

*На правах рукописи*

*И. Лобанов*

**ЛОБАНОВ Иван Игоревич**

**ПОВЫШЕНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ  
ТЕПЛОВОЗНЫХ ДИЗЕЛЕЙ ПРИМЕНЕНИЕМ СРЕДСТВ  
ОПЕРАТИВНОЙ ДИАГНОСТИКИ**

05.22.07 — Подвижной состав железных дорог,  
тяга поездов и электрификация

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание учёной степени  
кандидата технических наук

Москва 2017

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Российский университет транспорта (МИИТ)» РУТ (МИИТ)

Научный руководитель: доктор технических наук, доцент  
**Балабин Валентин Николаевич**

Официальные оппоненты: **Коссов Евгений Евгеньевич**,  
доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник лаборатории «Системные вопросы организации ремонта» отделения «Тяговый подвижной состав» акционерного общества «Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта»

**Овчинников Вячеслав Михайлович**,  
кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Экология и энергоэффективность в техносфере» учреждения образования «Белорусский государственный университет транспорта»

Ведущая организация: Акционерное общество «Научно-исследовательский и конструкторско-технологический институт подвижного состава», г. Коломна

Защита диссертации состоится 21 декабря 2017 г. в 13 час 00 мин на заседании диссертационного совета Д 218.005.01 на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Российский университет транспорта (МИИТ)» по адресу: 127994, г. Москва, ул. Образцова, д. 9, стр. 9, ауд. 2505.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте РУТ (МИИТ) [www.miit.ru](http://www.miit.ru).

Автореферат разослан «\_\_» ноября 2017 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета



Воронин Николай Николаевич

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования.** В процессе эксплуатации подвижного состава узлы и агрегаты тепловозных дизелей подвергаются воздействию возрастающих нагрузок, обусловленных увеличением массы поездов, повышением скоростей движения и среднесуточных пробегов локомотива.

Анализ статистических данных показывает, что более 30 % отказов тепловозов приходится на неисправности дизелей. При этом отказы топливной аппаратуры и цилиндропоршневой группы составляют более 20 % от общего количества отказов дизелей в эксплуатации.

Выявление дефектов узлов дизелей возможно при производстве реостатных испытаний, т.е. на пунктах стационарной диагностики в депо, что является трудоемкой и затратной операцией. Более эффективное и менее затратное выявление неисправностей, возникающих в процессе эксплуатации, может быть достигнуто путем разработки системы средств оперативной диагностики технического состояния дизельных двигателей – системы мониторинга дизельных двигателей (СМДд).

Разработка и внедрение в производственный процесс эксплуатации тепловозов средств и методов оперативной диагностики (СМДд) для своевременного выявления отказов и предотказных состояний узлов дизелей, без постановки тепловозов на пункты стационарной диагностики, является **актуальной задачей**.

Особое значение достоверное диагностирование методами и средствами оперативной диагностики приобретает в условиях повсеместного перехода от планово-предупредительной системы технического обслуживания и ремонта тепловозов к системе обслуживания по техническому состоянию.

**Степень разработки темы.** Одним из основных направлений в обеспечении надежности транспортных дизелей является развитие методов и средств диагностирования, которому посвящены работы многих ученых, в частности: А.Э. Симсон, А.З. Хомич, Н.А. Фуфрянский, А.И. Володин, Д.Я. Носырев, Э.А. Пахомов, Ю.Е. Просви́ров, Э.Д. Тартаковский, В.А. Четвергов, В.С. Наговицын, Е.Е. Коссов, Р.К. Гизатуллин, Р.А. Варбанец, В.Г. Ивановский, В.А. Чечет, А.Ю. Коньков, С.А. Пальгов, А.С. Кулешов, А.А. Обозов, Е.А. Никитин, В.А. Рыжов, Э.А. Улановский, В.Д. Карминский, С.В. Камкин, В.А. Кручек и другие.

Разработка новых методов и средств контроля и диагностики технического состояния цилиндропоршневой группы, топливной аппаратуры и механизма газораспределения дизельных двигателей производится многими научно-исследовательскими организациями и ВУЗами (ВНИКТИ, ЦНИДИ, ПКБ ЦТ, ВНИИЖТ, НИИТКД, МИИТ, ПГУПС, ОмГУПС, СамГУПС, РГУПС, ДВГУПС, ОНМУ, РГАУ-МСХА), а также зарубежными фирмами, в частности:

«Malin Instruments Ltd.», «Lemag», «Autronica», «Icon Reserch Ltd.», «Imes GmbH», «Kyma a.s.», «Kistler Group», «Friedrich Leutert GmbH&Co», «MAN B&W», «Caterpillar-Zeppelin», «Cummins» и др.

Диссертационная работа выполнена в соответствии со стратегией научно-технического развития холдинга ОАО «РЖД» на период до 2020 г. и перспективу до 2025 г. («Белая книга»), и планом научно-технических работ Московского государственного университета путей сообщения (тема НИР № г.р. 1.017.09).

**Цель диссертационной работы** – повышение эксплуатационной надежности тепловозов путем совершенствования контроля технического состояния дизелей методами и средствами оперативной диагностики.

**Для достижения поставленной цели решены следующие задачи:**

1. Выполнен анализ существующих методов и средств контроля и диагностирования дизелей тепловозов, позволяющих оценивать их техническое состояние средствами стационарной диагностики.

2. Сформулированы принципы проведения оперативной диагностики параметров рабочего процесса, учитывающие специфику эксплуатации дизелей тепловозов.

3. Разработана методика проведения оперативного диагностического контроля технического состояния топливной аппаратуры, механизма газораспределения и цилиндропоршневой группы. Сконструирован переносной диагностический комплект, для тепловозных дизелей, позволяющий реализовать предложенную методику оперативного контроля.

4. Установлена взаимосвязь между диагностическими параметрами контроля рабочего процесса дизеля и параметрами надежности ресурса, экологическими и экономическими характеристиками работы дизеля, позволяющими определить его техническое состояние как в межремонтные периоды эксплуатации, так и при проведении плановых видов технического обслуживания и ремонта (ТО и ТР).

5. Проведена оценка эффективности предложенного метода оперативного диагностического контроля параметров рабочего процесса дизеля и надежности работы узлов топливной аппаратуры, механизма газораспределения и цилиндропоршневой группы.

**Научная новизна работы** заключается в следующем:

1. Разработана методика и обоснованы критерии оценки диагностических параметров оперативной диагностики рабочего процесса дизеля и технического состояния узлов топливной аппаратуры, механизма газораспределения и цилиндропоршневой группы тепловозных дизелей.

2. Создано техническое устройство диагностический комплект, включающий систему мониторинга дизельных двигателей СМДд, механотестер

топливной аппаратуры МТА-2 и анализатор герметичности цилиндров АГЦ-2, что позволяет реализовать методику оперативного контроля дизелей.

3. Определены режимы работы дизелей, на которых достигается наибольшая информативность получаемых диагностических параметров.

4. Разработан алгоритм оперативной диагностики технического состояния топливной аппаратуры, механизма газораспределения и цилиндропоршневой группы тепловозных дизелей по параметрам рабочего процесса дизеля, и метод экспресс-анализа состояния дизеля по косвенному критерию.

**Теоретическая и практическая значимость исследований** заключается в следующем:

1. Разработана комплексная система диагностики тепловозных дизелей средствами оперативного мониторинга, обоснованы рациональные области её применения.

2. Разработаны и апробированы алгоритмы системы оперативной диагностики, обеспечивающие получение заключения о техническом состоянии дизеля тепловоза без непосредственного внедрения в топливную систему высокого давления и механизм газораспределения для принятия решения по дальнейшей эксплуатации или ремонту.

3. Технология оперативной диагностики даёт возможность получить диагностическую информацию без вывода тепловоза из эксплуатации и уточнять объёмы предполагаемых видов ремонта.

4. Результаты исследования позволяют уменьшить воздействие выхлопных газов дизелей на экологические параметры окружающей среды.

5. Разработанный подход применения оперативной диагностики тепловозных дизелей позволит повысить надёжность работы тепловозов в эксплуатации.

**Объектами исследования** приняты параметры рабочего процесса дизеля тепловозов и надёжность работы узлов топливоподачи и газораспределения в эксплуатации

**Методология и методы исследований.** Применены методы математической статистики и теории вероятности, математического моделирования и планирования эксперимента и методы обработки данных с использованием положений нечеткой логики.

**Основные положения, выносимые на защиту:**

- комплексная система оперативного диагностирования тепловозного дизеля, использующая результаты индицирования параметров рабочего процесса в цилиндрах дизеля, и диагностики цилиндропоршневой группы, топливной аппаратуры и механизма газораспределения в условиях эксплуатации.

- метод оценки технического состояния цилиндропоршневой группы, топливной аппаратуры и механизма газораспределения, основанный на результатах измерения параметров рабочего процесса и относительного изменения температуры отработавших газов.

- методика проведения оперативного диагностического контроля технического состояния топливной аппаратуры, механизма газораспределения и цилиндропоршневой группы вне стационарных средств диагностики.

**Достоверность научных положений и результатов** диссертационной работы подтверждена путем сопоставления полученных экспериментальных и теоретических результатов. Погрешность, определенная сравнением результатов косвенного измерения с результатами непосредственного измерения температуры на выходе из цилиндров дизеля, не превышает 10-15 %. Расхождение диагнозов поставленных системой оперативной диагностики с техническим состоянием элементов и узлов тепловозного дизеля, выявленным при ремонте не превышало 5 % случаев.

Экспериментальная оценка эффективности применения разработанной системы оперативной диагностики технического состояния дизелей тепловозов проводилась в депо ТЧР-7 Санкт-Петербург-Сортировочный-Московский Октябрьской ж.д., депо ТЧР-21 Елец Юго-Восточной ж.д., депо ТЧ-2 Люблино Московской ж.д., депо ТЧР-35 Узловая Московской ж.д., Ногинском и Подольском ППЖТ.

**Личный вклад автора диссертационной работы.** Решена задача создания комплексной системы оперативной диагностики локомотивных ДГУ, разработаны методики и проведены расчетные и экспериментальные исследования, выполнен анализ и обобщение полученных результатов, созданы технические комплекты устройств и приспособлений для тепловозных дизелей.

**Апробация работы.** Основные материалы диссертации докладывались на:

- VII, X, XI, XII и XIII научно-практических конференциях «Наука транспорту» (г. Москва, МИИТ, 2006-2012 гг.);
- VII, IX, X, XI, XII, XIII и XIV научно-практических конференциях «Безопасность движения поездов» (г. Москва, МИИТ, 2006-2013 гг.);
- V международной научно-практической конференции «Trans-Mech-Art-Chem» (г. Москва, МИИТ, 2008 г.);
- III международной научно-технической конференции «Эффективность, надежность и безопасность энергетических установок (Энергоустановки – 2008)» (Украина, г. Севастополь-Батилиман, 2008 г.);
- Международной научно-практической конференции «Научные проблемы развития ремонта, технического обслуживания машин, восстановления и

упрочнения деталей» (г. Москва, ГОСНИТИ, 2009 г.);

- VI Международной научно-практической конференции «Проблемы безопасности на транспорте», посвященная 150-летию Белорусской железной дороги (Республика Беларусь, г. Гомель, БелГУТ, 2012 г.);

- Первой международной научно-практической конференции «Перспективы развития сервисного обслуживания локомотивов» (г. Москва, 2014 г.);

- Научно-практическом семинаре «Пути снижения затрат на эксплуатацию сельскохозяйственной, строительной, дорожной и другой техники на базе мобильных энергетических установок» (г. Москва, РГАУ-МСХА имени К. А. Тимирязева, 2016 г.)

### **Публикации**

Основные положения диссертационной работы и полученные результаты опубликованы в 17-и печатных работах, из них 5 в периодических изданиях, включенных в перечень ВАК РФ.

**Структура работы.** Работа состоит из введения, 7 разделов и заключения. Общий объем работы: 209 стр., 6 приложений, 46 рисунков, 22 таблицы. Библиографический список содержит 192 наименования.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертации.

**В первом разделе** проведен анализ материалов, посвященных проблеме повышения эффективности использования и совершенствования методов и средств диагностирования технического состояния тепловозных дизелей. Сформулирована цель и задачи исследования, определены научная новизна и практическая значимость работы.

Проведенный анализ теоретических основ, методик и технических средств диагностирования дизелей тепловозов показал, что оперативные методы и средства диагностирования на современном уровне развития техники пока не достаточно развиты.

На основании анализа материалов работ выявлено, что эффективность использования тепловозов можно повысить путем снижения затрат на поддержание и восстановление их технического состояния.

Наибольшее количество отказов основного оборудования тепловозов приходится на дизель, что составляет около 43 % от общего числа отказов. Кроме того, эксплуатация тепловозов с неудовлетворительным техническим состоянием силовой установки приводит к отказам в пути следования и, как следствие, к снижению эксплуатационной топливной экономичности.

Поэтому необходимо проведение научных исследований направленных на

разработку как новых методов и средств контроля и диагностирования тепловозов и их энергетических установок, так и на совершенствование уже существующих систем.

В настоящее время эксплуатируется большое количество разнообразных диагностических систем. Их разнообразие обусловлено стремлением в наибольшей степени удовлетворить запросы различных потребителей (эксплуатационные и ремонтные депо сети «РЖД», локомотиворемонтные заводы, предприятия промышленного транспорта, частные железнодорожные компании и перевозчики), а также необходимостью решать различные диагностические задачи (определение текущего технического состояния, в т.ч. энергоэффективности, определение объема ремонтных работ, прогнозирование сроков очередной диагностики или технического обслуживания, оценка качества выполненного ремонта, оценка эффективности модернизации или применения новых технических решений).

**Во втором разделе** выполнен обзор наиболее распространенных диагностических систем различных типов, назначения, структуры, выбраны классификационные критерии и проведена классификация, на основе которой определен типаж и сформулированы требования к системе оперативной диагностики.

Рассматривались следующие характеристики диагностических систем: тип системы; производитель; основные типы используемых датчиков; назначение системы (в т.ч. область применения).

Количество измеряемых параметров: механически (11), рабочего процесса (14), топливной аппаратуры (4), механизма газораспределения (2), цилиндропоршневой группы (3), турбокомпрессора (4), вспомогательного оборудования (11), нагрузки (5).

Функциональные возможности: устройство системы (4), выполняемые функции (7). Выделенные при классификации типы диагностических систем представлены на рисунке 1.

Проведено теоретическое обоснование принципов проведения оперативной диагностики технического состояния по параметрам рабочего процесса, учитывающее специфику эксплуатации дизелей тепловозов, и сформулированы технические требования к диагностическим средствам.

Исследованы резервы повышения топливной экономичности тепловозных дизелей применением средств оперативной диагностики. Проведена оценка возможности выполнения оперативной диагностики одновременно с выполнением регламентных работ по ТО и ТР, т.е. без вывода тепловоза из эксплуатации сверх времени отводимого на регламентные работы.

**В третьем разделе** проведена разработка комплексной системы контроля и диагностики тепловозных дизелей на основе средств оперативной диагностики.

Анализ основных параметров, а также данных эксплуатации современных



средств и систем диагностирования, позволяет сделать вывод, что по многим показателям наиболее доступным, удобным, надежным и простым средством мониторинга являются мобильные системы и системы разделенного мониторинга. Именно мобильные системы и системы разделенного мониторинга и последующей независимой обработки информации позволяют легко производить качественное техническое обслуживание дизеля и не допускать развитие дефектов, приводящих к повышенному расходу топлива, а также к авариям.

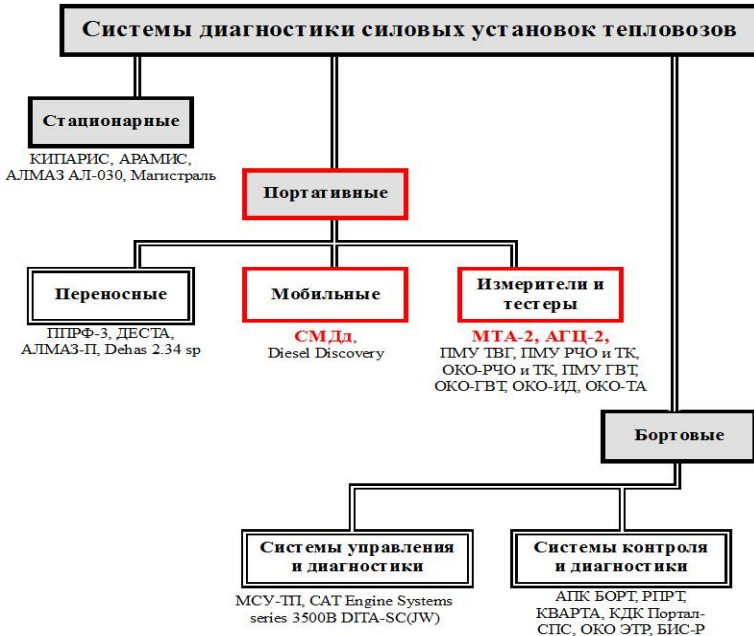


Рисунок 1- Место оперативной диагностики в классификации типов диагностических систем

На основе сформулированных в работе требований к системам оперативной диагностики разработана комплексная система мониторинга тепловозных дизелей. Система является совместной разработкой кафедры «Электропоезда и локомотивы» Российского университета транспорта (МИИТ), кафедры «Эксплуатация мото-тракторного парка» Института механики и энергетики им. В.П. Горячкина (ИМЭ им. Горячкина РГАУ-МСХА им. Тимирязева) и кафедры «Судовые энергетические установки и техническая эксплуатация» Одесского национального морского университета (ОНМУ). В состав предлагаемой комплексной системы диагностики дизелей входят следующие основные части (см. рисунок 2):

- система мониторинга дизельных двигателей (СМДд) - может быть использована на любых дизельных энергетических установках, в том числе на локомотивах, самоходном подвижном составе и стационарных установках. Система мониторинга позволяет определить параметры индикаторной диаграммы рабочего процесса, параметры топливоподачи и параметры фаз газораспределения;

- анализатор герметичности цилиндров (АГЦ-2) - предназначен для обслуживания двигателей внутреннего сгорания). Анализатор позволяет определять техническое состояние отдельных цилиндров ДВС, компрессионных и маслосъемных колец, зеркала цилиндра, впускных и выпускных клапанов;

- механотестер топливной аппаратуры (МТА-2) - предназначен для оценки технического состояния форсунок, нагнетательных клапанов и плунжерных пар топливного насоса высокого давления тепловозов, тракторов, автомобилей и другой самоходной техники, оснащенных дизельными двигателями.

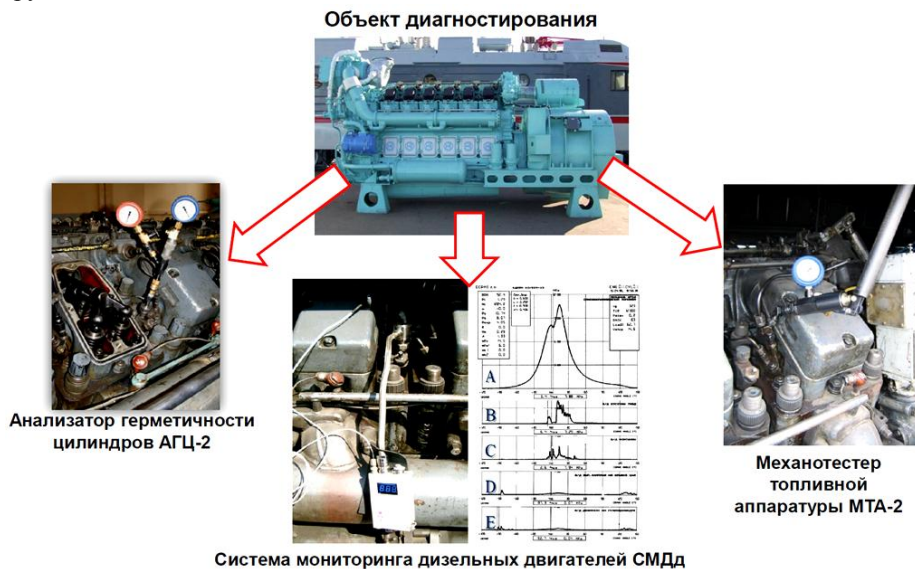


Рисунок 2 - Комплексная система оперативной диагностики тепловозных дизелей

Главной задачей, решаемой с помощью предлагаемой комплексной системы диагностики дизелей, является определение основных параметров рабочего процесса транспортного двигателя внутреннего сгорания непосредственно в эксплуатации, вне стационарных диагностических устройств, выявление неисправностей деталей цилиндропоршневой группы (ЦПГ), топливной аппаратуры высокого давления (ТА) и механизма газораспределения (МГР), а также их настройка и регулировка.

**В четвертом разделе** представлена методика проведения оперативного контроля и диагностики технического состояния топливной аппаратуры, механизма газораспределения и цилиндропоршневой группы по параметрам рабочего процесса с использованием статистических методов обработки данных.

Рассмотрены вопросы использования параметров оперативной диагностики для определения технического состояния дизеля, в частности, определения информативности параметров работы дизеля. Основное внимание уделено определению средней температуры выхлопных газов в цилиндре двигателя, являющейся важным диагностическим параметром, но не поддающейся прямому измерению, поскольку при оперативной диагностике выбор типа и количества устанавливаемых датчиков ограничен условием минимизации затрат времени.

Исходный массив параметров работы формировался на основе анализа теории рабочего процесса и параметров, контролируемых современными диагностическими системами. Отбирались наиболее часто встречающиеся параметры по итогам оценки структуры и функциональных возможностей современных диагностических систем. При изменении технического состояния диагностируемого объекта, как правило, диагностируемые параметры отклоняются от своих нормальных значений, и в зависимости от степени износа контактирующих деталей.

На основе анализа теории рабочего процесса ДВС с применением метода малых отклонений установлено, что температура выхлопных газов связана с рядом параметров рабочего процесса:

$$\delta T_{\Gamma} = \bar{T}_{\text{и}} \delta T_{\text{кц}} - k_{\Gamma} \delta \alpha - k_{\Gamma} \delta \varphi_{\text{а}} - k_{\Gamma} \bar{\eta}_{\text{иИ}} \delta \eta_{\text{иИ}}, \quad (1)$$

где  $\delta T_{\Gamma}$  – относительное отклонение температуры отработавших газов;

$\bar{T}_{\text{и}}$  – исходный температурный перепад в воздушном и газовыпускном трубопроводах;

$\delta T_{\text{кц}}$  – относительное отклонение температуры воздуха перед цилиндрами;

$k_{\Gamma}$  – коэффициент влияния средневесовой температуры газа;

$\delta \alpha$  – относительное отклонение коэффициента избытка воздуха;

$\delta \varphi_{\text{а}}$  – относительное отклонение коэффициента продувки;

$\delta \eta_{\text{иИ}}$  – относительное отклонение индикаторного к.п.д.;

$\bar{\eta}_{\text{иИ}}$  – исходный относительный индикаторный к.п.д.

Если исключить параметры, контролируемые системой СМДд, останется ряд неучтенных параметров, т.е. диагностическая информация, собираемая системой СМДд, не является полной. Для получения более полной диагностической информации следует учитывать температуру выхлопных газов.

Для определения температуры выхлопных газов разработана методика косвенного измерения по средней температуре газов в цилиндре двигателя.

Из нескольких сильнокоррелированных параметров удерживался параметр наиболее удобных для измерения, а остальные не учитывались как недостаточно информативные.

В качестве примера представлены результаты вычисления корреляции для ранее выбранных параметров рабочего процесса (ППП):  $n$  – частота вращения коленчатого вала дизеля;  $P_z$  – максимальное давление сгорания в цилиндре;  $P_c$  – максимальное давление сжатия;  $P_{exp}$  – давление на линии расширения;  $f_{inj}$  – продолжительность подачи топлива;  $P_i$  – индикаторная мощность, развиваемая в цилиндре дизеля;  $MIP$  – среднее индикаторное давление;  $P_c'$  – давление начала сгорания топлива;  $ZLP$  – степень рассогласования основной и термокомпенсирующей емкости датчика давления в момент измерения.

**Оценка коэффициента корреляции.** Коэффициент корреляции ( $r$ )

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n ((x_i - \bar{x}) \cdot (y_i - \bar{y}))}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \cdot \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}}, \quad (2)$$

где  $\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$ ,  $\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i$  – среднеарифметические значения полученных выборок (массивов данных)  $x$  и  $y$ .

Величина  $x_i$  принимает значения ранее выбранных ППП,  $y_i$  принимает значения параметра проверяемого на значимость (в данном случае  $ZLP$ ).

Расчетные значения первичных функциональных параметров  $\bar{x}$ ,  $\bar{y}$  и  $r = f(ZLP)$  приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Значения коэффициентов корреляции

ZLP=	f(n)	f(P <sub>z</sub> )	f(P <sub>c</sub> )	f(P <sub>exp</sub> )	f(f <sub>inj</sub> )	f(P <sub>c</sub> )'	f(MIP)	f(P <sub>i</sub> )
$\bar{x}$	733,3176	73,206	53,806	39,329	22,5382	52,435	10,137	95,118
$\bar{y}$	1,0835	1,0835	1,0835	1,0835	1,0835	1,0835	1,0835	1,0835
$r = f(ZLP)$	0,9850	0,9274	0,8538	0,9395	0,9719	0,8706	0,9647	0,9449

В ходе анализа установлено что, необходимым диагностическим параметром является температура выхлопных газов, но её затруднительно измерить непосредственно или заменить другими измеряемыми параметрами. В связи с этим возникла задача косвенного измерения этой температуры по возможности с использованием имеющихся или легко добавляемых и не затрудняющих процесс оперативной диагностики датчиков.

Подходящим датчиком температуры оказалось устройство температурной компенсации датчика давления, сигнал ( $ZLP$ ) которого является программно доступным, но ранее не использовался в качестве диагностической информации.

Исследована корреляция сигнала устройства температурной компенсации

с температурой выхлопных газов. Установлено, что для получения функциональной связи необходим учет влияния ряда других параметров рабочего процесса в виде полинома.

С учетом того, что исследуемые зависимости имеют нелинейный характер, а отклонения от функциональной связи помимо случайных составляющих имеют составляющую, вызванную режимами работы дизеля, полином записывается в виде:

$$X = T_{\text{термопары}} - (a_0 + a_1 \cdot \text{ZLP} + a_2 \cdot \text{ZLP}^2), \quad (3)$$

где  $a_0 - a_2$  – коэффициенты полинома;

$$a_0 = f(n_{\text{д}}, N_i, P_Z, P_C, P_{\text{EXP}}, \alpha_{\text{INJ}}, f_{\text{INJ}})$$

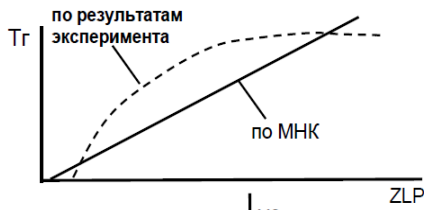
$$a_1 = f(n_{\text{д}}, N_i, P_Z, P_C, P_{\text{EXP}}, \alpha_{\text{INJ}}, f_{\text{INJ}})$$

$$a_2 = f(n_{\text{д}}, N_i, P_Z, P_C, P_{\text{EXP}}, \alpha_{\text{INJ}}, f_{\text{INJ}})$$

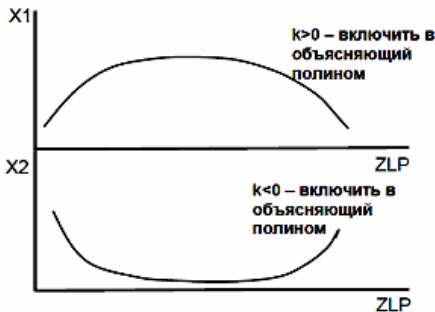
$$a_0 = k_0 + k_1 \cdot n_{\text{д}} + k_2 \cdot N_i + k_3 \cdot P_Z + k_4 P_C \dots$$

В данное уравнение входят наиболее значимые коэффициенты из множественной регрессии. Характер влияния объясняющих переменных на анализируемый параметр может быть различным, возможные варианты которых показаны на рисунке 3.

а)



б)



в)



а –  $T_g = f(\text{ZLP})$ ; б –  $X_1, X_2 = f(\text{ZLP})$ ; в –  $X_3, X_4 = f(\text{ZLP})$

Рисунок 3 - Влияние объясняющих переменных на анализируемый параметр

Анализ данного рисунка показал что, даже некоторые значимые параметры следует отбрасывать, если их влияние носит немонотонный характер.

Для сравнения и выбора полиномов принят максимальный диапазон значений величины  $ZLP=0,8\div 1,3$ , достигнутых в ходе экспериментальных исследований.

По результатам анализа экспериментальных данных для дизелей типа 2А-5Д49 тепловозов ТЭП70 была получена зависимость вида:

$$Et = -151,001 + 268,6 \cdot ZLP - 103,378 \cdot ZLP^2, \quad (4)$$

где  $Et$  - термо-э.д.с. фиктивной термопары.

Приведенной зависимостью устанавливается связь средних температур цикла и выпускных газов.

В процессе исследования объясняющего полинома было установлено что, в диапазоне нагрузок дизеля с 2 по 10 позицию контроллера машиниста (ПКМ) полином является взаимно однозначным и обладает хорошей повторяемостью (разброс не более 10-15 % по опыту диагностики 15 тепловозов), на 1ПКМ имеется большой разброс данных, а выше 10ПКМ возникает помимо разброса данных неоднозначность полинома связывающего температуру фиктивной термопары  $Ktz$ , полученной по сигналу  $ZLP$  датчика компенсации с температурой реальной термопары (рисунок 4), затрудняющая получение диагностической информации.

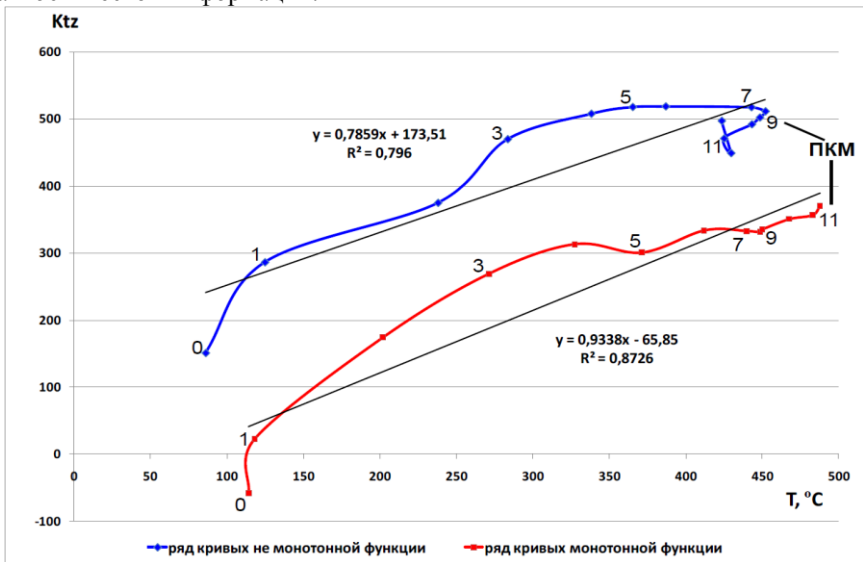


Рисунок 4 - Графики функции  $Ktz=f(T_{ц})$  для монотонных и немонотонных кривых

При сравнении диагностических данных, полученных на тепловозах типа ТЭП70, с результатами математического моделирования рабочего процесса на тех же режимах, сделан вывод о влиянии турбокомпрессора на параметры работы дизеля на режимах выше 10ПКМ.

В качестве источника эталонных диагностических данных использованная математическая модель рабочего процесса дизеля «Дизель-РК». Использовались паспортные характеристики диагностируемого дизеля типа 16ЧН26/26 (2А-5Д49). Принятие решения о выдаче рекомендаций по имеющимся значениям диагностических параметров может производиться в соответствии с алгоритмом рисунка 5. В качестве одного из возможных способов принятия решения при диагностировании дизелей разработанной комплексной системой использовалась экспертная система Мамдани-Заде на основе теории нечеткой логики, как позволяющая решить поставленную задачу адаптированную для диагностики тепловозного дизеля.

**В пятом разделе** разработана методика оперативного диагностического контроля технического состояния тепловозных дизелей.

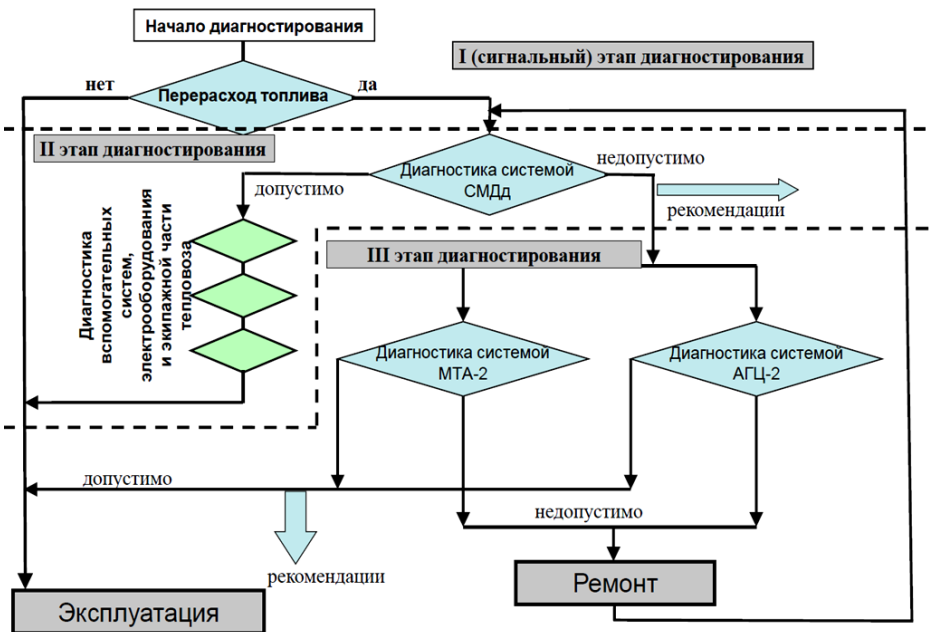


Рисунок 5 - Схема алгоритма оперативного диагностирования ДГУ тепловозов

Исходными данными для начала диагностирования являются данные о расходе топлива тепловозом, регистрируемые бортовыми системами контроля и диагностики (АПК БОРТ, РПРТ, МСУ-Т и др.). Также исходными данными

могут являться записи в бортовом журнале локомотива формы ТУ-152, послеремонтные обкаточные и сдаточные реостатные испытания тепловоза.

**I этап (сигнальный)** – анализ допустимых значений основных контролируемых параметров. Последующее поэтапное диагностирование производится при выходе величин контролируемых параметров за допускаемые пределы.

**II этап** – диагностирование технического состояния дизеля по параметрам рабочего процесса системой СМДд.

Необходимо отметить, что на расход топлива силовой установкой оказывают влияние такие факторы как:

- техническое состояние узлов и агрегатов вспомогательных систем тепловозных дизелей;
- качество настройки системы автоматического регулирования (САР) температуры теплоносителей;
- условия эксплуатации и режимы ведения поезда.

Таким образом, кроме диагностирования дизеля по параметрам рабочего процесса на первом этапе производится также:

- техническое состояние узлов и агрегатов вспомогательных систем ЛЭУ, качество настройки САР температуры теплоносителей;
- анализ условий эксплуатации и режимов ведения поездов.

**III этап** – диагностирование технического состояния топливной аппаратуры высокого давления и цилиндропоршневой группы системами МТА-2 и АГЦ-2.

**В шестом разделе** представлены результаты испытаний комплексной системы оперативной диагностики тепловозных дизелей.

В процессе испытаний была проведена оценка технического состояния основных узлов и элементов ЦПГ, ТА и МГР тепловозных дизелей с помощью системы СМДд в депо Люблино, Лихоборы, Узловая (тепловозы ЧМЭЗ, 2М62У, дизель-поезда Д1); Санкт-Петербург-Сортировочный-Московский (тепловозы ЧМЭЗ, ТЭМ7, М62); Елец (тепловозы ТЭП70, 2ТЭ116, ЧМЭЗ, ТЭМ2М); Ногинское ППЖТ, Подольское ППЖТ (Тепловозы ТГМ6, ТГМ4).

При проведения испытаний разработанной системы в депо ТЧР-21 Елец были продиагностированы и настроены дизели тепловозов ТЭП70-0508, ТЭП70-0282, ТЭП70-0400, ТЭП70БС-043, ТЭП70БС-090, 2ТЭ116-0918Б, ТЭП70-0427 и др.

Для примера на рисунке 6 показаны данные диагностики дизеля тепловоза ЧМЭЗТ-6461 до и после регулировки.

Разработана экспертная система для контроля технического состояния дизелей по параметрам рабочего процесса для проведения сервисного обслуживания. В основу данной экспертной системы заложен математический аппарат нечеткой логики и используются данные, полученные с помощью средств оперативной диагностики.



Для идентификации неисправностей были выбраны основные параметры и определены допустимые интервалы допусков для этих параметров. В таблице 2 показаны экспериментально определенные диапазоны допустимых значений основных параметров для дизелей типа 2А-5Д49 тепловозов ТЭП70.

а)

б)

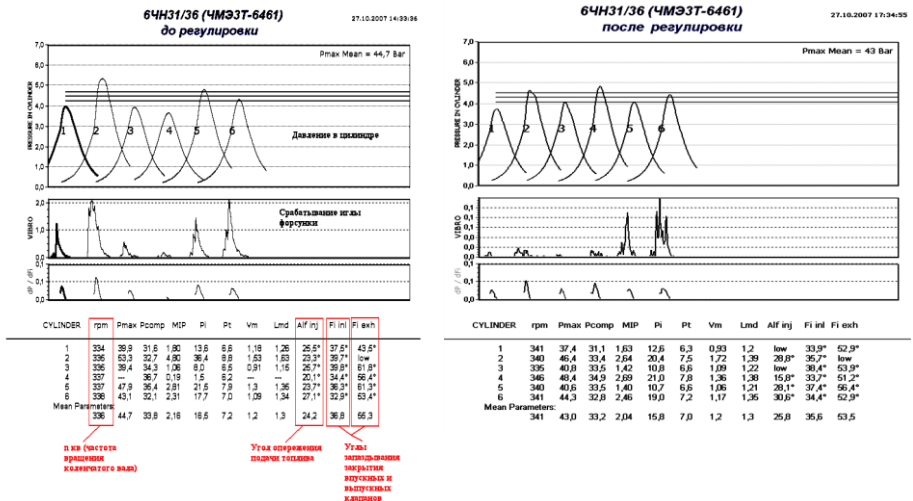


Рисунок 6 - Результаты диагностики дизеля тепловоза ЧМЭЗТ-6461 до регулировки – (а) и после регулировки – (б)

По основным устройствам, входящим в комплексную систему диагностики получены данные по трудоемкости проведения диагностических операций, например для системы СМДд данные представлены в таблице 3.

### Особенности эксплуатации механотестера МТА-2

По результатам эксплуатационных испытаний механотестера МТА-2 получены данные о технологичности оперативной диагностики топливной аппаратуры.

Время диагностирования одной форсунки составило 5-8 мин., включая установку МТА-2 на форсунку, снятие показаний и демонтаж прибора. Время снятия трубок высокого давления с одного ряда (8 цилиндров) дизеля типа 16ЧН26/26 составляет примерно 20-25 мин. Время диагностирования форсунок механотестером МТА-2 одного ряда дизеля типа 16ЧН26/26 составляет примерно 30-40 мин.

На основе анализа полученных данных предложены варианты проведения диагностирования форсунок дизелей типа 16ЧН26/26:

1-диагностирование каждой форсунки, включая полный объем операций

по демонтажу и обратной установке трубки высокого давления;

2-предварительный демонтаж трубок высокого давления с каждого цилиндра и последующее диагностирование форсунок.

Таблица 2 – Экспериментальные значения диагностических параметров по диапазонам при номинальном режиме работы дизеля (15ПКМ)

Наименование параметра	Обозначение	Значение параметров		
		низкое	нормальное	высокое
Частота вращения коленчатого вала, об/мин	n	745,0 – 983,0	983,0 – 993,0	993,0 – 1050,0
Максимальное давление сгорания в цилиндре, кгс/см <sup>2</sup>	P <sub>Z</sub>	77,9 - 114,0	114,0 – 125,0	125,0 – 135,0
Давление на линии расширения при угле 36° за ВМТ, кгс/см <sup>2</sup>	P <sub>EXP</sub>	64 - 76,1	76,1 - 79,4	79,4 - 82,1
Действительный угол впрыскивания топлива, °ПКВ	φ <sub>inj</sub>	14,0 - 28,86	28,86 - 35,0	35,0 - 44,5
Максимальное давление сжатия в цилиндре, кгс/см <sup>2</sup>	P <sub>C</sub>	52,9 - 88,5	88,5 - 105,1	88,5 - 105,1
Действительный угол опережения подачи топлива, °ПКВ	α	1,33 - 9,5	9,5 - 13,5	13,5 - 18,5
Цилиндровая индикаторная мощность, кВт	N <sub>i</sub>	188,89 - 221,5	221,5 - 243,1	243,1 - 284,5
Температурный коэф. датчика давления PS16 системы СМДд	ZLP	1,01 - 1,053	1,053 - 1,19	1,19 - 1,32

Для повышения уровня технологичности диагностирования разработаны меры по модернизации механотестера с применением кронштейна крепления, гибким рукавом высокого давления и быстроразъемных соединений, что позволит сократить время проведения диагностики топливной аппаратуры.

**В седьмом разделе** проведена оценка ожидаемого экономического эффекта от внедрения комплексной системы диагностики на основе средств оперативной диагностики, который составит 578400 руб. в год на 1 тепловоз типа 2ТЭ116. Чистый дисконтированный доход за расчетный срок службы

оборудования (10 лет) составит 2504231 руб. Срок окупаемости дополнительных затрат составит 1,16 года.

Показано, что оперативная диагностика позволяет получить существенную экономию в сочетании с диагностикой стационарными средствами, но не может полностью заменить последнюю.

Таблица 3 –Хронометраж операций применения системы СМДд

Параметры	Тип дизеля			
	5Д49 (16ЧН26/26)	2Д49 (12ЧН26/26)	6Д49 (8ЧН26/26)	К6S310DR (6ЧН31/36)
Получение данных				
Подготовка места установки датчиков	0,5-1 мин	0,5-1 мин	0,5-1 мин	0,5-1 мин
Установка датчиков	0,5 мин	0,5 мин	0,5 мин	1 мин
Демонтаж датчиков	0,5 мин	0,5 мин	0,5-1 мин	0,5-1 мин
Снятие данных	0,5 мин	0,5 мин	0,5 мин	0,5-1 мин
Анализ полученных данных				
Передача данных в расчетный блок	1 мин	1 мин	1 мин	1 мин
Обработка и анализ полученных данных	1-3 мин	1-3 мин	1-3 мин	1-3 мин
Время на проведения диагностирования всего дизеля	64-104 мин	48-78 мин	32-52 мин	24-48 мин

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных теоретических и экспериментальных исследований получены новые научно обоснованные технические и технологические решения, направленные на совершенствование технологии диагностирования дизелей тепловозов. Применение разработанной методики диагностирования, а также устройств, реализующих указанную методику, позволит повысить эксплуатационную эффективность тепловозных дизелей.

Основные научные и практические результаты диссертационной работы состоят в следующем:

1. Разработана комплексная система оперативной диагностики тепловозного дизеля, использующая результаты индицирования параметров рабочего процесса в цилиндре дизеля, измерения и диагностики цилиндропоршневой группы, топливной аппаратуры и механизма газораспределения в условиях эксплуатации и соответствующие технические устройства.

2. Сформулированы принципы проведения оперативной диагностики

параметров рабочего процесса, учитывающих специфику эксплуатации дизелей тепловозов.

3. Разработана методика проведения оперативного диагностического контроля технического состояния топливной аппаратуры, механизма газораспределения и цилиндропоршневой группы. Создан переносной диагностический комплекс, применительно для тепловозных дизелей, позволяющий реализовать предложенную методику оперативного контроля.

4. Установлена взаимосвязь между диагностическими параметрами контроля рабочего процесса дизеля и параметрами надежности ресурса, экологическими и экономическими характеристиками работы дизеля, позволяющими определить его техническое состояние как в межремонтные периоды эксплуатации, так и при проведении плановых видов технического обслуживания и ремонта (ТО и ТР).

5. Проведена оценка эффективности предложенного метода оперативного диагностического контроля параметров рабочего процесса дизеля и надежности работы узлов топливной аппаратуры, механизма газораспределения и цилиндропоршневой группы.

6. Представленные в работе результаты практического использования комплексной системы оперативной диагностики тепловозных дизелей могут быть рекомендованы для сервисных локомотивных депо, как важная составная часть единой системы мониторинга технического состояния локомотивов, позволяющая получать оперативно, по сравнению со стационарными системами диагностики, уточнённые диагностические параметры.

7. Перспективами дальнейшей разработки темы работы являются уточнение полученной экспериментальной зависимости в виде объясняющего полинома, связанное с влиянием работы турбокомпрессора на режимах работы дизеля выше 10 ПКМ, а также совершенствование составляющих комплексной системы оперативной диагностики тепловозных дизелей с целью повышения эффективности её использования в единой системе мониторинга технического состояния локомотивов.

### **Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах**

#### **Публикации в печатных изданиях, рекомендованных ВАК РФ**

1. Балабин, В.Н. Новая система мониторинга транспортных двигателей внутреннего сгорания [Текст] / В.Н. Балабин, В.З. Какоткин, И.И. Лобанов // Транспорт РФ. - 2009. - №9. - С. 56-59.
2. Балабин, В.Н. Комплексная система мониторинга дизельных двигателей [Текст] / В.Н. Балабин, В.З. Какоткин, И.И. Лобанов // Железнодорожный транспорт. - 2011. - №12. - С. 50-51.
3. Балабин, В.Н. Экспресс-диагностика тепловозных дизелей [Текст] / В.Н.

Балабин, В.З. Какоткин, И.И. Лобанов // Мир транспорта. - 2012. - №3. - С. 38-43.

4. Балабин, В.Н. Результаты применения комплексной системы контроля и диагностики локомотивных дизелей [Текст] / В.Н. Балабин, В.З. Какоткин, И.И. Лобанов // Современные наукоемкие технологии.- М.: Издательский дом Академия естествознания, 2014. - №9. - С. 11-16.

5. Балабин, В.Н. Комплексная система контроля и диагностики тепловозных дизелей [Текст] / В.Н. Балабин, В.З. Какоткин, И.И. Лобанов, В.А. Чечет // Тяжелое машиностроение.- 2014. - №7. - С. 34-39.

### **Публикации в прочих изданиях**

1. Заикин, А.Н. Совершенствование системы технологической диагностики тепловозных дизелей [Текст] / А.Н. Заикин, И.И. Лобанов, В.Н. Балабин // Труды VII научно-практической конференции «Наука транспорту», апрель 2006 г.- М.: МИИТ, 2006. -С. V-18.

2. Лобанов, И.И. Экспресс-диагностика тепловозных дизелей [Текст] / И.И. Лобанов, В.Н. Балабин, В.З. Какоткин // Труды V международной научно-практической конференции «Trans-Mech-Art-Chem», май 2008 г. - М.:МИИТ, 2008. -С. 146.

3. Лобанов, И.И. Комплексная система диагностики тепловозных дизелей [Текст] / И.И. Лобанов // Труды X научно-практической конференции «Наука МИИТа - транспорту», апрель 2009 г.- М.: МИИТ, 2009. -С. I-38.

4. Балабин, В.Н. Повышение эксплуатационной эффективности транспортных ДВС путём применения современных систем оперативного мониторинга [Текст] / В.Н. Балабин, В.З. Какоткин, И.И. Лобанов, В.А. Чечет // Труды X научно-практической конференции «Безопасность движения поездов», октябрь 2009 г.- М.: МИИТ, 2009. -С. V-8.

5. Балабин, В.Н. Повышение надёжности и снижение прогрессирующих энергетических и экологических издержек транспортных ДВС путём применения современных систем оперативного контроля и диагностики [Текст] / В.Н. Балабин, В.З. Какоткин, И.И. Лобанов, В.А. Чечет // Труды XI научно-практической конференции «Безопасность движения поездов», октябрь 2010 г.- М.: МИИТ, 2010. - С. V-4.

6. Лобанов, И.И. Анализ эффективности применения системы СМДд для мониторинга технического состояния дизелей тепловозов [Текст] / И.И. Лобанов // Труды XI научно-практической конференции «Наука МИИТа - транспорту», апрель 2010 г.- М.: МИИТ, 2010. -С. I-31.

7. Лобанов, И.И. Оперативная диагностика как резерв повышения надёжности тепловозных дизелей [Текст] / И.И. Лобанов // Труды XII научно-практической конференции «Безопасность движения поездов», октябрь 2011 г.- М.: МИИТ, 2011. - С. V-19.

8. Балабин, В.Н. Комплексная система управления техническим

состоянием транспортного, машиностроительного и энергетического оборудования [Текст] / В.Н. Балабин, В.З. Какоткин, И.И. Лобанов // Труды XII научно-практической конференции «Безопасность движения поездов», октябрь 2011 г.- М.: МИИТ, 2011. - С. V-5.

9. Лобанов, И.И. Применение средств оперативной диагностики в системе технического обслуживания и ремонта тепловозов [Текст] / И.И. Лобанов // Труды XIII научно-практической конференции «Наука МИИТа - транспорту», апрель 2012 г.- М.: МИИТ, 2012. -С. III-50.

10. Лобанов, И.И. Особенности диагностирования дизелей типа ЧН26/26 системами СМДд и МТА-2 [Текст] / И.И. Лобанов // Труды XIII научно-практической конференции «Наука МИИТа - транспорту», апрель 2012 г.- М.: МИИТ, 2012. -С. III-51.

11. Балабин, В.Н. Системы оперативной диагностики дизелей типа ЧН26/26 [Текст] / В.Н. Балабин, В.З. Какоткин, И.И. Лобанов // Повышение эффективности использования и совершенствование системы технического обслуживания и ремонта локомотивов: Межвуз. темат. сб. науч. тр. / Омский гос. ун-т путей сообщения. Омск, 2014. - С. 31-35.

12. Балабин, В.Н. Применение системы СМДд для проведения оперативного диагностирования силовых установок тепловозов ТЭП70 в депо ТЧР-21 Елец [Текст] / В.Н. Балабин, В.З. Какоткин, И.И. Лобанов // Перспективы развития сервисного обслуживания локомотивов: материалы первой международной научно-практической конференции. - М.: ООО «ТМХ-Сервис», 2014 г. - С.70-72.

ЛОБАНОВ ИВАН ИГОРЕВИЧ

ПОВЫШЕНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ  
ТЕПЛОВОЗНЫХ ДИЗЕЛЕЙ ПРИМЕНЕНИЕМ СРЕДСТВ  
ОПЕРАТИВНОЙ ДИАГНОСТИКИ

05.22.07 — Подвижной состав железных дорог,  
тяга поездов и электрификация

А в т о р е ф е р а т  
диссертации на соискание учёной степени  
кандидата технических наук

---

Подписано в печать \_\_\_\_\_ 2017 г.  
Тираж 80 экз. Заказ № \_\_\_\_\_

Усл. - печ. л. – 1,5  
Формат 60x84 1/16

---

УПЦГИ РУТ (МИИТ), 127994, г. Москва, ул. Образцова, дом 9, стр. 9