

На правах рукописи



Струнгарь Святослав Алексеевич

**РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ СТАБИЛИЗАЦИИ ЦИЛИНДРОВЫХ
МОЩНОСТЕЙ ДИЗЕЛЯ НА РЕЖИМЕ ХОЛОСТОГО ХОДА ПРИ
ЭЛЕКТРОННОЙ СИСТЕМЕ УПРАВЛЕНИЯ ПОДАЧЕЙ ТОПЛИВА**

05.22.07 – Подвижной состав железных дорог, тяга поездов
и электрификация

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2021

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

Научный руководитель: доктор технических наук, доцент
Балабин Валентин Николаевич

Официальные оппоненты: Грачёв Владимир Васильевич,
доктор технических наук, доцент,
федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
образования «Петербургский государственный
университет путей сообщения Императора
Александра I», кафедра «Локомотивы и
локомотивное хозяйство», доцент;

Редин Андрей Логинович,
кандидат технических наук,
акционерное общество «Научно-
исследовательский и конструкторско-
технологический институт подвижного
состава», заведующий отделом силовых
установок.

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
образования «Самарский государственный
университет путей сообщения».

Защита состоится «30» сентября 2021 г., в 13:00 часов на заседании диссертационного совета Д 218.005.01 на базе федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Российский университет транспорта») по адресу: 127994, ГСП-4, г. Москва, ул. Образцова, д. 9, стр. 9, ауд. 2505.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте РУТ (МИИТ), www.miiit.ru.

Автореферат разослан « ___ » _____ 2021 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

- Воронин Николай Николаевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Железнодорожный транспорт России обеспечивает более 40 % грузооборота и свыше 30 % пассажирооборота транспортной системы, что обуславливает его важную роль в транспортной системе страны и требует существенных энергозатрат. В структуре энергозатрат для выполнения перевозочной работы на транспорте ежегодно расходы на топливо составляют порядка 120 млрд. руб., что определяет актуальность разработки и внедрения энергосберегающих технологий и технических средств.

Установка на дизели локомотивов ТЭМ18ДМ эксплуатируемого парка ОАО «РЖД» электронной системы управления подачей топлива (ЭСУВТ.01) обеспечивает снижение годового расхода топлива в эксплуатации до 12 % в сравнении с тепловозами в штатной комплектации. При этом достигается экономия годовых эксплуатационных расходов на топливно-энергетические ресурсы в размере до 182,6 тыс. руб. на один тепловоз.

Практика эксплуатации дизелей 1-ПД4Д тепловозов ТЭМ18ДМ с ЭСУВТ.01 показала, что с течением времени в результате износа деталей топливной аппаратуры, клапанного механизма и цилиндра-поршневой группы наблюдается увеличение разницы индикаторных мощностей по цилиндрам на режиме холостого хода. Увеличение разницы цилиндрических мощностей может также возникнуть после проведения технического обслуживания и ремонта дизеля со сменой форсунок, трубок высокого давления или электронно-управляемых топливных насосов высокого давления.

Работа дизелей с большим различием цилиндрических мощностей на режиме холостого хода сопровождается снижением равномерности вращения коленчатого вала и возникновением дополнительной вибрации. Например, увеличение разницы нагрузок на 20 % повышает неравномерность вращения коленчатого вала дизеля в 1,8 раза. При большом различии цилиндрических

мощностей возникает риск выключения из работы цилиндров, имеющих малую величину индикаторной мощности. Поэтому задача разработки методов технического диагностирования работы и стабилизации цилиндровых мощностей дизеля с ЭСУВТ.01 на режиме холостого хода **является актуальной задачей.**

Степень разработанности темы исследования. Вопросам диагностирования и регулирования дизельных двигателей посвящены работы многих ученых, среди которых: Балабин В.Н., Варбанец Р.А., Васькевич Ф.А., Какоткин В.З., Коссов Е.Е., Лобанов И.И., Марков В.А., Никитин А.М., Никитин Е.А., Поварков И.Л., Федотов Г.Б., Фурман В.В., Шевлягин В.П. и др.

Объектом исследования является тепловозный дизельный двигатель 1-ПД4Д с электронной системой управления подачей топлива.

Предметом исследования являются параметры рабочего процесса дизельного двигателя 1-ПД4Д с электронной системой управления подачей топлива.

Цели и задачи. Целью диссертационной работы является повышение экономичности работы дизеля 1-ПД4Д с ЭСУВТ.01 путем разработки методов технического диагностирования и стабилизации цилиндровых мощностей на режиме холостого хода.

Для достижения поставленной цели решены следующие задачи:

- выполнен анализ работы цилиндров тепловозных дизельных двигателей 1-ПД4Д с ЭСУВТ.01 на холостом ходу;
- разработан способ определения индикаторной мощности цилиндра дизеля по результатам испытательного воздействия на цилиндр;
- разработаны и апробированы методы технического диагностирования работы цилиндров дизельного двигателя 1-ПД4Д с ЭСУВТ.01 на режиме холостого хода;

- разработан метод расчетного определения требуемой продолжительности подачи топлива по цилиндрам для стабилизации их мощностей на холостом ходу;
- разработан метод стабилизации цилиндрических мощностей на основе последовательного регулирования параметров подачи топлива в каждый цилиндр, определенных по результатам испытательного воздействия на цилиндр;
- разработаны и апробированы алгоритмы технического диагностирования и стабилизации цилиндрических мощностей дизельного двигателя 1-ПД4Д на холостом ходу.

Научная новизна результатов, полученных в результате выполнения диссертационного исследования, заключается в следующем:

- разработан способ определения индикаторной мощности цилиндра дизеля с ЭСУВТ.01 на режиме холостого хода. В основу нового способа положена величина приращения средней продолжительности подачи топлива электроуправляемыми топливными насосами ЭСУВТ.01 при отключении подачи топлива в цилиндр;
- разработан метод расчетного определения требуемой продолжительности подачи топлива по цилиндрам для стабилизации их мощностей на холостом ходу (расчетный метод стабилизации цилиндрических мощностей);
- разработан метод стабилизации мощности на основе последовательного регулирования параметров подачи топлива в каждый цилиндр, определенных по результатам испытательного воздействия на цилиндр (экспериментальный метод стабилизации цилиндрических мощностей);
- разработаны алгоритмы технического диагностирования и стабилизации мощностей по цилиндрам дизельного двигателя 1-ПД4Д на режиме холостого хода.

Теоретическая и практическая ценность работы. Разработанные методы позволили:

- в условиях эксплуатации выявлять неработающий цилиндр дизельного двигателя 1-ПД4Д с ЭСУВТ.01 на режиме холостого хода, а также уточнять причину неисправности;
- определять необходимые поправки к продолжительности подачи топлива в каждый цилиндр дизеля для стабилизации их мощностей и обеспечения длительной работы на пониженной частоте вращения коленчатого вала на режиме холостого хода.

Методология и методы исследования. При разработке алгоритмов технического диагностирования и стабилизации мощностей по цилиндрам использован аппарат теории алгоритмов. Экспериментальные исследования проводились с использованием методов планирования эксперимента. Результаты экспериментов обрабатывались с использованием статистических методов.

Положения, выносимые на защиту:

- расчетный метод стабилизации цилиндрических мощностей дизеля 1-ПД4Д с ЭСУВТ.01 на режиме холостого хода;
- экспериментальный метод стабилизации цилиндрических мощностей дизеля 1-ПД4Д с ЭСУВТ.01 на режиме холостого хода;
- алгоритмы технического диагностирования и стабилизации мощностей по цилиндрам дизельного двигателя 1-ПД4Д с ЭСУВТ.01 на режиме холостого хода.

Степень достоверности подтверждена путем сопоставления полученных экспериментальных и теоретических результатов. Погрешность, определенная сравнением результатов прямого измерения с результатами расчета индикаторной мощности дизеля 1-ПД4Д с ЭСУВТ.01 на режиме холостого хода по заданным параметрам, не превышает 4 %.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались и обсуждались на:

- научно-технических советах отделения «Тяговый подвижной состав» АО «Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта» (АО «ВНИИЖТ») в 2013-2019 г;
- конкурсе научных работ аспирантов АО «ВНИИЖТ» в 2017 г;
- IX международной научно-практической конференции «Транспортная инфраструктура Сибирского региона», проведенной в ФГБОУ ВО «Иркутский государственный университет путей сообщения (ИрГУПС)» в 2018 г.;
- Всероссийской научно-практической конференции, посвященной 75-летию аспирантуры АО «ВНИИЖТ» в 2019 г.;
- VII Международной научно-технической конференции «Локомотивы. Электрический транспорт. XXI век», проведенной в ФГБОУ ВО «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I» (ПГУПС) в 2020 г.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, семи глав, заключения, списка литературы, состоящего 65 наименований. Общий объем диссертации составляет 126 страниц машинописного текста, содержит 7 приложений, 21 рисунок и 13 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении приводятся обоснование актуальности темы диссертации, цель и задачи исследования, объект и предмет исследования, указаны научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, положения, выносимые на защиту, обоснованность и достоверность полученных результатов, апробация работы, структура и объем диссертации.

В первом разделе диссертации выполнен анализ режимов работы дизельных двигателей 1-ПД4Д маневровых тепловозов ТЭМ18ДМ в эксплуатации, приведены причины увеличения разницы цилиндровых мощностей дизельных двигателей на режиме холостого хода, описаны конструктивные особенности и преимущества современных электронных систем управления подачей топлива в части улучшения рабочего процесса.

Представлены основные технические характеристики отечественных и зарубежных дизельных двигателей, оснащенных электронными системами управления подачей топлива. Сформулированы цель и задачи исследования.

Использование систем электронного управления подачей топлива позволяет улучшить рабочий процесс дизельного двигателя на режиме холостого хода за счет повышенного давления впрыска топлива форсункой и гибкого регулирования угла опережения подачи топлива в цилиндр в зависимости от частоты вращения коленчатого вала и температур теплоносителей дизеля. Применение электронного управления позволило уменьшить неравномерность подачи топлива топливными насосами высокого давления (ЭТНВД).

Стабилизация цилиндрических мощностей дизельного двигателя в эксплуатации на режиме холостого хода является достаточно трудоемкой задачей в силу взаимного влияния каждого из элементов топливной аппаратуры (ЭТНВД, трубка высокого давления, форсунка) на количество поданного в цилиндр топлива.

Разработка методов стабилизации цилиндрических мощностей дизеля представляет собой научно-исследовательскую задачу, требующую подтверждения экспериментальными исследованиями.

Во втором разделе рассмотрены методика и результаты экспериментальных исследований работы дизелей 1-ПД4Д тепловозов ТЭМ18ДМ №№ 880, 881, 882, 883, 1022 приписки эксплуатационного локомотивного депо Бологовское Октябрьской Дирекции тяги ОАО «РЖД» с ЭСУВТ.01 на режиме холостого хода.

Проведенные испытания показали, что у дизелей ЭСУВТ.01 на режиме холостого хода неравномерность распределения мощностей по цилиндрам составила 11,5 % от индикаторной мощности всех цилиндров дизеля и обусловлена различием количества подаваемого в цилиндры топлива и индикаторного КПД рабочих циклов.

Цилиндровая мощность на режиме холостого хода косвенно оценивается по величинам температуры газов на выходе из цилиндра и максимального давления цикла, измеряемых термопарой и максиметром. При этом достоверность результатов зависит от технического состояния измерительных приборов. С целью повышения объективности исследования был предложен новый способ определения мощности каждого цилиндра дизеля.

Сущность способа состоит в том, что для поддержания заданной частоты вращения коленчатого вала дизеля блоком управления ЭСУВТ.01 подбирается средняя продолжительность подачи топлива ЭТНВД (φ_T), измеряемая в градусах поворота коленчатого вала (град. п.к.в.). При выключении из работы одного цилиндра подача топлива в остальные цилиндры (φ_{Ti}) увеличивается. Увеличение (приращение) топливоподачи ($\Delta\varphi_{Ti}$), происходит пропорционально индикаторной мощности отключенного цилиндра (рисунок 1, 2, таблица 1). Указанное приращение топливоподачи определяется выражением (1).

$$\Delta\varphi_{Ti} = \varphi_{Ti} - \varphi_T \quad (1)$$

Таблица 1 - Результаты испытаний дизеля 1-ПД4Д с ЭСУВТ.01

№ п/п	Наименование параметра	Единица измерения	Значение параметров по цилиндрам дизеля					
			1	2	3	4	5	6
1	Индикаторная мощность	кВт	6,6	4,8	5,0	8,0	4,0	6,1
2	Приращение продолжительности подачи топлива во все цилиндры дизеля при отключении данного цилиндра	град. п.к.в	0,61	0,45	0,48	0,82	0,37	0,59

Преимущество определения индикаторной мощности цилиндра оценкой приращения φ_T при отключении цилиндра состоит в том, что для

определения φ_T не требуется использование дополнительных средств измерений.

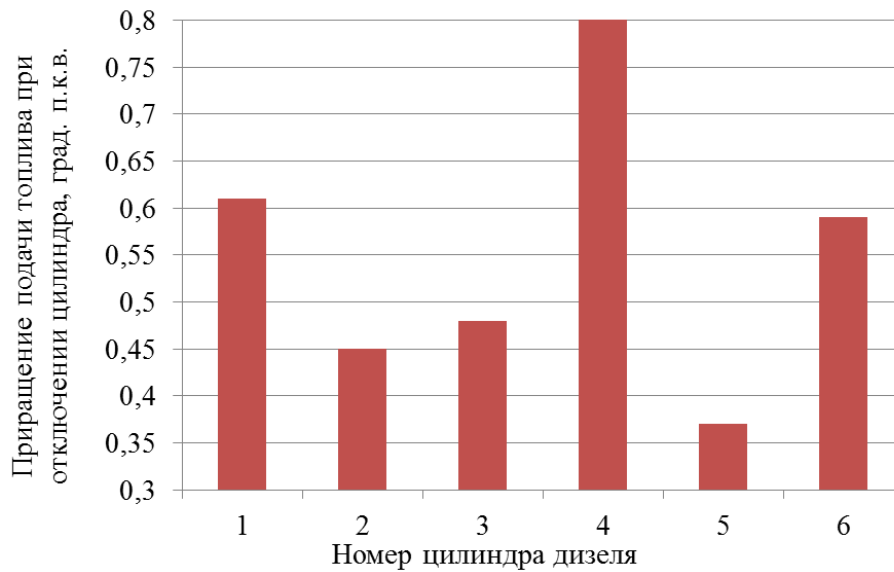


Рисунок 1 – Приращение подачи топлива при последовательном отключении цилиндров

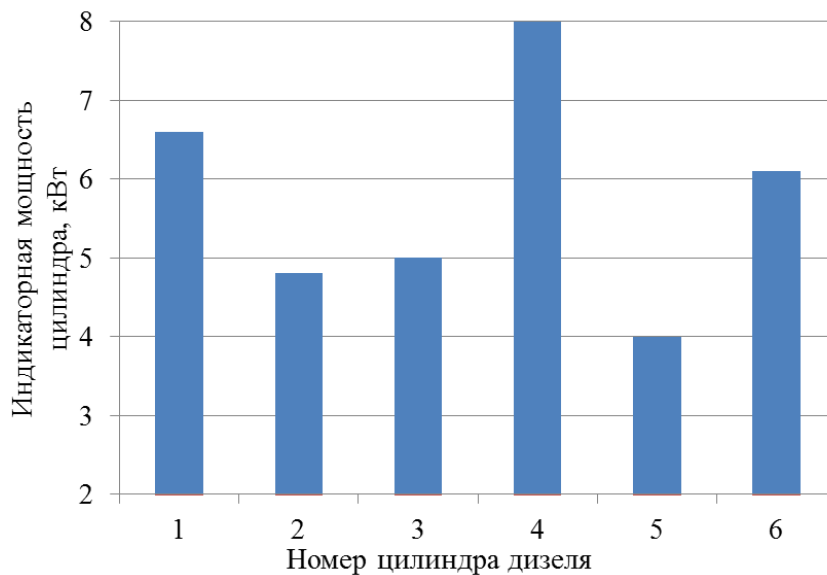


Рисунок 2 – Распределение индикаторных мощностей по цилиндрам

В третьем разделе выполнен анализ существующих методов технического диагностирования работы цилиндров дизелей, на основе которого выбраны два наиболее предпочтительных для дизеля 1-ПД4Д с ЭСУВТ.01: метод поочередного отключения подачи и метод последовательного увеличения подачи топлива по цилиндрам дизеля.

Метод поочередного отключения подачи топлива по цилиндрам дизельного двигателя предусматривает сравнение величины подачи топлива φ_t при работе дизеля на всех цилиндрах и с одним отключенным (см. формулу (1)). При неработающем цилиндре его отключение не повлияет на среднюю продолжительность топливоподачи при работе дизеля на оставшихся цилиндрах и величина $\Delta\varphi_{ti}$ будет равна нулю. Блок-схема алгоритма технического диагностирования работы цилиндров методом поочередного отключения подачи топлива приведена на рисунке 3.

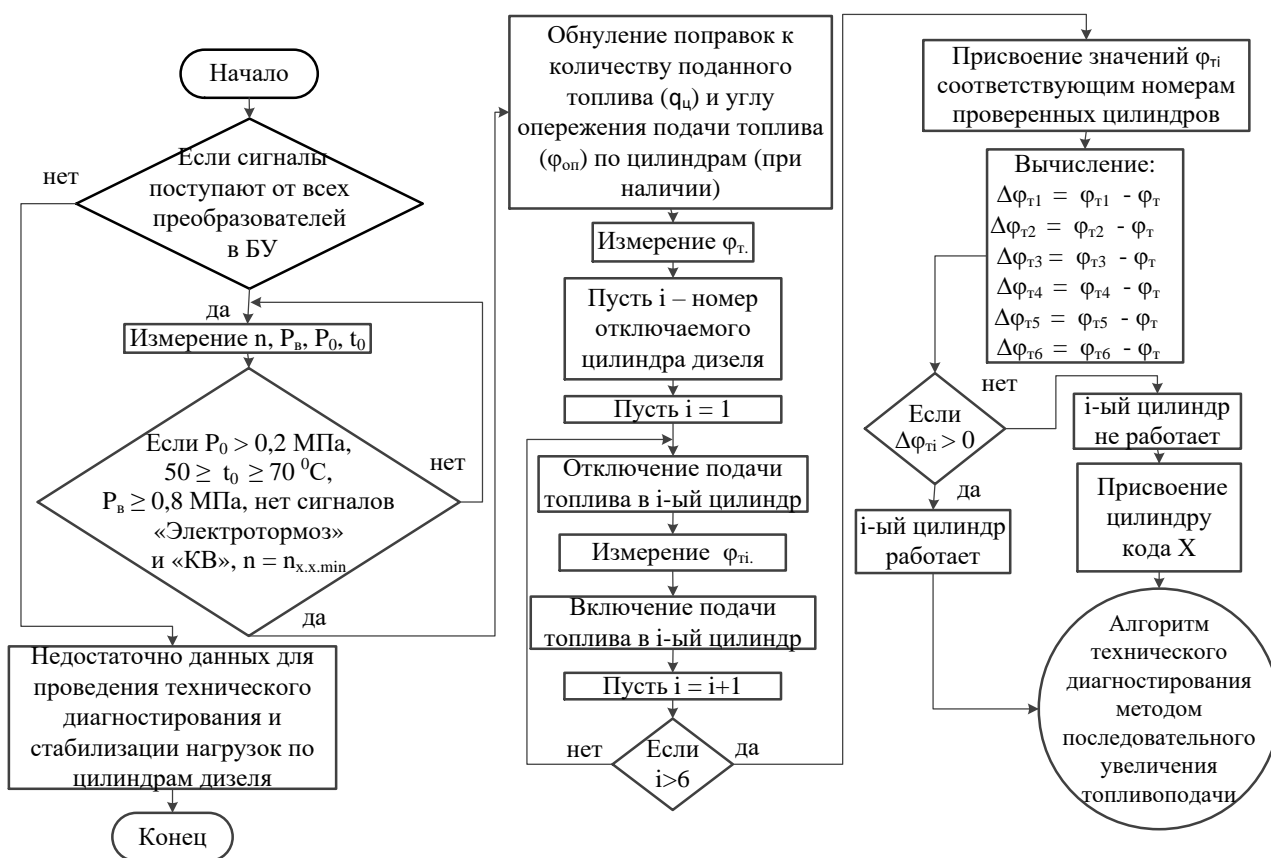
При использовании метода последовательного увеличения топливоподачи по цилиндрам дизеля блоком управления ЭСУВТ.01 (БУ) фиксируется изменение частоты вращения коленчатого вала дизельного двигателя. При увеличении длительности топливоподачи одного ЭТНВД изменение частоты вращения коленчатого вала составит более $\pm 5 \text{ мин}^{-1}$, то цилиндр признается работающим. На рисунке 4 приведена блок-схема алгоритма технического диагностирования работы цилиндров методом последовательного увеличения топливоподачи.

Включение в работу ранее неработающего цилиндра, который был определен методом последовательного отключения подачи топлива, свидетельствует о том, что плунжер и электрогидравлический клапан ЭТНВД не заклинены. Привод ЭТНВД, включающий в себя кулачковый вал и толкатель, исправен и в трубопроводе высокого давления отсутствует воздух. При этом кабели связи и разъемы не повреждены и сигнал поступает от блока управления ЭСУВТ.01 к ЭТНВД.

Таким образом, предлагаемый метод технического диагностирования работы цилиндров дизельного двигателя с ЭСУВТ.01, основанный на синтезе методов последовательного отключения подачи топлива и кратковременного увеличения подачи топлива, позволяет уточнить причину отказа цилиндра.

Проверка дизелей 1-ПД4Д тепловозов ТЭМ18ДМ №№ 880, 881, 882, 883, 1022 по указанному методу показала работоспособность всех

цилиндров. Последующее снятие индикаторных диаграмм по цилиндрам и оценка результатов измерений подтвердили результаты проверки.



P_0 – давление масла на входе в дизель; P_B – давление воздуха после тормозного компрессора; t_0 – температура масла на входе в дизель; $n_{x.x. min}$ – пониженная частота вращения вала дизеля на режиме холостого хода; $q_{ц}$ – цикловая подача топлива в цилиндр дизеля; $\varphi_{оп}$ – угол опережения подачи топлива в цилиндр дизеля; $KВ$ – контактор возбуждения главного генератора тепловоза; *Электротормоз* – сигнал, соответствующий положению контроллера машиниста в положении реостатного тормоза

Рисунок 3 – Блок-схема алгоритма технического диагностирования работы цилиндров методом их последовательного отключения

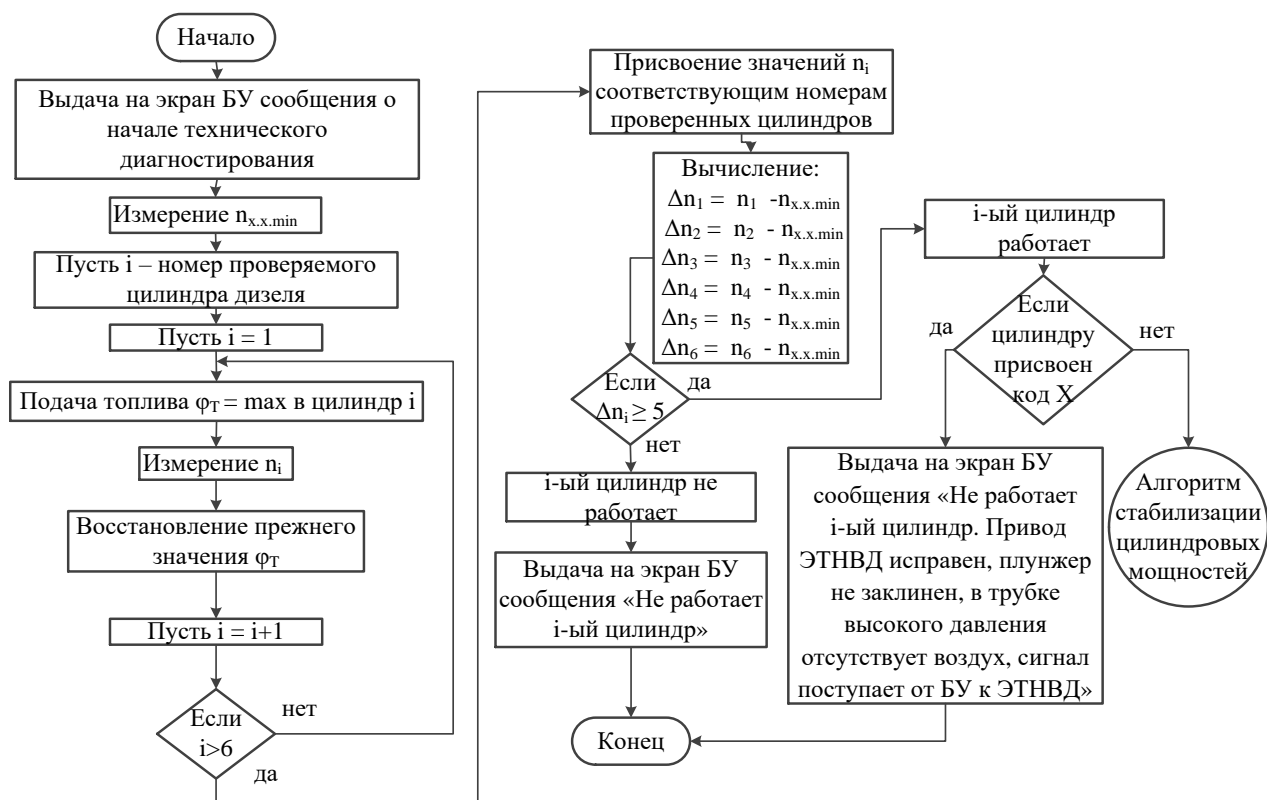


Рисунок 4 – Блок-схема алгоритма технического диагностирования работы цилиндров методом последовательного увеличения топливоподачи

В четвертом разделе приведены расчетный и экспериментальный методы стабилизации цилиндрических мощностей дизеля 1-ПД4Д с ЭСУВТ.01 на режиме холостого хода.

Особенность расчетного метода состоит в том, что при расчете необходимых поправок к продолжительности подачи топлива для стабилизации цилиндрических мощностей учитываются два параметра, влияющие на индикаторную мощность: количество поданного за цикл топлива и индикаторный КПД рабочего цикла. При этом с целью упрощения расчета приняты следующие допущения:

- частота вращения коленчатого вала и нагрузка на дизель при стабилизации цилиндрических мощностей постоянны;
- механический КПД дизеля постоянный;

- изменение индикаторного КПД рабочего цикла зависит от изменения количества поданного в цилиндр топлива.

Поскольку механический КПД дизеля принят постоянным, то в дальнейших расчетах сделан переход от индикаторных показателей работы дизеля к эффективным. Согласно исследованиям к.т.н., профессора Хомича А.З. на режиме холостого хода дизель развивает определенную эффективную мощность, которая затрачивается на привод вспомогательных механизмов (вентиляторы охлаждения тяговых электродвигателей, вспомогательный генератор).

Эффективная мощность дизеля и его i -го цилиндра определяется из выражений (2) и (3):

$$P_e = \alpha_3 \cdot i \cdot \eta_e \cdot \varphi_T \quad (2)$$

$$P_{ei} = \alpha_3 \cdot \eta_{ei} \cdot \varphi_T \quad (3)$$

где i – число цилиндров дизеля; η_e – эффективный КПД дизеля; η_{ei} – эффективный КПД i -го цилиндра; φ_T – средняя продолжительность подачи топлива в цилиндры дизеля, град. п.к.в.; α_3 – постоянный коэффициент.

Коэффициент α_3 определяется из уравнения (4):

$$\alpha_3 = \alpha_1 \cdot \alpha_2 \cdot Q_n^T \cdot q_{уд} \cdot \frac{n}{60 \cdot m}, \quad (4)$$

где Q_n^T – низшая теплотворная способность топлива, кДж/кг; $q_{уд}$ – характеристика удельной подачи топлива ЭТНВД, г/град. п.к.в.; n – частота вращения коленчатого вала дизеля, мин⁻¹; m – коэффициент тактности дизеля; α_1, α_2 – коэффициенты связи размерности переменных.

На основе выражений (2) и (3) составлены уравнения для определения эффективной мощности дизеля при работе ЭТНВД всех цилиндров и отключении одного из цилиндров (например, первого):

$$P_0 = \sum_{i=1}^6 \eta_e \cdot \alpha_3 \cdot \varphi_T \quad (5)$$

$$P_1 = \sum_{i=2}^6 \eta_{ei} \cdot \alpha_3 \cdot \varphi_{Ti}, \quad (6)$$

где P_0 – мощность дизеля при работе ЭТНВД всех цилиндров, кВт; P_1 – мощность дизеля при отключении ЭТНВД первого цилиндра, кВт;

η_e – эффективный КПД всех цилиндров дизеля; η_{ei} – эффективный КПД при одном отключенном цилиндре; φ_{Ti} – средняя продолжительность подачи топлива в цилиндры дизеля при одном отключенном цилиндре, град. п.к.в.

Изменение эффективного КПД цилиндра при изменении длительности подачи топлива описывается выражением:

$$\eta_{ei} = \eta_e \cdot \left(1 + K \cdot \frac{\varphi_{Ti} - \varphi_T}{\varphi_T} \right), \quad (7)$$

где K – коэффициент связи эффективного КПД цилиндра и продолжительности подачи топлива, принятый по результатам испытаний стендового двигателя Д50.

Определение поправок к длительности подачи топлива по цилиндрам дизеля с целью стабилизации их мощностей производилось путем измерения величины φ_T , последовательного отключения цилиндров и определения величины φ_{Ti} . Далее значения φ_T и φ_{Ti} подставлялись в уравнения (5) и (6). Совместное решение уравнений (5) и (6) с учетом выражения (7) позволило определить необходимые поправки к цикловой подаче топлива для каждого цилиндра дизеля. Упомянутая поправка определялась как произведение удельной подачи топлива ЭТНВД на текущую продолжительность подачи топлива.

При стабилизации цилиндрических мощностей с использованием экспериментального метода частота вращения коленчатого вала дизеля и нагрузка на него постоянны. Стабилизация мощностей заключается в последовательном отключении подачи топлива в цилиндры дизеля и оценке величины φ_{Ti} по формуле (1). Далее величины $\Delta\varphi_{Ti}$ сравниваются между собой. При разности между максимальным и минимальным значениями $\Delta\varphi_{Ti}$ по отдельным цилиндрам более 0,1 град. п.к.в. производится уменьшение количества поданного топлива в тот цилиндр, при отключении которого получено максимальное значение $\Delta\varphi_{Ti}$. Уменьшение топливоподачи в один из цилиндров приводит к некоторому росту индикаторных мощностей остальных цилиндров дизеля. Поэтому при последующем отключении

цилиндров разность между максимальным и минимальным значениями $\Delta\varphi_{Ti}$ уменьшится. Если после уменьшения подачи топлива в цилиндр на 20% разность между максимальным и минимальным значениями $\Delta\varphi_{Ti}$ составляет более 0,1 град. п.к.в., то производится увеличение топливopодачи в цилиндр, при отключении которого получено минимальное значение $\Delta\varphi_{Ti}$.

Таким образом, путем пошагового регулирования количества поданного топлива достигается требуемая разница между максимальным и минимальным значением $\Delta\varphi_{Ti}$. Испытания дизелей показали, что при этом разница индикаторных мощностей по цилиндрам находится в диапазоне от 1,0 до 1,8 кВт, что достаточно для равномерной нагрузки цилиндров дизеля.

В пятом разделе разработаны алгоритмы стабилизации цилиндрических мощностей дизельного двигателя 1-ПД4Д с ЭСУВТ.01, выполняемые в следующей последовательности. На первом этапе выполняется сравнение величин приращений топливopодач по цилиндрам дизеля (рисунок 5), далее стабилизация цилиндрических мощностей с использованием расчетных или экспериментальных методов (рисунок 6 и 7).

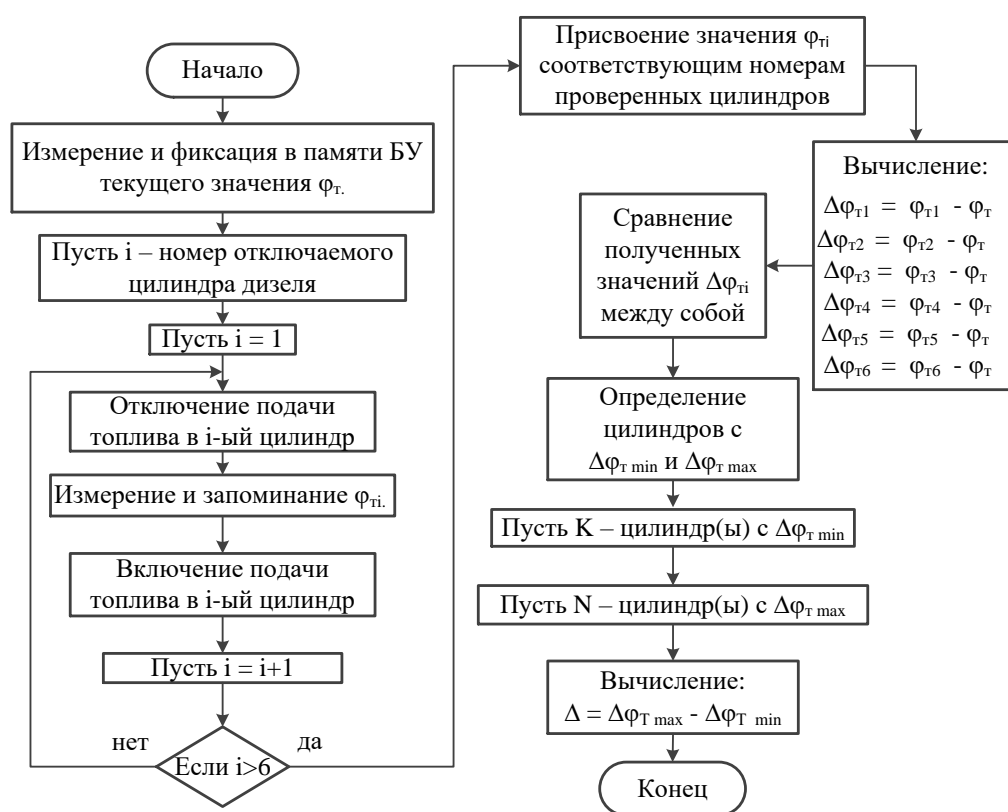


Рисунок 5 – Блок схема алгоритма сравнения приращений подач топлива

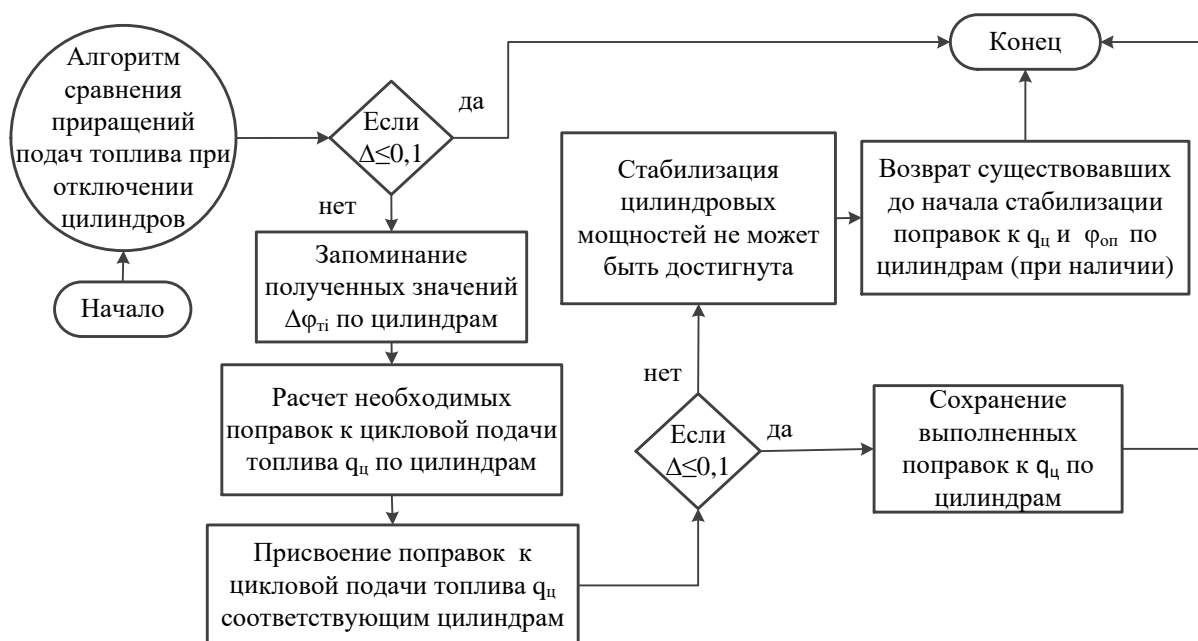


Рисунок 6 – Блок схема алгоритма стабилизации цилиндрических мощностей
расчетным методом

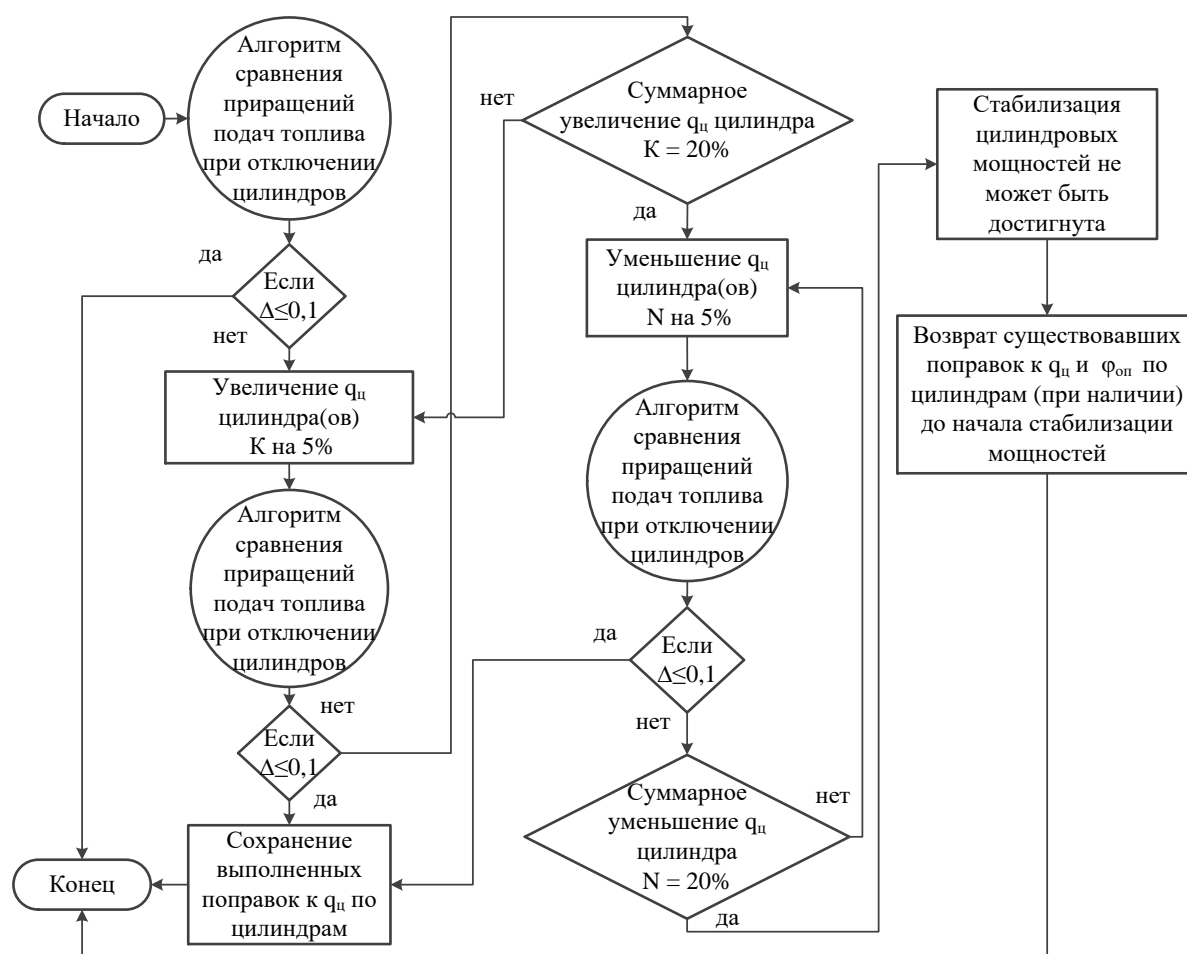


Рисунок 7 – Блок схема алгоритма стабилизации цилиндрических мощностей
экспериментальным методом

Шестой раздел посвящен экспериментальной проверке алгоритмов стабилизации цилиндрических мощностей, выполненной на стендовом дизель-генераторе 1-ПДГ4Д в ОАО «Пензадизельмаш» и на дизеле 1-ПД4Д тепловоза ТЭМ18ДМ №1022 в сервисном локомотивном депо Тверь ООО «ЛокоТех-Сервис» филиала Северо-Западный.

По результатам проверки алгоритма стабилизации цилиндрических мощностей расчетным методом на стендовом дизель-генераторе установлено:

- перераспределение цилиндрических мощностей при сохранении разности равной 2,2 кВт;
- снижение разности температур выпускных газов по цилиндрам до 14 °С;
- снижение разницы максимального давления цикла по цилиндрам до 0,31 МПа.

По результатам проверки алгоритма стабилизации цилиндрических мощностей экспериментальным методом на дизель-генераторе установлено:

- уменьшение разности цилиндрических мощностей до 1,8 кВт;
- снижение разности температур выпускных газов по цилиндрам с 18 °С до 8 °С;
- снижение разницы максимального давления цикла по цилиндрам до 0,39 МПа.

Стабилизация цилиндрических мощностей с использованием вышеуказанных методов не привела к заметному снижению часового расхода топлива стендовым дизель-генератором.

По результатам проверки алгоритма стабилизации цилиндрических мощностей экспериментальным методом на дизеле тепловоза установлено:

- снижение разницы цилиндрических мощностей по цилиндрам с 3,0 кВт до 1,0 кВт;

- уменьшение разницы температур выпускных газов по цилиндрам с 40 °С до 12 °С;
- снижение разницы максимального давления цикла по цилиндрам до 0,45 МПа.

В седьмом разделе проведена оценка ожидаемого экономического эффекта от внедрения алгоритмов технического диагностирования и стабилизации цилиндрических мощностей на парке тепловозов ТЭМ18ДМ с ЭСУВТ.01 эксплуатационного локомотивного депо Бологовское. Экономический эффект рассчитан для двадцати тепловозов в интервале эксплуатации 15 лет. Результаты расчета экономического эффекта сведены в таблицу 2.

Таблица 2 – Экономический эффект от внедрения алгоритмов технического диагностирования и стабилизации цилиндрических мощностей

№ п/п	Наименование величины	Обозначение	Единица измерения	Значение
1	Экономия эксплуатационных расходов за счет реализации алгоритмов технического диагностирования и стабилизации цилиндрических мощностей на двадцати тепловозах ТЧЭ-4 Бологовское за срок службы ЭСУВТ.01	Р	руб.	462183
2	Экономический эффект за счет реализации алгоритмов технического диагностирования и стабилизации цилиндрических мощностей в интервале эксплуатации двадцати тепловозов ТЭМ18ДМ приписки ТЧЭ-4 Бологовское в течение срока службы системы ЭСУВТ.01	Э	млн. руб.	13,6
3	Годовой экономический эффект за счет реализации алгоритмов технического диагностирования и стабилизации цилиндрических мощностей в интервале эксплуатации двадцати тепловозов ТЭМ18ДМ приписки ТЧЭ-4 Бологовское в течение срока службы системы ЭСУВТ.01	Э _А	млн. руб.	4,35
4	Срок окупаемости предложенных технических решений	Т _{ок}	годы	0,65

Система ЭСУВТ.01 позволяет снизить частоту вращения вала дизеля на холостом ходу до 240 мин⁻¹. При работе на данном режиме большое различие

цилиндровых мощностей приводит к повышенной вибрации дизеля и кабины машиниста. Поэтому машинисты вынуждены повышать частоту вращения коленчатого вала дизеля до штатной, равной 300 мин^{-1} , тем самым существенно снижая экономию топлива дизелем тепловоза на холостом ходу.

Устранение различия цилиндровых мощностей дизеля достигается регулировкой дизеля при проведении реостатных испытаний тепловоза после проведения текущих ремонтов ТР-2, ТР-3, СР. Однако в интервале эксплуатации до ТР-2 производится смена форсунок (каждое ТО-3, каждый ТР-1), что нарушает ранее сделанную регулировку и вызывает появление повышенной вибрации. По этой причине предлагается проводить техническое диагностирование работы и стабилизацию цилиндровых мощностей после проведения каждого ТО-3 и ТР-1. Это позволит поддерживать равномерность распределения мощностей по цилиндрам, повысит время работы дизеля на пониженной частоте вращения коленчатого вала и экономию топлива дизелем тепловоза в эксплуатации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации получены следующие основные результаты:

- анализ работы дизелей 1-ПД4Д тепловозов ТЭМ18ДМ с ЭСУВТ.01 в эксплуатации на режиме холостого хода выявил неравномерность распределения индикаторных мощностей по цилиндрам, величина которой составляет до 11,5 % от всей мощности дизеля;
- разработан и апробирован способ определения индикаторной мощности цилиндра дизеля на режиме холостого хода с помощью измерения приращения продолжительности подачи топлива электроуправляемыми топливными насосами ЭСУВТ.01 при отключении подачи топлива в цилиндр;
- разработаны и апробированы методы технического диагностирования работы цилиндров дизеля, позволяющие уточнить причину отказа цилиндра;

- разработан расчетный и экспериментальный методы стабилизации цилиндрических мощностей дизеля 1-ПД4Д с ЭСУВТ.01 на режиме холостого хода;
- на основе разработанных методов составлены алгоритмы технического диагностирования работы цилиндров и стабилизации цилиндрических мощностей дизеля;
- проверка алгоритмов на стендовом дизель-генераторе 1-ПДГ4Д показала, что в результате стабилизации мощностей по расчетному методу произошло перераспределение индикаторных мощностей по цилиндрам. При этом разница индикаторных мощностей не изменилась и осталась равной 2,2 кВт. В результате стабилизации мощностей экспериментальным методом получено снижение разницы индикаторных мощностей по цилиндрам с 2,5 кВт до 1,8 кВт;
- проверка алгоритмов на дизеле 1-ПД4Д тепловоза ТЭМ18ДМ №1022 в условиях эксплуатации показала, что в результате стабилизации мощностей экспериментальным методом получено снижение разницы индикаторных мощностей по цилиндрам с 3,0 кВт до 1,0 кВт;
- произведена оценка эффективности реализации предложенных технических решений. Экономия эксплуатационных расходов за срок службы системы ЭСУВТ.01 в 15 лет за счет реализации алгоритмов технического диагностирования и стабилизации цилиндрических мощностей на дизелях 1-ПД4Д парка тепловозов ТЭМ18ДМ приписки эксплуатационного локомотивного депо Бологовское в количестве 20 единиц составляет 4,35 млн. руб. Срок окупаемости предложенных технических решений 0,65 года;
- результаты настоящей работы планируется использовать при дальнейшем совершенствовании системы электронного впрыска топлива тепловозных дизелей.

В качестве рекомендаций и перспективы дальнейшей разработки темы диссертации предлагается корректировка расчетного метода стабилизации цилиндрических мощностей в части уточнения величины изменения индикаторного КПД при варьировании количества поданного в цилиндр топлива, а также уточнения величин отличия механических потерь по отдельным цилиндрам дизеля.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ

а) В рецензируемых научных изданиях:

1. Струнгарь, С.А. Современные системы электронного впрыска топлива тепловозных дизелей [Текст] / С.А. Струнгарь // Вестник научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. – 2014. – № 4. – С. 46 – 52.

2. Струнгарь, С.А. Исследование работы тепловозных дизелей с пониженной частотой коленчатого вала на режиме холостого хода [Текст] / С.А. Струнгарь, Е.Е. Коссов // Вестник транспорта Поволжья. – 2017. – № 3. – С. 49 – 59.

б) Патент на изобретение:

3. Антюхин, Г.Г. Патент на изобретение «Стенд для испытания и регулировки электронно-управляемых топливных насосов высокого давления дизелей», №2015145217 / Антюхин Г.Г., Струнгарь С.А., Ежевская Л.А. // заявка №2017139776; приоритет изобретения 15.11.2017 г., зарегистрировано в Государственном реестре полезных моделей Российской Федерации 01.10.2018 г.

в) В материалах конференций:

4. Струнгарь, С.А. Методы диагностики работы цилиндров тепловозного дизеля с электронным управлением подачей топлива [текст] / С.А. Струнгарь // Транспортная инфраструктура Сибирского региона:

материалы девятой международной научно-практической конференции - Иркутск: ИрГУПС, 2018. – 688 с. – С. 369 – 371.

5. Струнгарь, С.А. Повышение эффективности локомотивного парка тепловозов с дизелями Д49 применением отечественной электронной системы управления [Текст] / С.А. Струнгарь [и др.] // Образование – наука – производство: материалы Всероссийской научно-практической конференции – Чита: ЗаБИИЖТ, 2018. - 261 с. – С. 50 – 53.

6. Струнгарь, С.А. Экспериментальная проверка метода балансировки нагрузок цилиндров дизеля с электронным управлением подачей топлива [Текст] / С.А. Струнгарь // Актуальные вопросы развития железнодорожного транспорта: материалы Всероссийской научно-практической конференции к 75-летию аспирантуры Научно-исследовательского института ж.д. транспорта / под ред. А.Б. Косарева, Г.В. Гогричани. – М.: РАС, 2019. – 272 с. – С. 122 – 128.

Струнгарь Святослав Алексеевич

**РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ СТАБИЛИЗАЦИИ ЦИЛИНДРОВЫХ
МОЩНОСТЕЙ ДИЗЕЛЯ НА РЕЖИМЕ ХОЛОСТОГО ХОДА ПРИ
ЭЛЕКТРОННОЙ СИСТЕМЕ УПРАВЛЕНИЯ ПОДАЧЕЙ ТОПЛИВА**

05.22.07 – Подвижной состав, тяга поездов и электрификация

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Подписано в печать «__»_____2021 Заказ № 123 Формат 60x90/16
Усл. печ. л. – 1,25 Тираж 80 экз.
Типография АО «ВНИИЖТ»
