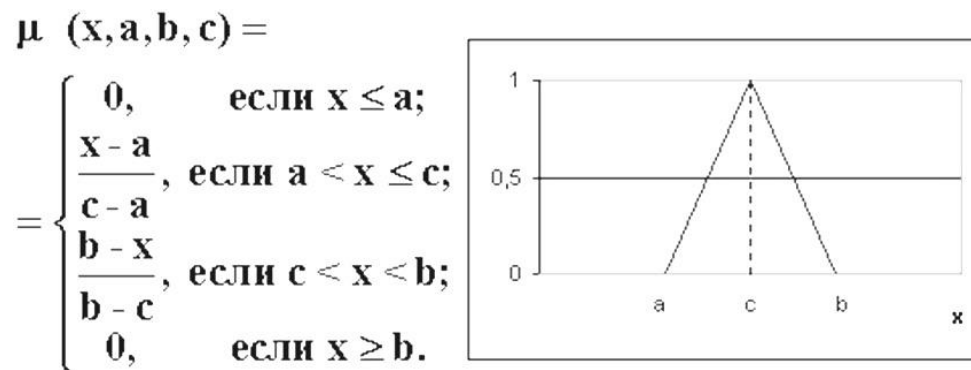


Рисунок 1 – Треугольная функция принадлежности

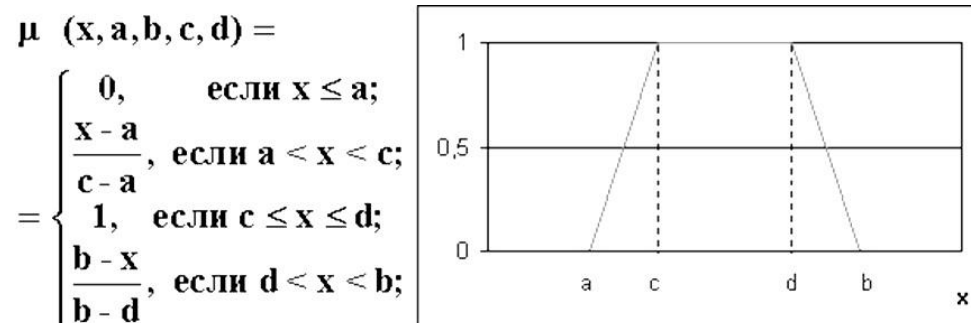


Рисунок 2 – Трапецеидальная функция принадлежности

К данному типу функций принадлежности можно отнести целый класс кривых, которые по своей форме напоминают колокол, сглаженную трапецию или букву "П". Колоколообразная (*gbellmf*)- рисунок 3.

$$\mu(x, a, b, c) = \frac{1}{1 + \left| \frac{x-c}{a} \right|^{2b}}, \quad (3)$$

где a – коэффициент концентрации функции принадлежности; b – коэффициент крутизны функции принадлежности; c – координата максимума функции принадлежности.

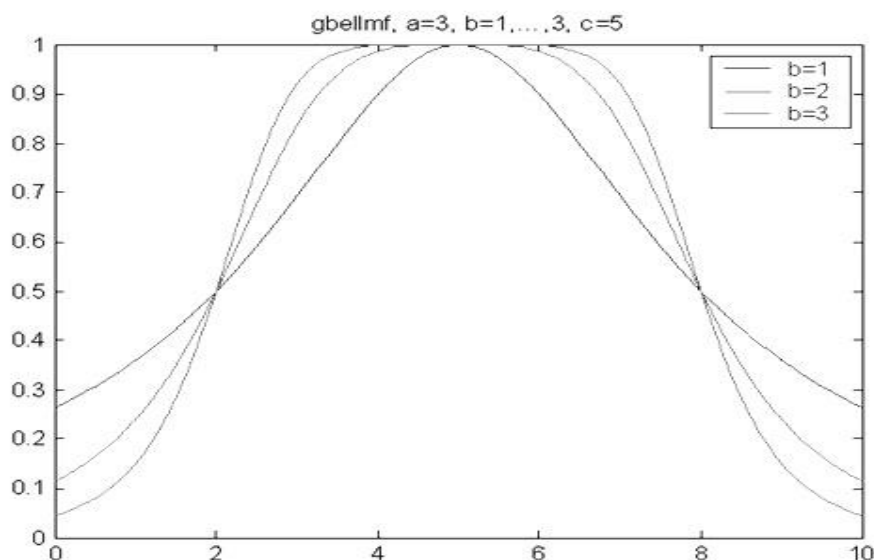


Рисунок 3 – Колоколообразная функция принадлежности

Достоинство метода НЛВ состоит в том, что он позволяет минимальным количеством нечетких правил адекватно описать сложные многомерные зависимости «вход-выход». Но этот метод не лишен и недостатков, которые заключаются субъективностью определения функций принадлежности, сложностью построения адекватной базы знаний правил нечеткого логического вывода и выбором процедуры дефаззификации результирующего показателя [6].

На рисунке 4 приведена укрупненная схема, которая обобщает процедуры обработки экспертной информации в условиях неоднозначности входной информации (входных данных) и является моделью системы принятия решения [10].

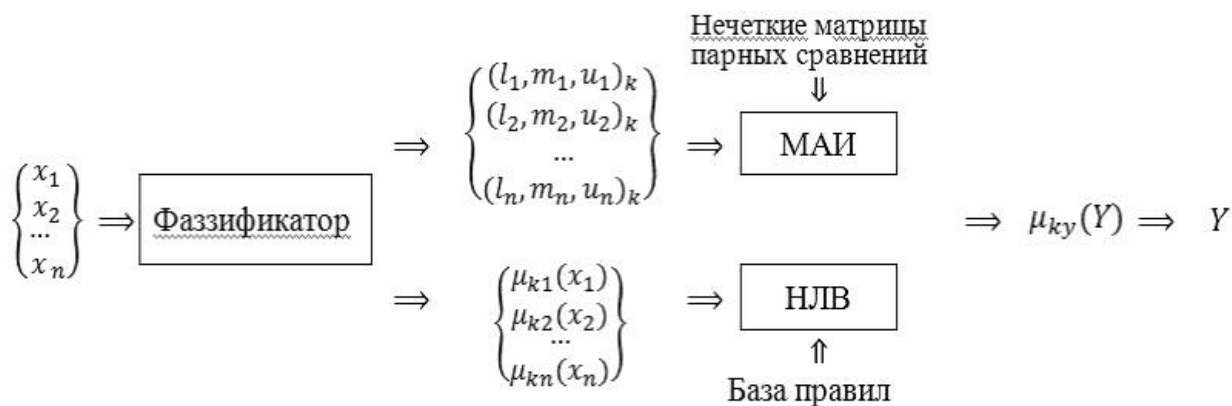


Рисунок 4 – Модель системы принятия решения в условиях нечетких входных данных

Выводы.

1. Особенности диагностирования роторных механических узлов по сигналам вибрации ограничивают возможности использования традиционного математического аппарата четкой логики.

2. Дальнейшее повышение качества диагностирования может быть достигнуто с использованием математического аппарата нечетких множеств.

3. Целесообразно использовать сочетание двух подходов нечеткой логики: Метод анализа иерархий и Метод нечеткого логического вывода.

4. Формализацию и определение функций принадлежности, весовых коэффициентов следует производить с помощью группы опытных экспертов.

5. Перспективным по мнению авторов направлением в дальнейшем можно считать комбинацию аппарата нечетких множеств и нейронных сетей.

Список литературы

1. Костюков, В. Н. Основы виброакустической диагностики и мониторинга машин / В. Н. Костюков, А. П. Науменко. – Омск: Омский гос. технический ун-т, 2011. – 360 с. – Текст : непосредственный.

2. Тэттэр, В. Ю. Расчет экономической эффективности использования вибродиагностического оборудования на железнодорожном транспорте / В. Ю. Тэттэр. – Текст : непосредственный // Экономика железных дорог. – 2010. – №10. – С 60–69.

3. Конышева, Л. К. Основы теории нечетких множеств : учебное пособие / Л. К. Конышева, Д. М. Назаров. – Санкт-Петербург : Питер, 2011. – 192 с. – Текст : непосредственный.

4. Мухаметзянов, И. З. Нечеткий логический вывод и нечеткий метод анализа иерархий в системах поддержки принятия решений: приложение к оценке надежности технических систем / И. З. Мухаметзянов. – Текст : непосредственный // Кибернетика и программирование. – 2017. – № 2. – С. 59.

5. Дегтярев, А. Н. Методология построения иерархической системы показателей развития в сфере туристического бизнеса на основе нечетко-логических процедур принятия решений / А. Н. Дегтярев, И. З. Мухаметзянов, Н. В. Рожкова. – Текст : непосредственный // Теоретическая и прикладная экономика. – 2016. – № 1. – С.45–57.

6. Мухаметзянов, И. З. Нечетко-логическая процедура прогнозирования развития нефтеперерабатывающих предприятий в условиях неопределенности / И. З. Мухаметзянов, В. П. Мешалкин. – Текст : непосредственный // Нефтегазовое дело. – 2014. – №4. – С. 126–133.

7. Саати, Т. Принятие решений. Метод анализа иерархий / Т. Саати. – Москва : Радио и связь, 1993. – 278 с. – Текст : непосредственный.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Тэттер Владимир Юрьевич

Омский государственный университет
путей сообщения (ОмГУПС).
Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046,
Российская Федерация.
Кандидат технических наук, доцент кафедры
«Теоретическая электротехника» ОмГУПС.
Тел.: +7 (3812) 37-60-82.
E-mail: tetterv@gmail.com.

Тэттер Александр Юрьевич

Омский государственный университет
путей сообщения (ОмГУПС).
Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046,
Российская Федерация.
Кандидат технических наук, доцент кафедры
«Теоретическая электротехника» ОмГУПС.
Тел.: +7 (3812) 37-60-82.
E-mail: tetterau@mail.ru.

Денисова Инна Валерьевна

Омский государственный университет
путей сообщения (ОмГУПС).
Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046,
Российская Федерация.
Старший преподаватель кафедры
«Русский и иностранные языки» ОмГУПС.
Телефон: (3812) 31-06-79.

Корнейчук Иван Леонидович

Омский государственный университет
путей сообщения (ОмГУПС).
Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046,
Российская Федерация.
Аспирант.
kornil2009@mail.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Tetter Vladimir Yurievich

Omsk State Transport University (OSTU).
35, Marx st., Omsk, 644046,
the Russian Federation.
Ph. D. in Engineering, Associate Professor
of the “Theoretical Electrical Engineering”
Department OSTU.
Phone: +7 (3812) 37-60-82.
E-mail: tetterv@gmail.com.

Tetter Aleksandr Yurievich

Omsk State Transport University (OSTU).
35, Marx st., Omsk, 644046,
the Russian Federation.
Ph. D. in Engineering, Associate Professor
of the “Theoretical Electrical Engineering”
Department OSTU.
Phone: +7 (3812) 37-60-82.
E-mail: tetterv@mail.ru.

Denisova Inna Valerievna

Omsk State Transport University (OSTU).
35, Marx st., Omsk, 644046,
the Russian Federation.
Institute of Management and Economics,
“Russian and foreign languages” Department,
Senior lecturer.
Phone: (3812) 31-06-79.

Korneichuk Ivan Leonidovich

Omsk State Transport University (OSTU).
35, Marx st., Omsk, 644046,
the Russian Federation.
Graduate student.
kornil2009@mail.ru.

О. С. Аблялимов

Ташкентский государственный транспортный университет (ТГТУ),
г. Ташкент, Республика Узбекистан

К ИЗМЕНЕНИЮ ОГРАНИЧЕНИЙ СКОРОСТИ ДВИЖЕНИЯ ПОЕЗДА НА УЧАСТКЕ ЖЕЛЕЗНОЙ ДОРОГИ

Приводится обоснование по повышению эффективности локомотивного парка в эксплуатации посредством изменения ограничения скорости движения поезда на участке железной дороги, опираясь на условия оптимизации перевозочной работы локомотивов.

Ключевые слова: исследование, результат, грузовой поезд, тепловоз, участок пути, эксплуатация, ограничение скорости, изменение, задача оптимизации.

Oleg S. Ablyalimov

Tashkent state transport university (TSTU), Tashkent, the Republik of Uzbekistan

TO CHANGE OF TRAIN MOVEMENT SPEED LIMITS ON THE SECTION OF THE RAILWAY

The substantiation is given for increasing the efficiency of the locomotive fleet in operation by changing the speed limit of the train on the railway section, based on the conditions for optimizing the transportation work of locomotives.

Keywords: investigation, result, the freight train, the diesel locomotive, road section, exploitation, speed limit, change, optimization problem.

Настоящие исследования проводились параллельно с исследованиями [1], опираясь на работы [2-4], целью которых является обоснование выбора одного из элементов материально – технической базы и организации работы по условиям оптимизации перевозочной работы локомотивов в реальных условиях эксплуатации – это изменение ограничений скорости движения поезда на участке железной дороге.

Изменение координат наибольшей скорости движения поезда связано с усилением материально – технической базы Мб при соответствующих капиталовложениях. Выявление оптимального значения наибольшей скорости

движения поезда по тому или иному параметру выигрыша V хотя и возможно в принципе, но практически такие задачи оптимизации встречаются весьма редко, так как оптимизация $V^{ог}(S)$ напрямую связана с реконструкцией всего комплекса хозяйства железнодорожного направления.

Такого рода задачи оптимизации всего комплекса материально – технической базы Мб целого направления встречаются при организации движения высокоскоростного пассажирского транспорта, когда приходится выбирать не только оптимальные наибольшие скорости движения поезда, но и соответствующую материальную оптимальную базу, то есть подвижной состав, верхнее строение железнодорожного пути, средства связи и прочее.

В практических условиях работы на участках железных дорог нередко ставится задача по обоснованию проведения тех или иных работ, обеспечивающих увеличение ограничения скорости $V^{ог}$ движения поезда, что является задачей технико - экономического расчёта, а не задачей оптимизации, хотя общий подход к его реализации может быть основан на использовании описанных методов решения задачи оптимизации.

Таким образом, если наметить возможные изменения параметров материально – технической базы Мб (например, увеличение ограничения скорости $V^{ог}$ движения поезда), учесть капиталовложения в результате подсчёта годовых приведённых народно - хозяйственных затрат для железнодорожного участка $\mathcal{E}_{гy}$ и провести расчёты с оптимизацией, тогда можно обоснованно выбрать и объём проведения таких мероприятий. Здесь под термином "провести расчёты с оптимизацией" подразумевается выбор оптимального времени t_n^* хода поезда по перегонам и оптимального режима P_t^* управления локомотивом.

Такую задачу оптимизации можно считать закрытой по пределу изменения ограничения скорости $V^{ог}$ движения поезда.

В таблице 1 приведены результаты подсчёта величины упомянутых годовых приведённых народно - хозяйственных затрат $\mathcal{E}_{гy}$ для обоснования возможности реконструкции участка железной дороги Б - А с целью увеличения протяжённости железнодорожной линии по ограничению скорости движения поезда с 70-ти процентов до 98-ми процентов от общей длины её при указанной скорости ограничения $V^{ог} = 80$ км/ч. Движение грузовых поездов реализуется локомотивами дизельной тяги – двухсекционные грузовые тепловозы 2ТЭ10В.

Расчётные координаты организации работы Ор приняты для чётного направления – вес поезда $Q_p = 2500$ т, число осей в составе поезда $m_p = 186$ осей, время хода поезда $t_p = 11,6$ ч, число остановок поезда $z_p = 20$ остановок, общее время стоянок поезда $t_c = 4$ ч и для нечётного направления значения аналогичных указанных величин составляют: $Q_p = 3000$ т, $m_p = 186$ осей, $t_p = 9,8$ ч, $z_p = 20$ остановок, $t_c = 4$ ч.

Реконструкция верхнего строения железнодорожного пути потребует капиталовложений на сумму 2,0 млн. рублей. Грузовой поток составляет 10 млн. нетто в год в чётном направлении и 15 млн. т в год для нечётного направления. Стоимость тепловоза 2ТЭ10В приблизительно составляет 314 тыс. рублей, четырёхосного вагона - 5,2 тыс. руб. Нормативный срок окупаемости подвижного состава - 7 лет.

Таблица 1

Результаты определения величины годовых приведённых народно - хозяйственных затрат на одном из участков Среднеазиатской железной дороги

Участок	Варианты ограничения скорости движения поезда	Годовые приведённые расходы тыс. руб.	Экономия тыс. руб.
Б - А (оба направления)	первый	15226	1405
	второй	13821	

Как видно из таблицы 1, капитальные затраты необходимые для обеспечения движения поездов с указанной скоростью движения $V^{ог} = 80$ км/ч по второму варианту на железнодорожном участке Б - А окупается за 1,43 года, что подтверждает высокую эффективность мероприятий по увеличению протяжённости ограничения скорости движения поезда $V^{ог}$ на данном железнодорожном направлении.

По результатам проведённых исследований можно сделать выводы о наличии значительных резервов по повышению эффективности перевозочной работы локомотивов дизельной тяги за счёт использования оптимальных режимов ведения поезда, выбора оптимального времени хода поезда по перегонам при соответствующем режиме ведения, а также выбора оптимальных элементов материально – технической базы Мб и организации работы Ор.

Таким образом, внедрение в практику работы локомотивного комплекса железных дорог современных методов расчётов, способствующих достижению

задач всемерного повышения эффективности общественного производства, является настоящей необходимостью, при этом ряд вопросов требует дальнейшей разработки и практической проверки.

Список литературы

1. Абляимов, О. С. О выборе материально – технической базы и организации работы по условиям оптимизации перевозочной работы локомотивов / О. С. Абляимов. – Текст : непосредственный // Локомотивы. Электрический транспорт – XXI век. Великие учёные и научные школы : материалы VII Международной науч.-техн. конференции / Петербургский гос. ун-т путей сообщения Императора Александра I. – Санкт-Петербург, 2020. – С. 157 – 159.

2. Абляимов, О. С. О классификации задач оптимизации процессов / О. С. Абляимов. – Текст : электронный // Universum: технические науки. – 2020. – № 8(77). – С. 20–22. – URL: <https://7universum.com/ru/tech/archive/item/10627> (дата обращения: 16.10.2020).

3. Абляимов, О. С. К формулировке математических методов оптимальных решений / О. С. Абляимов. – Текст : электронный // Universum: технические науки – 2020. – № 9(78). – С. 14–15. – URL: <https://7universum.com/ru/tech/archive/item/10667> (дата обращения: 16.10.2020).

4. Абляимов, О. С. О решении задачи оптимизации перевозочной работы локомотивов [Текст] / О. С. Абляимов. – Текст : электронный // Universum: технические науки – 2020. – № 9(78). – С. 27–29. URL: <https://7universum.com/ru/tech/archive/item/10698> (дата обращения: 16.10.2020).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Абляимов Олег Сергеевич

Ташкентский государственный
транспортный университет (ТГТУ).
ул. Элтузар, д. 25, г. Ташкент, 100167,
Республика Узбекистан.
Кандидат технических наук, старший
научный сотрудник, и.о. профессора
кафедры «Локомотивы и локомотивное
хозяйство» ТГТУ.
Тел. +998371-254-52-16.
E-mail: o.ablyalimov@gmail.com.

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Ablyalimov Oleg Sergeyevich

Tashkent state transport university (TSTU).
25, Eltuzar str., Tashkent, 100167,
the Republik of Uzbekistan.
Doctor of philosophy, chief scientific worker,
acting professor of the chair «Locomotives
and locomotive, economy» TSTU.
Phone: +998371-254-52-16.
E-mail: o.ablyalimov@gmail.com.

О. С. Аблялимов

Ташкентский государственный транспортный университет (ТГТУ),
г. Ташкент, Республика Узбекистан

К ВОПРОСУ НОРМИРОВАНИЯ ДЕНЕЖНЫХ СРЕДСТВ НА ПЕРЕВОЗОЧНУЮ РАБОТУ ЛОКОМОТИВОВ

Приводится методика по обоснованию норм расхода денежных средств на перевозочную работу локомотивов с учётом данных конкретной поездки, внедрение которой в практику работы локомотивного комплекса железных дорог будет способствовать повышению эффективности работы железнодорожного транспорта.

Ключевые слова: исследование, результат, грузовой поезд, методика, денежные средства, перевозочная работа, нормирование, локомотив, эксплуатационные расходы.

Oleg S. Ablyalimov

Tashkent state transport university (TSTU), Tashkent, the Republik of Uzbekistan

TO THE QUESTION OF NORMALIZATION CASH FOR TRANSPORTATION WORK OF LOCOMOTIVES

A methodology is presented to substantiate the rates of expenditure of funds for the transportation work of locomotives, taking into account the data of a specific trip, the introduction of which into the practice of the locomotive complex of railways will contribute to an increase in the efficiency of railway transport.

Keywords: research, result, freight train, methodology, cash, transportation work, rationing, locomotive, operating costs.

Опыта проведения нормирования денежных средств на перевозочную работу локомотивов пока что не имеется и постановка этого вопроса носит предварительный характер.

По аналогии с нормированием расхода топливно – энергетических ресурсов на тягу поездов [1-4] можно организовать и нормирование денежных расходов по данным конкретной поездки, используя разработанную в настоящей работе методику.

Это позволит иметь представление об экономике каждой поездки и проводить детальный анализ всех слагаемых расхода, комплексно отражая результаты деятельности всех работников локомотивного комплекса, связанных с перевозочной работой локомотивов.

Процесс указанного нормирования проводится в следующей последовательности.

Эксплуатационные затраты за поездку составляют

$$\mathcal{E} = \mathcal{E}_x + \mathcal{E}_b^c + \mathcal{E}_3^c + \mathcal{E}_2 + \mathcal{E}_3 + \mathcal{E}_5 + \mathcal{E}_6 + \mathcal{E}_7 \quad (1)$$

или

$$\mathcal{E} = \mathcal{E}_k + \mathcal{E}_b + \mathcal{E}_n \quad (2)$$

где $\mathcal{E}_k$ – часть эксплуатационных расходов, зависящая от касательной механической работы локомотива;

$\mathcal{E}_b$ – часть эксплуатационных расходов, зависящая только от времени нахождения поезда на участке;

$\mathcal{E}_n$ – часть эксплуатационных расходов, не зависящая от затрат энергии и времени.

Величину указанной слагаемой $\mathcal{E}_k$ выразим следующим образом

$$\mathcal{E}_k = l_{тэк} E_k + j A_k + M_{AB} A_c = \frac{A_k}{\eta_3} \quad (3)$$

где η_3 – соотношение касательной механической работы локомотива к части денежных затрат $\mathcal{E}_k$. Определяется по результатам тягово – энергетических расчётов в зависимости от условий работы и принятым режимом ведения поезда.

Величину слагаемой $\mathcal{E}_b$ выразим суммой

$$\mathcal{E}_b = a_3 j g_x t_{сл} + l_r t_x + \mathcal{E}_2 + \mathcal{E}_3 + \mathcal{E}_5 + \mathcal{E}_6 + \mathcal{E}_7 \quad (4)$$

Слагаемые указанной суммы будут в руб/поездуучасток:

$a_3 j g_x t_{сл}$ – расходы пропорциональные времени стоянок на участке и по обороту локомотива, в течение которого расходовались энергия на служебные нужды;

$l_r t_x$ – расходы пропорциональные времени хода поезда;

$\mathcal{E}_2 = \frac{c_{л} a_p^л t_0^л}{8760}$ – расходы на реновацию локомотива;

$\mathcal{E}_3 = \frac{c_{впв} a_p^в t_0^в}{8760}$ – расходы по реновации вагонов состава;

$\mathcal{E}_5 = l_n \frac{L_c}{L_n}$ – расходы по накоплению вагонов на один поезд;

$\mathcal{E}_6 = \frac{l_p M_p L_p t_0^л}{8760}$ – расходы по резервному пробегу на поезд – участке при l_p , руб/локомотиво км (единичная расходная ставка) и $M_p \cdot L_p$ – годовому резервному пробегу, локомотиво км;

$\mathcal{E}_7 = \frac{a_{\text{ст}} c_{\text{в}} n_{\text{в}} t_{\text{в}}^0}{8760}$ - расходы по содержанию станционных путей при принятой

доле затрат на содержание станционных путей $a_{\text{ст}}$ от стоимости вагонов;

$t_{\text{сл}}$ – общее время стоянок, в течение которого расходуется энергия на служебные нужды, $t_{\text{сл}} = t_{\text{с}} + t_{\text{у}} + t_{\text{л}}$;

$t_{\text{л}}^0$ – общее время нахождения локомотива на участке счета, $t_{\text{л}}^0 = t_{\text{х}} + t_{\text{с}} + t_{\text{у}} + t_{\text{л}}^{\text{с}}$;

$L_{\text{с}}$ – длина участка счёта, км;

$t_{\text{л}}$ – время нахождения локомотива на станциях оборота, в течение которого расходуется энергия;

$t_{\text{л}}^{\text{с}}$ – общее время нахождения локомотива на станциях оборота,

$t_{\text{в}}^0$ – общее время нахождения вагонов на участке, $t_{\text{в}}^0 = t_{\text{х}} + t_{\text{с}} + t_{\text{у}}$;

$L_{\text{н}}$ – участок движения поезда без переформирования состава, км.

Время выражается в ч, и время относится к рассматриваемому периоду поездки.

Окончательно величину $\mathcal{E}_{\text{в}}$ выразим так

$$\mathcal{E}_{\text{в}} = a_{\text{э}} j g_{\text{х}} t_{\text{сл}} + l_{\text{р}} t_{\text{х}} + \frac{l_{\text{н}} L_{\text{с}}}{L_{\text{н}}} + \frac{t_{\text{л}}^0}{8760} (c_{\text{л}} a_{\text{р}}^{\text{л}} + M_{\text{р}} L_{\text{р}} l_{\text{р}}) + \frac{t_{\text{в}}^0 c_{\text{в}} n_{\text{в}}}{8760} (a_{\text{р}}^{\text{в}} + a_{\text{ст}}) \quad \text{руб/поездоучасток} \quad (5)$$

Доля расхода не зависящая от затрат энергии и времени

$$\mathcal{E}_{\text{в}} = \frac{[l_{\text{н}} m + l_{\text{тк}} \cdot (P_0 + Q)] S \cdot t_{\text{в}}^0}{8760}, \quad \text{руб/поездоучасток} \quad (6)$$

Эксплуатационные расходы следует определять с учётом действующей нормы расхода энергии для конкретной поездки при данных Q , m , t , z , $t_{\text{с}}$ и прочие, а также действующих норм затрат на ремонт и так далее.

Соответствующие расчёты норм расхода денежных средств для поездок варианта работы ВР производится с учётом конкретных величин Q , m , t , z и достигнутых характеристик режима ведения поезда для параметра выигрыша – эксплуатационных расходов, то есть показателей $\eta_{\text{э}}$, α и β , зависящих опять - таки от величин Q , m , t и z . Определяются характеристики режима на основании тягово – энергетических расчётов проводимых на ЭВМ, порядком аналогичным изложенным выше при описании метода нормирования расхода энергии.

Расчёты расхода денежных средств необходимо делать за поездку, как по норме $\mathcal{E}_{\text{нр}}$, так и по практическим значениям затрат $\mathcal{E}_{\text{ф}}$.

В первом случае используют действующие нормы расхода энергии, времени хода и так далее, во втором же случае принимают для расчётов

фактический расход энергии, времени и прочие.

Сравнение полученных данных позволит иметь представление об отклонениях по всем статьям расхода и получить данные о величине каждой составляющей общего расхода денежных средств.

Таким образом, наличие данных нормирования денежных средств будет способствовать более точному и обоснованному планированному расхода денежных средств и повышению эффективности работы всего локомотивного комплекса (парка) железнодорожного транспорта.

Список литературы

1. Толкачёв, А. В. Нормирование расхода топлива тепловозами с использованием ЭВМ / А. В. Толкачёв. – Текст : непосредственный // Труды ТашИИТ. – 1972. – №88. – С. 87–97.

2. Толкачёв, А. В. Расчёты норм расхода энергии на перевозочную работу локомотивов методом расчленения / А. В. Толкачёв. – Текст : непосредственный // Труды ТашИИТ. – 1973. – №100. – С. 43–54.

3. Абляимов, О. С. Эффективность методов нормирования расхода энергии на тягу поездов / А. В. Толкачёв, О. С. Абляимов. – Текст : непосредственный // Труды ТашИИТ. – 1974. – №105. – С. 27–35.

4. Абляимов, О. С. Исследование возможностей снижения расхода топлива тепловозами на тягу поездов за счёт оптимальных режимов вождения поездов на САЗ ж.д. : научно - технический отчёт ТашИИТ № 79028894, инв. № Б836191 / А. В. Толкачёв, О. С. Абляимов / Ташкентский ин-т. инж. ж-д трансп. – Москва, 1979. – 67 с. – Текст : непосредственный.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Абляимов Олег Сергеевич

Ташкентский государственный
транспортный университет (ТГТУ).
ул. Элтузар, д. 25, г. Ташкент, 100167,
Республика Узбекистан.
Кандидат технических наук, старший
научный сотрудник, и.о. профессора
кафедры «Локомотивы и локомотивное
хозяйство» ТГТУ.
Тел. +998371-254-52-16.
E-mail: o.ablyalimov@gmail.com.

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Ablyalimov Oleg Sergeyevich

Tashkent state transport university (TSTU).
25, Eltuzar str., Tashkent, 100167,
the Republik of Uzbekistan.
Doctor of philosophy, chief scientific worker,
acting professor of the chair «Locomotives
and locomotive, economy» TSTU.
Phone: +998371-254-52-16.
E-mail: o.ablyalimov@gmail.com.

В. В. Буровцев, П. С. Жерनावков

Сибирский государственный университет путей сообщения, г. Новосибирск

ЦИФРОВАЯ ТРАНСФОРМАЦИЯ АЛГОРИТМА ПРОЦЕССА СЕРТИФИКАЦИИ НА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОМ ТРАНСПОРТЕ

Статья посвящена исследованию возможности преобразования алгоритма проведения процедуры сертификации на железнодорожном транспорте в рамках снижения уровня транзакционных издержек. Целью исследования является формирование эффективного алгоритма проведения процедуры сертификации на основе цифровых технологий. Применен институциональный анализ для исследования процедуры сертификации. Разработан новый алгоритм проведения процедуры сертификации на железнодорожном транспорте с учетом специфики деятельности предприятий железнодорожного транспорта.

Ключевые слова: алгоритмизация, сертификация, транзакционные издержки, государственное регулирование.

V.V. Burovtsev, P.S. Zhrenavkov

Siberian State Transport University, Novosibirsk

TRANSFORMATION OF THE ALGORITHM FOR THE CERTIFICATION PROCEDURE IN RAILWAY TRANSPORT AS A WAY TO REDUCE TRANSACTION COSTS

The article is devoted to the study of the possibility of transforming the algorithm for carrying out the certification procedure in railway transport within the framework of reducing the level of transaction costs. The aim of the study is to form an effective algorithm for the certification procedure based on digital technologies. Institutional analysis was applied to study the certification procedure. A new algorithm has been developed for carrying out the certification procedure on railway transport, taking into account the specifics of the activities of railway transport enterprises.

Keywords: algorithmicization, certification, transaction costs, government regulation.

Сертификация на железнодорожном составе представляет собой важный инструмент подтверждения соответствия объектов требованиям технических регламентов, положениям стандартов, в результате которого на рынок выходят

участники, которые могут предложить свои услуги с наибольшей степенью качества [1].

Объектом исследования по преобразованию алгоритма процедуры сертификации авторами была определена сертификация производств по ремонту подвижного состава железнодорожного транспорта.

Проблема данного вида сертификации заложена в устаревшей нормативной базе, регламентирующей порядок проведения процедуры сертификации. Документом под названием «Порядок сертификации производств по ремонту технических средств железнодорожного транспорта» П ССФЖТ 30-2003 предполагается предоставление услуги в стандартном виде с применением бумажных носителей [3], а также без использования систем электронного документооборота.

В типовом алгоритме проведения процедуры сертификации (Рисунок 1) предусмотрено рассмотрение органом сертификации заявки предприятия железнодорожного транспорта в течении 30 дней. При этом, исполнитель вправе продлить срок рассмотрения заявки в случае появления необходимости запроса дополнительной информации как у заказчика, так у иных ведомств и организаций с целью проверки достоверности предоставленных документов. Объектами проверки (Рисунок 1) являются деятельность организации по управлению качеством, представленная документированными процедурами по элементам системы качества (системы менеджмента качества) в соответствии с нормами П ССФЖТ 38 [4]., соответствие производства по ремонту требованиям отраслевых нормативов и правил, система послеремонтных испытаний [5].

Вследствие длительной процедуры как первичного рассмотрения заявки и доказательных документов, так и проведения последующего инспекционного контроля, предприятие-заказчик несет транзакционные издержки [6,7], заключающиеся в:

- Простое производства на момент проведения длительной процедуры сертификации;
- Ухудшении позиции предприятия на рынке услуг по ремонту подвижного состава железнодорожного транспорта;
- Росте рисков, возникающих вследствие параметров внутренней и внешней среды;
- Оплате услуг по обеспечению сохранности и обслуживания объектов производственного комплекса;
- Сокращении оборотных средств предприятия;

– Выплате заработной платы работникам предприятия на момент простоя производства [8,9].

Авторы предполагают, что внедрение цифровой платформы сертификации на железнодорожном транспорте позволит снизить уровень транзакционных издержек предприятий-заказчиков, а также сократит как общие сроки оказания услуги по сертификации, так и в части срока по каждому этапу оказания данной услуги (Рисунок – 2).

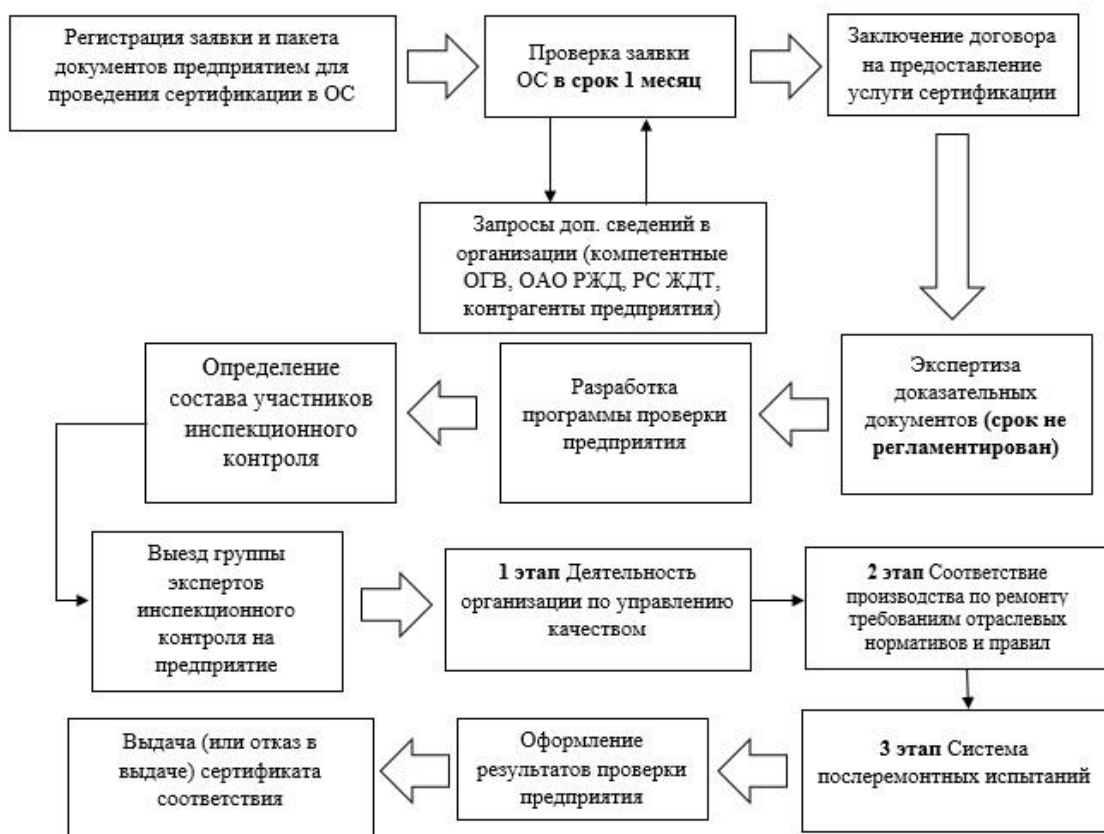


Рисунок 1 – Типовой алгоритм проведения процедуры сертификации на предприятии железнодорожного транспорта

Благодаря преобразованию алгоритма процедуры сертификации на предприятиях железнодорожного транспорта с применением цифровых технологий, в том числе, на основании технологий, примененных в рамках пилотного проекта «Цифровое депо» [2] предполагается получение, накопление и использование информационных потоков при рассмотрении заявки предприятия, экспертизы доказательных документов, а также сокращении времени запроса дополнительных сведений в иных организациях с применением электронного документооборота.

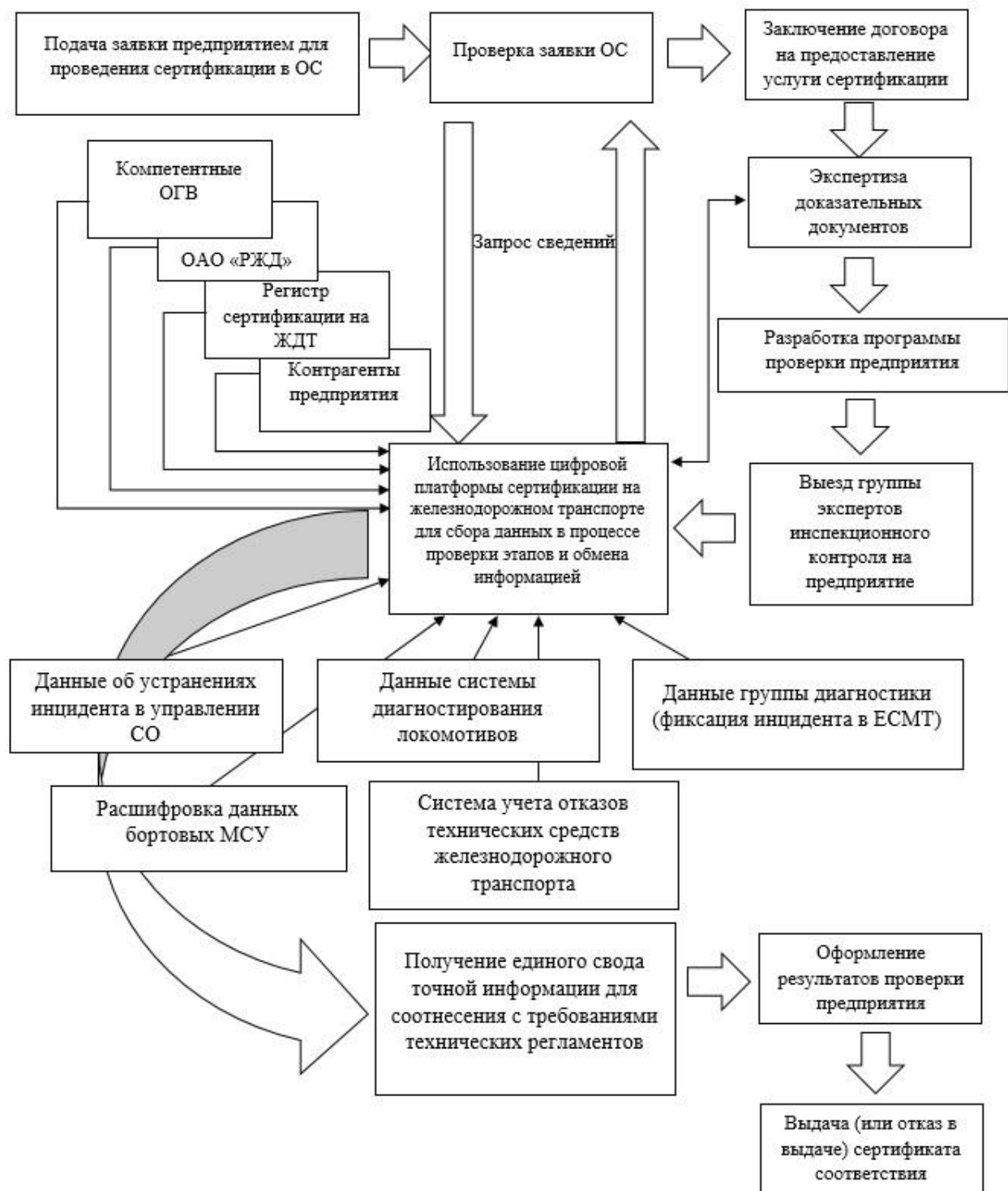


Рисунок 2 – Схема преобразованного алгоритма процедуры сертификации при применении цифровой платформы сертификации на железнодорожном транспорте в период проведения оценки деятельности ремонтного предприятия

Кроме того, благодаря апробированным в 2019 года цифровым технологиям тягового подвижного состава и инфраструктурного

железнодорожного комплекса (в части деповской инфраструктуры) возможно использование экспертами инспекционного контроля данных, накопленных элементами данной инновационной системы, в ходе проведения оценки деятельности организации по управлению качеством, соответствие производства по ремонту требованиям отраслевых нормативов и правил, а также системы послеремонтных испытаний.

В частности, предполагается применение:

- Данные об устранении инцидента в управлении СО (системе обнаружения)
- Расшифровка данных бортовых микропроцессорных устройств, с помощью которых фиксируется состояние узлов и агрегатов подвижного состава;
- Данные системы диагностирования локомотивов;
- Данные группы диагностики (фиксация инцидента в ЕСМТ – единой системе мониторинга технического состояния), на основе которых формируются данные о сбое в работе подвижного состава, что может быть адаптировано к оценке качества проведения работ по ремонту и проведению послеремонтных испытаний;
- Система учета отказов технических средств железнодорожного транспорта [10].

На основе единого свода точной информации формируется объективная оценка положения производства по ремонту подвижного состава. Благодаря автоматизированному комплексу оценки и аккумуляции информации исключается человеческий фактор – риск необъективной оценки того или иного объекта проверки инспекционного контроля [8].

В части сокращения временных затрат цифровая платформа сертификации на железнодорожном транспорте позволит оптимизировать временной промежуток, затрачиваемый на оценку как документального материала, так и непосредственного производственного комплекса предприятия.

С учетом внедрения цифровых технологий, алгоритм проведения процедуры сертификации даст положительных эффект:

- Сокращение затрат, связанных с простоем производства в период проведения инспекционного контроля, благодаря системе сбора и агрегации данных по всей производственной цепочке и их оперативного представления экспертам;

- Снижение затрат на деятельность организации по управлению качеством на предприятии, благодаря автоматизации части процессов;
- Снижение затрат, связанных с простоем локомотивов в депо на момент проведения оценки системы послеремонтных испытаний, благодаря системе фиксации дефектов узлов и сбора данных.

Список литературы

1. Федеральный закон «О техническом регулировании» № 184–ФЗ. – Текст : электронный // СПС КонсультантПлюс. – Режим доступа : локальный; по договору.
2. Паспорт национального проекта «Национальная программа «Цифровая экономика Российской Федерации» [утвержден президиумом Совета при Президенте РФ по стратегическому развитию и национальным проектам, протокол от 04.06.2019 № 7].
3. П ССФЖТ 30–2003 Порядок сертификации производств по ремонту технических средств железнодорожного транспорта : приняты и введены в действие Указанием МПС России от 10.03.2004 № К-48у // СПС КонсультантПлюс. – Режим доступа : локальный; по договору.
4. П ССФЖТ 38–2001 Система сертификации на федеральном железнодорожном транспорте. Порядок проведения сертификации систем качества и сертификации производств : приняты и введены в действие Указанием МПС России от 10.03.2004 N К-48у // СПС КонсультантПлюс. – Режим доступа : локальный; по договору.
5. П ССФЖТ 52–2003 Система сертификации на федеральном железнодорожном транспорте. Порядок сертификации систем менеджмента качества : приняты и введены в действие Указанием МПС России от 10.03.2004 N К-48у // СПС КонсультантПлюс. – Режим доступа : локальный; по договору.
6. Буровцев, В. В. Потенциал повышения экономической эффективности государственного сектора сферы услуг на транспорте / В. В. Буровцев // Вестник СамГУПС, 2015. – №1 (27). – С. 15–21.
7. Буровцев, В. В. Управление административным барьером в условиях трансформации экономической системы: монография / В. В. Буровцев // Сибирский государственный университет путей сообщения. – Новосибирск : СГУПС, 2011. – 159 с.
8. Буровцев, В. В. Экономическая оценка лицензионного барьера при формировании конкурентной среды на рынке грузовых железнодорожных перевозок: специальность 08.00.05 «Экономика и управление народным

хозяйством (транспорт)» : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата экономических наук / Буровцев Владимир Викторович ; Сибирский государственный университет путей сообщения. – Новосибирск., 2006. – 28 с. – Текст : непосредственный.

9. Молотков, Ю. И. Алгоритмизация, стандартизация и моделирование процесса сокращения транзакционных издержек региональных пользователей государственных услуг / Ю. И. Молотков, В. В. Буровцев // Региональная экономика: теория и практика. – 2017. – Т. 15, вып. 5. – С. 937–952.

10. «ЛокоТех» презентовал пилотный проект «Цифровое депо» // Цифровая экономика: сайт. – URL: <https://www.comnews.ru/digital-economy/content/203627/2019-12-18/2019-w51/lokotekh-prezentoval-pilotnyy-proekt-cifrovoye-depo> (дата обращения: 18.05.2020).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Буровцев Владимир Викторович

Сибирский государственный университет
путей сообщения (СГУПС).
ул. Дуси Ковальчук, д. 191, г. Новосибирск
630049, Российская Федерация.
Доктор экономических наук, доцент.
Тел.: +7 (983) 123-33-22.
E-mail: burovtsevvv@mail.ru.

Жернавков Павел Сергеевич

Сибирский государственный университет
путей сообщения (СГУПС).
ул. Дуси Ковальчук, д. 191, г. Новосибирск
630049, Российская Федерация.
Аспирант
Тел.: +7 (913) 902-43-22.
E-mail: pav.zhernavkvo@yandex.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Burovtsev Vladimir Viktorovich

Siberian State Transport University (SSUPS).
Dusi Kovalchuk st., 191, Novosibirsk 630049,
the Russian Federation.
Doctor of Economics, Associate Professor
Phone: +7 (983) 123-33-22.
E-mail: burovtsevvv@mail.ru.

Zhernavkov Pavel Sergeevich

Siberian State Transport University (SSUPS).
Dusi Kovalchuk st., 191, Novosibirsk 630049,
the Russian Federation.
Graduate student
Phone: +7 (913) 902-43-22.
E-mail: pav.zhernavkvo@yandex.ru.

Научное издание

ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЙ, КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА И
ДИАГНОСТИКИ В ПРОМЫШЛЕННОСТИ И НА ТРАНСПОРТЕ

Материалы четвертой всероссийской научно-технической
конференции с международным участием, посвящённой
75-летию победы в Великой Отечественной войне;
100-летию со дня рождения академика А. Д. Сахарова;
120-летию основания Омского государственного университета
путей сообщения
(октябрь 2020 г.)

Ответственный за выпуск А. А. Кузнецов

* * *

Печатается в авторской редакции

Подписано в печать 20.10.2020. Формат $60 \times 84 \frac{1}{16}$.
Плоская печать. Бумага офсетная. Усл. печ. л. 22,7. Уч.-изд. л. 16,9.
Тираж 300 экз. Заказ .

* *

Типография ОмГУПС

*

644046, г. Омск, пр. Маркса, 35