

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования «Российский университет транспорта»
(ФГАОУ ВО «Российский университет транспорта»)

На правах рукописи



Струнгарь Святослав Алексеевич

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

Специальность 05.22.07 – Подвижной состав железных дорог, тяга поездов
и электрификация

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук, доцент
Балабин Валентин Николаевич

Москва – 2021

ОГЛАВЛЕНИЕ

	стр.
ВВЕДЕНИЕ.....	6
1 СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА И ЦЕЛЬ ИССЛЕДОВАНИЯ.....	12
1.1 Режимы загрузки дизельных двигателей маневровых тепловозов в эксплуатации.....	12
1.2 Особенности работы дизельного двигателя маневрового тепловоза на режиме холостого хода.....	12
1.3 Расхождение индикаторных мощностей по цилиндрам дизельного двигателя на режиме холостого хода.....	15
1.4 Технологические причины и их влияние на равномерность подачи топлива по цилиндрам дизельного двигателя.....	16
1.5 Влияние изменения технического состояния топливной аппаратуры на равномерность подачи топлива по цилиндрам дизельного двигателя.....	21
1.6 Мероприятия по снижению неравномерности подачи топлива на холостом ходу.....	22
1.7 Улучшение работы тепловозного дизельного двигателя на режиме холостого хода за счет применения электронных систем управления подачей топлива.....	24
1.8 Выводы по разделу 1.....	34
2 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ РАБОТЫ ДИЗЕЛЬНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ С ЭЛЕКТРОННОЙ СИСТЕМОЙ УПРАВЛЕНИЯ ПОДАЧЕЙ ТОПЛИВА НА РЕЖИМЕ ХОЛОСТОГО ХОДА.....	36
2.1 Методика исследований.....	36
2.2 Результаты определения разницы цилиндрических мощностей дизельных двигателей на режиме холостого хода.....	39
2.3 Оценка индикаторной мощности цилиндра дизельного двигателя с электронной системой управления подачей топлива с помощью	

величины приращения средней продолжительности топливоподачи....	41
2.4 Выводы по разделу 2.....	46
3 РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМОВ ТЕХНИЧЕСКОГО ДИАГНОСТИРОВАНИЯ РАБОТЫ ЦИЛИНДРОВ ДИЗЕЛЬНОГО ДВИГАТЕЛЯ С ЭЛЕКТРОННОЙ СИСТЕМОЙ УПРАВЛЕНИЯ ПОДАЧЕЙ ТОПЛИВА.....	47
3.1 Анализ методов технического диагностирования работы цилиндров дизельного двигателя с электронной системой управления подачей топлива на режиме холостого хода.....	47
3.2 Обоснование выбора методов технического диагностирования работы цилиндров дизельного двигателя 1-ПД4Д с электронной системой управления подачей топлива.....	51
3.3 Алгоритмы технического диагностирования работы цилиндров дизельного двигателя 1-ПД4Д с электронной системой управления подачей топлива на режиме холостого хода.....	52
3.4 Выводы по разделу 3.....	58
4 МЕТОДЫ СТАБИЛИЗАЦИИ ЦИЛИНДРОВЫХ МОЩНОСТЕЙ ДИЗЕЛЬНОГО ДВИГАТЕЛЯ 1-ПД4Д С ЭЛЕКТРОННОЙ СИСТЕМОЙ УПРАВЛЕНИЯ ПОДАЧЕЙ ТОПЛИВА.....	59
4.1 Общие положения.....	59
4.2 Расчетный метод стабилизации цилиндровых мощностей.....	59
4.3 Экспериментальный метод стабилизации цилиндровых мощностей.....	64
4.4 Вывод по разделу 4.....	65
5 АЛГОРИТМЫ СТАБИЛИЗАЦИИ ЦИЛИНДРОВЫХ МОЩНОСТЕЙ ДИЗЕЛЬНОГО ДВИГАТЕЛЯ 1-ПД4Д С ЭЛЕКТРОННОЙ СИСТЕМОЙ УПРАВЛЕНИЯ ПОДАЧЕЙ ТОПЛИВА.....	67
5.1 Алгоритм сравнения величин приращений топливоподачи по цилиндрам дизельного двигателя.....	67
5.2 Алгоритм стабилизации цилиндровых мощностей дизеля	

экспериментальным методом.....	69
5.3 Алгоритм стабилизации цилиндрических мощностей дизельного двигателя расчетным методом.....	71
5.4 Вывод по разделу 5.....	73
6 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА АЛГОРИТМОВ СТАБИЛИЗАЦИИ ЦИЛИНДРОВЫХ МОЩНОСТЕЙ ДИЗЕЛЬНОГО ДВИГАТЕЛЯ 1-ПД4Д С ЭЛЕКТРОННОЙ СИСТЕМОЙ УПРАВЛЕНИЯ ПОДАЧЕЙ ТОПЛИВА.....	74
6.1 Результаты проверки алгоритмов стабилизации цилиндрических мощностей на стендовом дизель-генераторе.....	76
6.2 Результаты проверки алгоритма стабилизации цилиндрических мощностей на дизеле тепловоза.....	76
6.3 Выводы по разделу 6.....	79
7 ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРЕДЛАГАЕМЫХ МЕРОПРИЯТИЙ.....	80
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	86
Список сокращений и условных обозначений.....	88
Список литературы.....	89
ПРИЛОЖЕНИЕ А - Основные технические характеристики отечественных и зарубежных дизельных двигателей с электронной системой впрыска топлива, установленные на тепловозах парка ОАО «РЖД».....	97
ПРИЛОЖЕНИЕ Б - Телеграммы ОАО «РЖД» на проведение диагностики дизелей тепловозов ТЭМ18ДМ с электронной системой управления подачей топлива.....	101
ПРИЛОЖЕНИЕ В - Патент на изобретение.....	104
ПРИЛОЖЕНИЕ Г - Титульный и второй листы программы и методики проверки балансировки нагрузок цилиндров дизеля 1-ПД4Д с электронной системой управления подачей топлива.....	106

ПРИЛОЖЕНИЕ Д - Акт стендовых испытаний дизель-генератора 1-ПДГ4Д с электронной системой управления подачей топлива.....	109
ПРИЛОЖЕНИЕ Е - Акт проверки алгоритмов диагностики и балансировки нагрузок по цилиндрам на дизеле тепловоза ТЭМ18ДМ №1022, оснащенного электронной системой управления подачей топлива ЭСУВТ.01.....	117
ПРИЛОЖЕНИЕ Ж - Акт об установке системы электронного управления подачей топлива на тепловозе ТЭМ2УМ №1033 ПАО «Северсталь».....	123

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования

Железнодорожный транспорт России обеспечивает свыше 40 % грузооборота и 30 % пассажирооборота транспортной системы, что обуславливает его важную роль в транспортной системе страны и требует существенных энергозатрат [1]. 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 технических средств и технологий [2].

Стратегией развития ОАО «РЖД» на период до 2025 г. и на перспективу до 2030 г. предусмотрено создание локомотивов с перспективными техническими решениями, обеспечивающими снижение затрат на дизельное топливо в среднем на 10 % [3].

К числу мероприятий, обеспечивающих энергосбережение в локомотивном хозяйстве, относится внедрение на тепловозах эксплуатируемого парка ОАО «РЖД» электронной системы управления подачей топлива (ЭСУВТ.01), являющейся совместной разработкой коллективов ученых и специалистов АО «ВНИИЖТ» и ООО «ППП Дизельавтоматика» (г. Саратов) [4].

Использование системы ЭСУВТ.01 обеспечивает снижение годового расхода топлива тепловозом в эксплуатации до 12 % в сравнении с тепловозами в штатной комплектации прежде всего за счет снижения частоты вращения вала на холостом ходу на величину до 20 %. При этом достигается экономия годовых эксплуатационных расходов на горюче-смазочные материалы в размере до 182,6 тыс. руб. одним тепловозом серии ТЭМ18ДМ [5].

В настоящее время на сети дорог ОАО «РЖД» работает более семисот тепловозов ТЭМ2 и ТЭМ18ДМ с ЭСУВТ.01 модификаций ЭСУВТ.01-06-00, ЭСУВТ.01-06-01 и ЭСУВТ.01-06-02.

Величина достигнутой экономии в значительной степени определяется стабильностью работы дизеля с ЭСУВТ.01 на холостом ходу, доля которого может составлять до 90 % от общего времени работы дизеля тепловоза [6].

Практика эксплуатации дизельных двигателей тепловозов показала, что с течением времени в результате износа деталей топливной аппаратуры и цилиндро-поршневой группы наблюдается увеличение разницы цилиндрических мощностей на режиме холостого хода. Увеличение разницы мощностей цилиндров может также возникнуть после проведения технического обслуживания и ремонта дизеля со сменой форсунок, трубок высокого давления или электронно-управляемых топливных насосов высокого давления (ЭТНВД). Работа дизельного двигателя с большим различием нагрузок по цилиндрам независимо от его назначения сопровождается снижением равномерности вращения коленчатого вала и возникновением вибрации. Например, увеличение разницы цилиндрических мощностей на 10 % повышает неравномерность вращения вала дизеля в 2 раза [7]. При большом различии цилиндрических мощностей возникает риск выключения из работы цилиндров, имеющих малую величину индикаторной мощности. Исследованиями [7] установлено, что при неравномерности цилиндрических мощностей наибольшему износу подвергаются детали перегруженных цилиндров, что вызывает снижение эксплуатационного ресурса дизельного двигателя. Так при неравномерности цилиндрических мощностей $\pm 5\%$ и $\pm 10\%$ снижение ресурса дизеля составляет 6 % и 12 % соответственно.

В регламент обязательных работ при проведении технического обслуживания ТО-3 или текущих ремонтов ТР-1, ТР-2 и ТР-3 входит проверка работы всех цилиндров дизельного двигателя на холостом ходу [8] при необходимости их настройка и регулировка. В отличие от механической системы подачи топлива функциональные возможности системы ЭСУВТ.01 позволяют выполнить регулировку нагрузки каждого цилиндра дизельного двигателя на холостом ходу, не нарушая регулировки на номинальном режиме. Это является важным преимуществом системы ЭСУВТ.01.

Для дизельного двигателя с ЭСУВТ.01 проверка работы цилиндров и регулировка их мощности осуществляется специалистом вручную путем подключения к блоку управления (БУ) персонального компьютера с сервисной программой Inject Service, что приводит к дополнительным временным затратам.

Поэтому задача разработки методов технического диагностирования работы и стабилизации цилиндровых мощностей дизельного двигателя с ЭСУВТ.01 на режиме холостого хода **является актуальной задачей.**

Степень разработанности темы

Вопросам диагностирования и регулирования дизельных двигателей посвящены работы многих ученых, в частности: Балабин В.Н. [62], Варбанец Р.А. [59-61], Васькевич Ф.А. [52], Какоткин В.З. [62], Коссов Е.Е. [13, 39, 62], Лобанов И.И. [62], Марков В.А. [21], Никитин А.М. [42], Никитин Е.А. [53], Поварков И.Л. [5], Федотов Г.Б. [29 – 33], Фурман В.В. [21, 41], Шевлягин В.П. [20, 33] и др.

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

В работе поставлены и 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.

Объект исследования: тепловозный дизельный двигатель 1-ПД4Д с электронной системой управления подачей топлива.

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

Научная новизна исследований заключается в следующем:

- разработан способ определения индикаторной мощности цилиндра дизеля с ЭСУБТ.01 на режиме холостого хода. В основу нового способа положена величина приращения средней продолжительности подачи топлива электроуправляемыми топливными насосами ЭСУБТ.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.

Основные положения, выносимые на защиту:

- расчетный метод стабилизации цилиндрических мощностей дизеля 1-ПД4Д с ЭСУБТ.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.

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.

Реализация результатов работы

Результаты настоящей работы планируется использовать при дальнейшем совершенствовании системы электронного управления подачей топлива тепловозных дизелей.

Достоверность научных положений и результатов диссертационной работы 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

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», проводимой 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.

Публикации

По результатам проведенных исследований опубликовано 6 научных трудов, в том числе две статьи в журналах из перечня рецензируемых изданий ВАК при Минобрнауки России: «Вестник транспорта Поволжья», «Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта». Получен патент на изобретение

Структура и объем диссертации

Диссертационная работа состоит из введения, семи глав, основных результатов и выводов, списка литературы, состоящего из 65 наименований. Общий объем диссертации составляет 126 страниц машинописного текста, содержит 7 приложений, 21 рисунок и 13 таблиц.

Автор выражает благодарность и признательность кандидату технических наук Антюхину Георгию Георгиевичу и инженеру Гершкевичу Алексею Яковлевичу за оказанную помощь при подготовке и проведении экспериментальных исследований, а также кандидату технических наук Поваркову Игорю Леонидовичу за оказанную помощь при подготовке теоретической части диссертации.

1 СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА И ЦЕЛЬ ИССЛЕДОВАНИЯ

1.1 Режимы загрузки дизельных двигателей маневровых тепловозов в эксплуатации

Работа дизельного двигателя тепловоза в эксплуатации характеризуется широким диапазоном изменения частоты вращения коленчатого вала и мощности дизеля, что необходимо для обеспечения требуемой силы тяги и скорости движения при выполнении различных видов поездной работы [9].

При эксплуатации маневрового тепловоза продолжительность работы двигателя на режимах холостого хода и долевых нагрузок может достигать 40 - 90 % от общего времени работы [10]. Специфика загрузки дизелей маневровых тепловозов определяется родом работы, которую они выполняют. Большие значения времени работы под нагрузкой (27-30 %) имеют место при выполнении вывозной и горочной работы, а меньшие (10-18 %) для маневровой работы с грузовыми составами. Другие виды маневровых операций характеризуются средней временной загрузкой дизеля. Время работы дизеля на холостом ходу составляет 70 – 90 % [6, 11]. Таким образом, для дизелей маневровых тепловозов характерна работа большую часть времени на режиме холостого хода.

1.2 Особенности работы дизельного двигателя маневрового тепловоза на режиме холостого хода

На сети ОАО «РЖД» широко распространены маневровые тепловозы серии ТЭМ2 и ТЭМ18 всех индексов с дизелями ПД1 и 1-ПД4 различных модификаций. Исследованиями [12–15] установлено, что при длительной работе дизельных двигателей на режиме холостого хода наблюдаются значительные колебания максимального давления цикла и температуры выпускных газов, характеризующие протекание рабочего процесса в цилиндрах.

Причинами ухудшения рабочего процесса в цилиндрах дизельного двигателя на режиме холостого хода являются:

1 более низкая по сравнению с номинальным режимом работы температура воздуха в цилиндре в момент впрыска топлива, из-за увеличенного суммарного теплоотвода в стенки камеры сгорания, а также более низкого давления и температуры нагнетаемого воздуха, что обуславливается тем, что воздух подвергается меньшему сжатию в компрессорной ступени турбокомпрессора [16, 17];

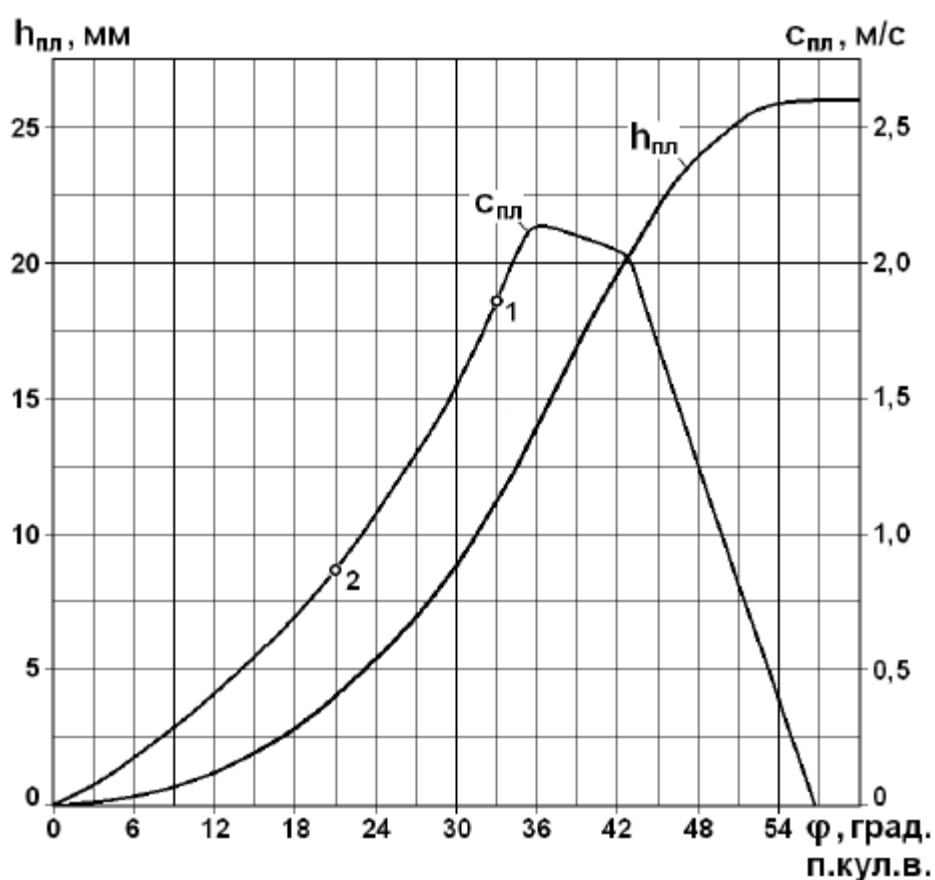
2 меньшее давление впрыска топлива форсункой из-за падения скорости плунжера топливного насоса высокого давления (ТНВД) [18]. Давление впрыска также меньше потому, что впрыск топлива осуществляется через отверстия в форсунке неизменного сечения. При этом его распыливание ухудшается. Менее качественное распыление ухудшает подготовку топлива к воспламенению и сгоранию;

3 момент начала впрыска топлива форсункой в цилиндр дизеля не является оптимальным. Для обеспечения наибольшей экономичности дизеля на номинальном режиме опытным путем выбирается оптимальная величина угла опережения подачи топлива в цилиндр при сохранении в допустимых пределах максимального давления сгорания и скорости нарастания давления. При работе дизеля на долевых режимах и холостом ходу оптимальная величина угла опережения подачи топлива должна уменьшаться по мере снижения частоты вращения вала дизеля по следующим причинам:

- снижается скорость нарастания давления сгорания, работа дизеля становится менее жесткой. Впрыск топлива в более нагретую среду всегда благоприятней с позиции обеспечения быстрой подготовки топливо-воздушной смеси к воспламенению. Поэтому на режиме холостого хода впрыск топлива следует осуществлять ближе к верхней мертвой точке (в.м.т.), т.е. в тот момент, когда в цилиндре дизеля из-за высокого сжатия воздуха, последний имеет повышенную температуру [19];

- впрыск топлива производится при большей скорости движения плунжера.

В качестве примера на рисунке 1.1 дана зависимость хода и скорости плунжера ТНВД дизеля 1-ПД4Д от угла поворота кулачкового вала при частоте вращения кулачкового вала 375 мин^{-1} . Точка 2 условно соответствует геометрическому началу нагнетания топлива ТНВД при установке, равном 29 градусам поворота коленчатого вала п.к.в. до в.м.т., а точка 1 геометрическому началу нагнетания при смещении начала нагнетания на 6 градусов поворота коленчатого вала (п.к.в.) по ходу его вращения.



- 1 – точка начала нагнетания топлива ТНВД при смещении начала нагнетания на другой участок профиля кулачка на 6 градусов по ходу вращения коленчатого вала;
 2 - исходная точка начала нагнетания топлива ТНВД, равная 29 градусам п.к.в. до в.м.т.

Рисунок 1.1 - Зависимость хода $h_{пл}$ и скорости $c_{пл}$ плунжера ТНВД дизеля 1-ПД4Д от угла ϕ поворота кулачкового вала при частоте вращения 375 мин^{-1}

Из рисунка видно, что при смещении точки начала нагнетания ТНВД начинает подавать топливо позднее, за это время кулачковый вал поворачивается на больший угол ϕ и впрыск топлива будет происходить на участке профиля

кулачка с существенно большей скоростью плунжера, что обеспечит лучшее качество распыла топлива форсункой и снизит общую продолжительность впрыска [20, 21].

Неравномерность цилиндрических мощностей дизельного двигателя на режиме холостого хода зависит от:

- герметичности цилиндро-поршневой группы и клапанного механизма каждого цилиндра;
- отличия углов опережения подачи топлива по цилиндрам дизеля;
- неравномерности подачи топлива по цилиндрам, которая зависит от технического состояния топливной аппаратуры.

Несмотря на то, что при работе на холостом ходу дизель работает как двигатель без газотурбинного наддува и вследствие уменьшения порции подаваемого форсункой топлива коэффициент избытка воздуха $\alpha = 8,94$ [22]. По этой причине техническое состояние агрегатов воздухообеспечения не оказывают заметного влияния на процесс сгорания топлива на режиме холостого хода.

1.3 Расхождение индикаторных мощностей по цилиндрам дизельного двигателя на режиме холостого хода

Полная мощность, развиваемая в рабочих цилиндрах в результате давления рабочего тела, действующего на поршень, называется индикаторной [23]. При постоянной нагрузке на дизель (тормозной компрессор и вентилятор охлаждающего устройства не работают) дизель работает с постоянной эффективной мощностью. При этом мощность, затрачиваемая на трение в узлах движения и насосные потери, может быть принята постоянной. Из уравнения баланса мощности на валу дизеля видно, что и индикаторная мощность в этом случае также будет неизменна:

$$P_e = P_i - P_m = \text{const}, \quad (1)$$

где P_e , P_i , P_m - мощность дизеля эффективная, индикаторная, трения соответственно.

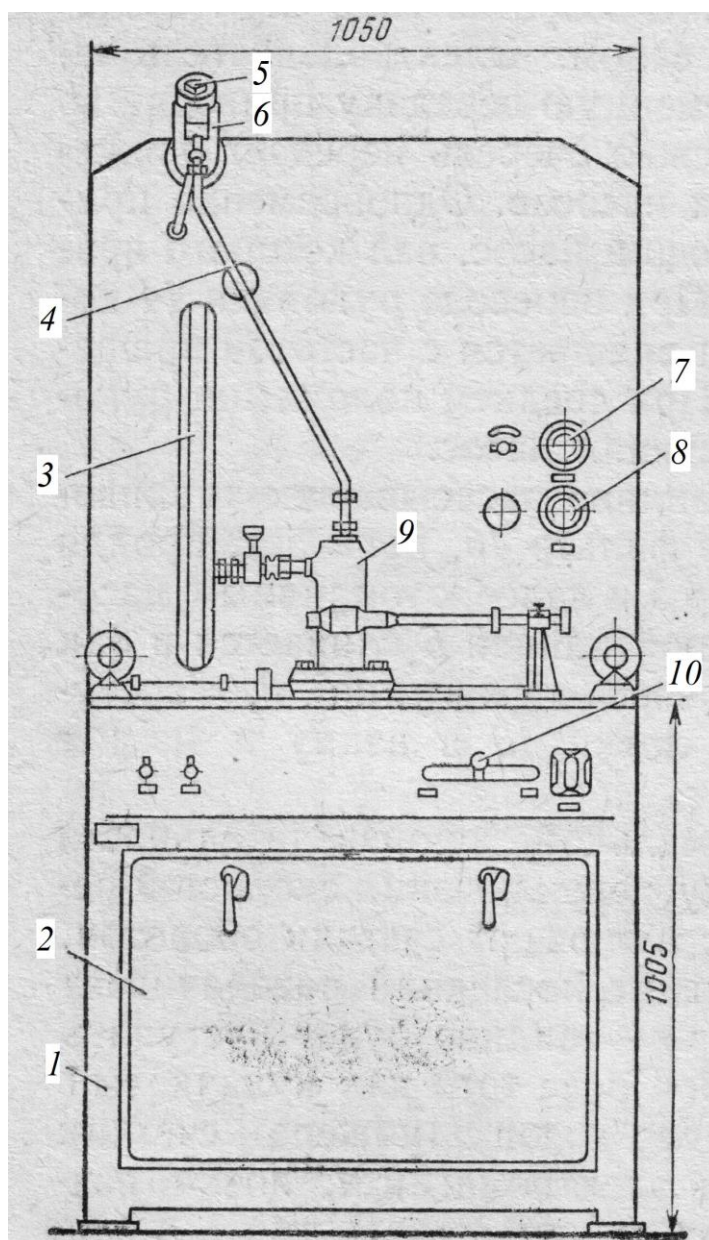
Величина мощности трения складывается из потерь на трение поршня и подшипников (65 %), насосных потерь (15 %) и затрат мощности на привод вспомогательных агрегатов дизеля (водяные, топливные и масляные насосы и др.) Так мощность трения дизеля Д50 на режиме холостого хода при $n = 270 \text{ мин}^{-1}$, составляет 26 кВт [24, 25].

Индикаторная мощность дизеля складывается из индикаторных мощностей всех его цилиндров. Индикаторная мощность цилиндра прежде всего зависит от количества поданного за рабочий цикл топлива и индикаторного коэффициента полезного действия (КПД), который в свою очередь зависит от того как преобразуется топливо в полезную работу. Для упрощения примем равенство индикаторных КПД во всех цилиндрах. Если, например, цикловая подача топлива в один цилиндр по какой-либо причине уменьшится, то снизится величина его индикаторной мощности. При этом снизится общее значение индикаторной и эффективной мощностей дизеля, а также крутящего момента, который станет меньше момента сопротивления. Частота вращения вала дизеля станет ниже заданного значения для режима холостого хода и регулятор числа оборотов увеличит цикловую подачу топлива во все цилиндры, что вызовет рост величин их мощностей, и, через некоторое время, определяемое степенью чувствительности регулятора, частота вращения коленчатого вала достигнет заданного значения, а величины крутящего момента и момента сопротивления полностью уравновесятся. Абсолютная разница индикаторных мощностей по цилиндрам дизеля при этом увеличится. По мере уменьшения цикловой подачи топлива в цилиндр описанный выше процесс будет повторяться и разница индикаторных мощностей по цилиндрам дизеля будет возрастать.

1.4 Технологические причины и их влияние на равномерность подачи топлива по цилиндрам дизельного двигателя

Определение количества поданного за цикл топлива комплектом ТНВД-трубка высокого давления-форсунка производится на специальных стендах,

которые предназначены для воспроизведения заданных режимов работы топливной аппаратуры на дизеле (рисунок 1.2).



1 – стол; 2 – смотровой люк; 3 – мерная мензурка; 4 – трубка высокого давления;
5 – форсунка; 6 – пеногаситель; 7 – термометр; 8 – манометр; 9 – ТНВД;
10 – рукоятка переключения скоростей вращения кулачкового вала ТНВД
Рисунок 1.2 – Стенд для обкатки и регулировки ТНВД дизеля ПД1М

Обкатка комплекта топливной аппаратуры производится на двух режимах - холостой ход и номинальный. Режимы обкатки задаются путем назначения требуемой величины частоты вращения кулачкового вала стенда и выхода рейки ТНВД (при механическом управлении подачей топлива) или продолжительности подачи электрического сигнала на соленоид быстродействующего электромагнитного клапана (при электронном управлении подачей топлива).

Цикловая подача топлива $q_{ц}$ определяется в граммах или кубических сантиметрах весовым или объёмным способами соответственно. При весовом способе топливо через форсунку поступает в мерный бачок, расположенный на весах, а при объёмном – в мерные мензурки. Замер подачи топлива ТНВД четырехтактного дизеля осуществляется за 400 ходов плунжера, а двухтактного – за 800 ходов.

При весовом способе замера подача топлива за цикл определяется из выражения [26]:

$$q_{ц} = \frac{G}{\Delta}, \quad (2)$$

где G – вес поданного в мерный бачок топлива за время замера, г.; Δ - число ходов плунжера ТНВД за время замера.

При объёмном методе цикловая подача топлива $q_{ц}$ определяется по формуле:

$$q_{ц} = \frac{V}{\Delta}, \quad (3)$$

где V – объём поданного в мерную мензурку топлива за время замера, см³.

В случае одновременного испытания на стенде нескольких ТНВД неравномерность их подачи топлива, измеряемая в %, вычисляется по формуле [27]:

$$\delta = \left(\frac{2 \cdot (q_{ц \max} - q_{ц \min})}{q_{ц \max} + q_{ц \min}} \right) \cdot 100 \% , \quad (4)$$

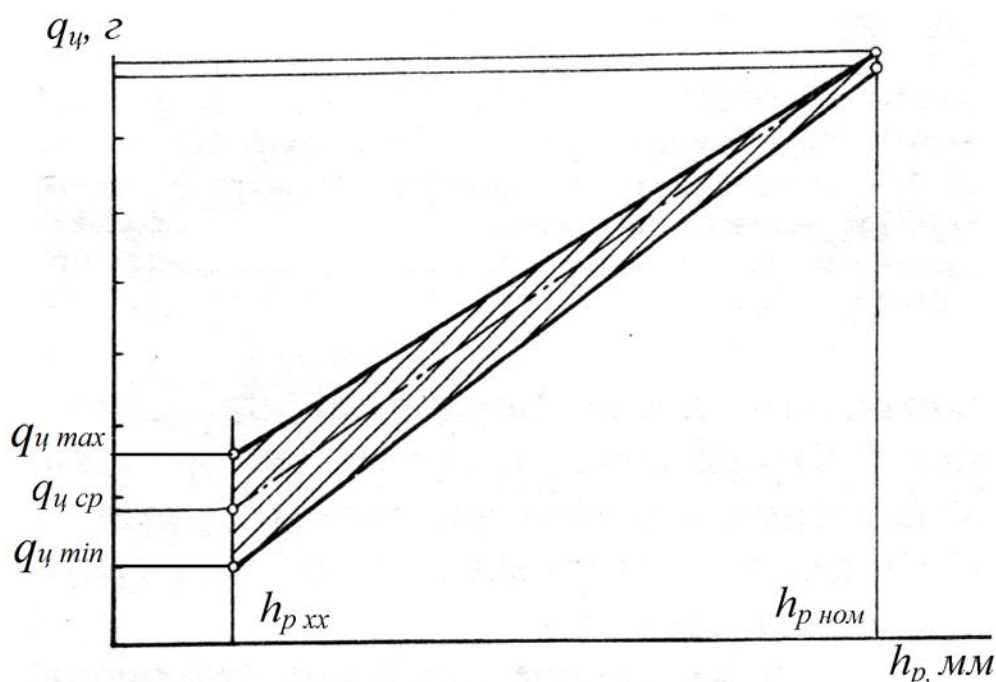
где $q_{ц \max}$ - максимальная величина цикловой подачи топлива одной секцией ТНВД, см³ или г.; $q_{ц \min}$ - минимальная величина цикловой подачи топлива одной секцией ТНВД, см³ или г.

Допускаемая неравномерность цикловой подачи топлива отдельными ТНВД четырехтактного дизеля ПД1М при обкатке на стенде указана в таблице 1.1 и регламентируется действующей технологической инструкцией ТИ-711 [28]. Требуемая неравномерность подачи топлива достигается регулировкой подачи топлива нужным ТНВД в сторону увеличения или уменьшения путем изменения выхода регулировочной рейки (при механическом управлении подачей топлива)

или изменения продолжительности подачи электрического сигнала на соленоид быстродействующего электромагнитного клапана (при электронном управлении подачей топлива). ТНВД с механическим управлением регулируют на равномерность подачи топлива на номинальном режиме, в результате чего их характеристики могут быть условно показаны в виде двух отрезков, исходящих от точки номинального режима (рисунок 1.3).

Таблица 1.1 – Режимы обкатки ТНВД с механическим управлением на стенде

№ п/п	Режим обкатки ТНВД	Частота вращения кулачкового вала, мин ⁻¹	Выход рейки, мм	Допустимая неравномерность подачи топлива ТНВД, не более, %
1	Номинальный	370±5	19	1,35
2	Холостого хода	135±5	11	15,3



$h_{p\text{ хх}}$ – выход рейки ТНВД, соответствующий работе дизеля на холостом ходу;
 $h_{p\text{ ном}}$ – выход рейки ТНВД, соответствующий работе дизеля на номинальном режиме; $q_{ц\text{ ср}}$ – средняя величина подачи топлива ТНВД на режиме холостого хода

Рисунок 1.3 - Характеристика изменения цикловых подач топлива при регулировке ТНВД на номинальном режиме

При этом для режима холостого хода неравномерность цикловой подачи топлива, представленная в виде заштрихованной площади, составляет 20-60 % от

средней величины и зависит от технологических допусков, которые не поддаются устранению.

Цикловая подача топлива зависит от действительных значений размеров ряда деталей, определяющих кинематические и гидравлические параметры системы впрыска топлива: диаметр плунжера, активный ход плунжера, ход плунжера от геометрического начала нагнетания, зазор между прецизионными деталями, длина, объем надплунжерного пространства, объем и диаметр нагнетательного клапана, площадь поперечного сечения сопловых отверстий распылителя форсунки и их коэффициент истечения, подъем иглы распылителя форсунки, давление начала подъёма иглы форсунки [29].

О степени влияния отклонения размеров отдельных деталей топливной аппаратуры на цикловую подачу топлива можно судить по следующим данным. Отклонения, связанные с допуском на внутренний диаметр трубок высокого давления дизеля 10Д100, равный $\pm 0,3$ мм вызывают изменение объема трубопровода на величину ± 20 % и неравномерность подачи топлива на режиме холостого хода в 9 % [30]. Стендовые испытания трех ТНВД дизеля 2Д100, изготовленных с наибольшими отклонениями, допускаемыми по техническим условиям, показали, что неравномерность подачи топлива на режиме холостого хода при равных выходах реек составляет 40 % [29].

Различие деталей форсунок оказывает существенное влияние на цикловую подачу топлива. Так, в результате установки форсунок с равными гидравлическими характеристиками сопловых наконечниками распылителей, цикловая подача топлива секцией ТНВД дизеля 11Д45 снизилась на 24 % [30].

Суммарная же неравномерность подач топлива топливной аппаратурой на режиме холостого хода, вызванная отклонением подач топлива ТНВД, различием гидравлических характеристик форсунок и трубок высокого давления может достигать 66 % для дизеля 1-ПД4Д, 90-100 % для дизеля 11Д45, и до 140-200 % для дизеля 10Д100 [29, 31, 32].

1.5 Влияние изменения технического состояния топливной аппаратуры на равномерность подачи топлива по цилиндрам дизельного двигателя

Изменение цикловой подачи топлива в цилиндр дизеля при заданном положении рейки ТНВД возможно вследствие изменения технического состояния узлов топливной аппаратуры в эксплуатации (таблица 1.2).

Таблица 1.2 – Влияние изменения технического состояния элементов топливной аппаратуры на величину цикловой подачи топлива

№ п/п	Наименование элемента	Характер изменения технического состояния	Изменение цикловой подачи топлива, %	Данные для топливной аппаратуры дизеля
1	Форсунка	Ослабление давления начала подъёма иглы с 34 до 29 МПа	↑ на 18	Д49 [33]
2		Увеличение высоты подъёма иглы из-за износа уплотнительного конуса иглы и корпуса распылителя с 0,40 до 0,65 мм.	↑ на 1,8	В2-300 [34]
3		Увеличение проходного сечения распыливающих отверстий распылителя с 0,4 до 0,7 мм ²	↑ на 2,3	В2-300 [34]
4		Уменьшение диаметра сопловых отверстий с 0,62 до 0,5 мм. (Закупорка сопловых отверстий распылителя)	↓ на 6,3	Д100 [35]
5		Увеличение диаметрального зазора между иглой и корпусом распылителя с 2 до 6 мкм	↓ на 1	В2-300 [34]
6	Топливный насос высокого давления	Увеличение диаметрального зазора между плунжером и гильзой с 2 до 8 мкм	↓ на 30	Д50 [29]
7		Увеличение люфта рейки привода ТНВД на 1,5 мм	↓↑ на 31	Д100 [32]
8		Отклонение от заданного геометрического начала подачи топлива в пределах ±0,3 мм в результате износа кулачка или замены регулировочных прокладок между опорным фланцем насоса и толкателем	↓↑ на 12-15	Д100 [32]

Примечание: ↑ - увеличение цикловой подачи топлива, ↓ - уменьшение цикловой подачи топлива, ↓↑ - изменение цикловой подачи топлива возможно как в сторону увеличения, так и в сторону уменьшения.

Представленные в таблицы данные показывают насколько изменяется цикловая подача топлива относительно исходного значения при изменении

технического состояния элементов топливной аппаратуры дизеля в условиях эксплуатации.

1.6 Мероприятия по снижению неравномерности подачи топлива на холостом ходу

В настоящее время в технологических процессах ремонта топливной аппаратуры снижение неравномерности подачи топлива по цилиндрам дизеля на режиме холостого хода достигается за счет следующих мероприятий:

- разбивки ТНВД на группы по подаче топлива, и постановке на дизель ТНВД только одной группы;
- постановки на дизель форсунок с распылителями, имеющими близкие гидравлические характеристики;
- установки на дизель трубок высокого давления с минимальными отклонениями по гидравлическому сопротивлению;
- установки на ТНВД механизма двойного регулирования выхода рейки.

Наличие трех групп ТНВД дизелей типа ПД1М по результатам обкатки на стенде позволило снизить неравномерность подачи топлива на холостом ходу на 10-15 %. ТНВД дизелей типа ПД1М при обкатке на стенде разбивают на три группы по минимальной подаче. Для постановки на дизель комплектуют насосы только одной группы [28]. По данным исследований [30] в результате установки на дизель 10Д100 насосов одной группы, неравномерность топливоподачи на режиме холостого хода снижается в 2-3 раза.

Степень износа отверстий распылителя или соплового наконечника определяют по его гидравлической характеристике. Для проверки гидравлических характеристик распылителей форсунок производится пролив их дизельным топливом при постоянном давлении на специальном стенде А2130. Гидравлические характеристики распылителей определяются путем измерения времени заполнения измерительной емкости постоянного объема дизельным

топливом, протекающим через контрольную форсунку под давлением 2,0 МПа. Разница во времени истечения топлива между двумя любыми распылителями комплекта форсунок, идущих на один дизель должна быть не более одной секунды [29].

Трубки высокого давления, устанавливаемые на один дизель, должны иметь минимальные отличия по гидравлическому сопротивлению (пропускной способности). Оценка пропускной способности производится по количеству топлива, пропускаемого трубкой в единицу времени. Расхождение по пропускной способности трубок высокого давления, подлежащих установке на один дизель, не должно превышать 400 г [29].

Особенности конструкции привода реек ТНВД механической системы топливоподачи не позволяют проводить отдельную регулировку цикловой подачи топлива на двух разных режимах работы дизеля. Индивидуальная регулировка цикловой подачи топлива на номинальном режиме работы дизеля с целью обеспечения требуемой разницы температур выпускных газов по цилиндрам осуществляется путем изменения выхода реек отдельными ТНВД. При регулировании подачи топлива подобным образом на режиме холостого хода, то ранее выполненная регулировка на номинальном режиме нарушается.

Механизм двойного регулирования выхода рейки ТНВД позволяет осуществлять отдельную регулировку цикловой подачи топлива на обоих режимах мощности, что обеспечивает уменьшение неравномерности подачи топлива на 4 %. Опытные конструкции механизмов двойной регулировки ТНВД штатной механической системы подачи топлива устанавливались в разное время на дизелях Д50, Д70 и 10Д100М [29, 30, 32].

1.7 Улучшение работы тепловозного дизельного двигателя на режиме холостого хода за счет применения электронных систем управления подачей топлива

1.7.1 Принцип действия и функциональные возможности электронных систем управления подачей топлива

С целью обеспечения гибкого регулирования угла опережения и количества поданного топлива использована система подачи топлива с электронным управлением. При этом вместо регулятора частоты вращения вала дизеля, управляющего реечным механизмом регулирования подачи топлива, устанавливается ТНВД с гладким плунжером и регулирующим электромагнитным клапаном (система с индивидуальными ТНВД или насос-форсунками). В случае установки электромагнитного клапана в форсунке система именуется Common Rail.

При электронном управлении подачей топлива электрические сигналы от датчиков частоты вращения коленчатого и распределительного валов, нагрузки и др. подаются на блок управления (БУ), в задачи которого входит выполнение следующих функций [36, 37] (рисунок 1.4):

- электронного регулятора частоты вращения и мощности, поддерживающего скоростной и нагрузочные режимы;
- управления подачей топлива в соответствии с заданным режимом (фазы – количество впрыскиваемого топлива и задание закона подачи);
- фиксирования и мониторинга основных параметров работы дизельного двигателя и обслуживающих его систем;
- аварийно-предупредительной сигнализации при выходе параметров за допустимые границы (уставку) и сбрасывании оборотов или останов дизельного двигателя при существенном превышении уставки;
- фиксирования в памяти процессора БУ всех нарушений в работе двигателя и выдачи их на экран, в том числе при подключении к БУ персонального

компьютера с установленной специальной программой для регулировки дизельного двигателя с ЭСУВТ.01.

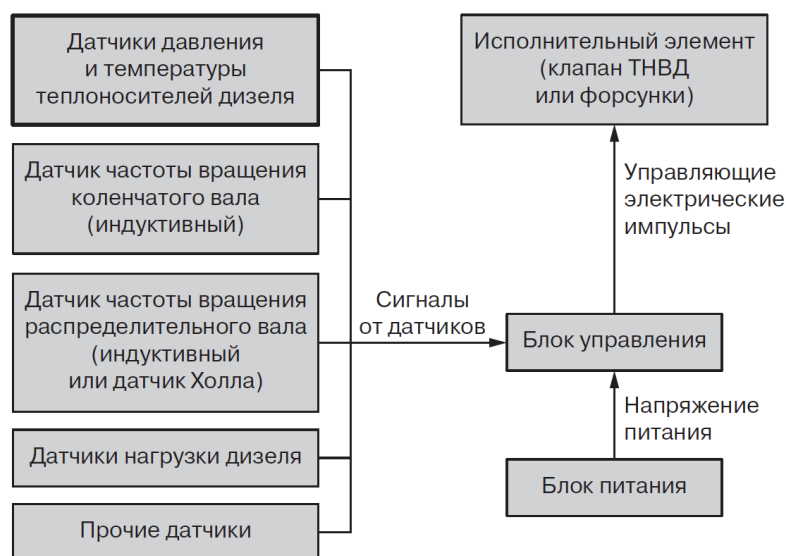


Рисунок 1.4 - Структурная схема электронной системы управления подачей топлива

Микропроцессор, установленный в БУ, на основе данных, полученных от преобразователей и в соответствии с заложенной в него программой, посылает электрические сигналы соленоидам электромагнитных клапанов ТНВД или форсунок. Во время всасывающего хода плунжера сигнал на соленоид не подается, быстродействующий электромагнитный клапан находится в открытом положении и топливо из магистрали низкого давления поступает в надплунжерную полость. Во время нагнетательного хода плунжера на соленоид подается электрический сигнал, клапан перекрывает подачу топлива, герметизируя плунжерную пару. После превышения давления открытия иглы происходит впрыск топлива через форсунку в камеру сгорания. После прекращения поступления сигнала клапан открывается, топливо стравливается в сливную магистраль, давление его падает, игла форсунки закрывается, впрыск топлива прекращается. Продолжительность положения клапана в закрытом состоянии определяет количество подаваемого форсункой топлива. Момент закрытия клапана определяет угол опережения подачи топлива в цилиндр дизеля.

Системы электронного управления подачей топлива тепловозных дизелей имеют общие признаки:

- принцип электронного управления топливоподачей одинаков для всех систем впрыска;
- элементы электронной системы управления подачей топлива - первичные датчики, БУ и исполнительные элементы подобны по конструкции и имеются в каждой системе электронного впрыска топлива;
- различия состоят в конструктивном исполнении электроуправляемыми топливными насосами высокого давления (ЭТНВД), его привода и типе форсунки [18].

В настоящее время на дизелях магистральных и маневровых тепловозов эксплуатируемого парка ОАО «РЖД» устанавливаются электронные системы следующих типов:

- безаккумуляторная неразделенного вида;
- безаккумуляторная разделенного вида;
- аккумуляторная типа Common Rail.

Основные технические характеристики отечественных и зарубежных дизелей с электронными системами управления подачей топлива, установленных на тепловозах ОАО «РЖД», приведены в Приложении А.

1.7.2 Конструктивные особенности систем электронных систем управления подачей топлива

В безаккумуляторной системе разделенного вида на каждый цилиндр дизеля приходится по форсунке 2 с распылителем 1, трубопроводу высокого давления 3 и насосной секции с электромагнитным управляемым клапаном 4 [38]. Каждый плунжер 5 приводится от кулачка 6 распределительного вала дизельного двигателя (рисунок 1.5). Такое разделение элементов упрощает конструкцию и монтаж системы на дизельном двигателе, так как при этом конструкция форсунки остается неизменной.

Система ЭСУВТ.01 относится к безаккумуляторной электронной системе управления подачей топлива разделенного вида.

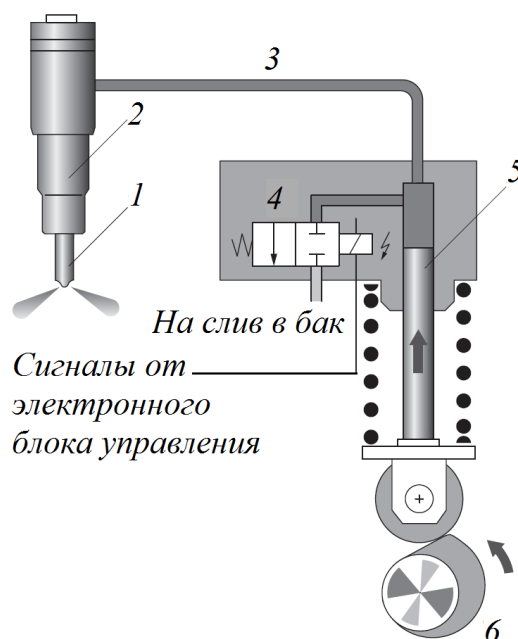


Рисунок 1.5 - Схема безаккумуляторной электронной системы управления подачей топлива разделенного вида

В безаккумуляторной системе неразделенного вида форсунка и ТНВД объединены в один агрегат 4 (рисунок 1.6). Насос-форсунка устанавливается на каждый цилиндр дизельного двигателя и приводится в действие от кулачка распределительного вала 1 непосредственно толкателем или через коромысло 7 [38]. Поскольку в насос-форсунке отсутствуют магистрали высокого давления, то объем сжимаемого топлива минимизирован, отсутствует подвпрыскивание топлива и могут быть достигнуты гораздо более высокие величины давления впрыскивания (до 220 МПа) [39], чем в системах с индивидуальными ТНВД.

Внутри корпуса насос-форсунки имеется цилиндрическая полость высокого давления 5. Быстродействующий электромагнитный клапан 3 монтируется в корпусе насос-форсунки. В приводе насос-форсунки, в отличие от привода механизма газораспределения отсутствуют тепловые зазоры, так как здесь с помощью возвратной пружины 6 осуществляется постоянный контакт между толкателем плунжера 2, коромыслом 7 и кулачком приводного вала 1.

В аккумуляторной системе впрыска Common Rail (рисунок 1.7) функции создания высокого давления и впрыска разделены. Давление впрыска создается и регулируется автономным ТНВД независимо от частоты вращения коленчатого

вала, а также величины цикловой подачи и поддерживается в топливном аккумуляторе высокого давления для последующего впрыска.

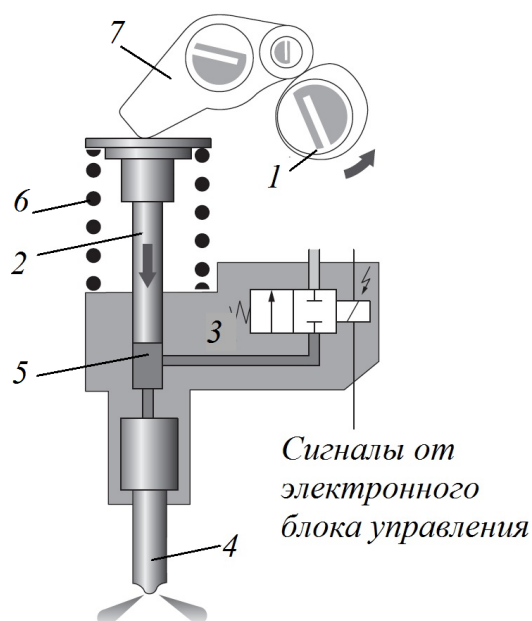


Рисунок 1.6 - Схема безаккумуляторной электронной системы управления подачей топлива неразделенного вида

По этой причине эта система предоставляет большие возможности для варьирования параметров подачи топлива, чем предыдущие, а также существенно улучшает впрыск топлива на режимах малых нагрузок и холостого хода [39].

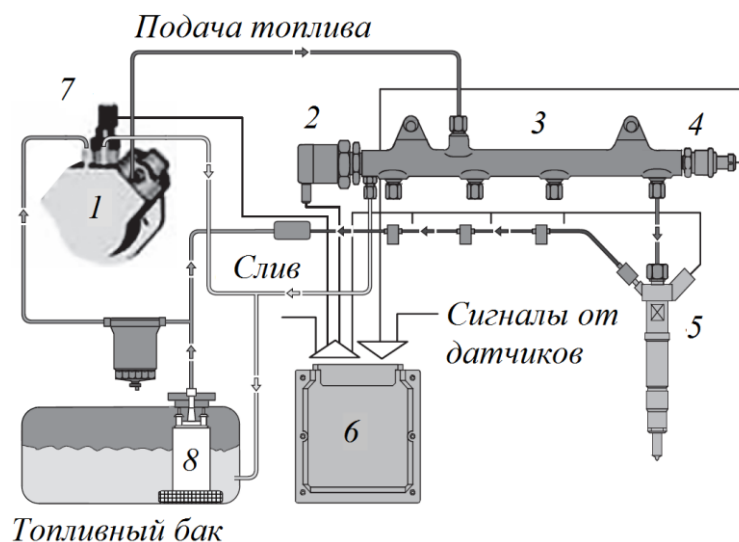


Рисунок 1.7 Схема аккумуляторной системы Common Rail

Топливоподкачивающий насос 8 нагнетает топливо в радиально-поршневой насос высокого давления 1, который с помощью эксцентрикового вала приводит в

движение три плунжера. Этот насос напрямую связан с распределительным валом и подает топливо при каждом обороте, что уменьшает его пульсацию. От ТНВД топливо под большим давлением поступает в общий для всех форсунок 5 аккумулятор высокого давления 3 – рампу, откуда под высоким давлением поступает на электроуправляемые форсунки 5, которые соединяются с аккумулятором посредством короткой магистрали высокого давления. Посредством установленного в аккумуляторе 3 клапана регулирования давления 2, который направляет избыточное топливо в бак через трубопроводы слива, задается требуемое давление в аккумуляторе в зависимости от нагрузки дизеля. Давление в аккумуляторе контролируется датчиком 4. В новых поколениях системы Common Rail, установленных на дизеле *Wartsila W6L20L* тепловоза ТЭМ18В, применяются ТНВД с дозирующим устройством 7, которое размещается в его корпусе и регулирует количество топлива, необходимое для поддержания системой Common Rail требуемого давления впрыска [40]. С помощью регулирования на стороне всасывания значительно снижается количество топлива, сжимаемого до высокого давления, а также потребляемая мощность ТНВД [39]. Работой дозирующего устройства и всей топливной системой управляет электронный блок управления дизельным двигателем 6.

1.7.3 Преимущества электронных систем управления подачей топлива

Повышение качества рабочего процесса и улучшение равномерности распределения цилиндрических мощностей дизеля на режиме холостого хода возможно благодаря следующим преимуществам систем электронного управления подачей топлива в сравнении с системами с механическим управлением:

- повышенное давление впрыска топлива форсункой;
- оптимальное регулирование угла опережения впрыска топлива в зависимости от частоты вращения вала дизеля, температуры воды, масла, и окружающего воздуха;

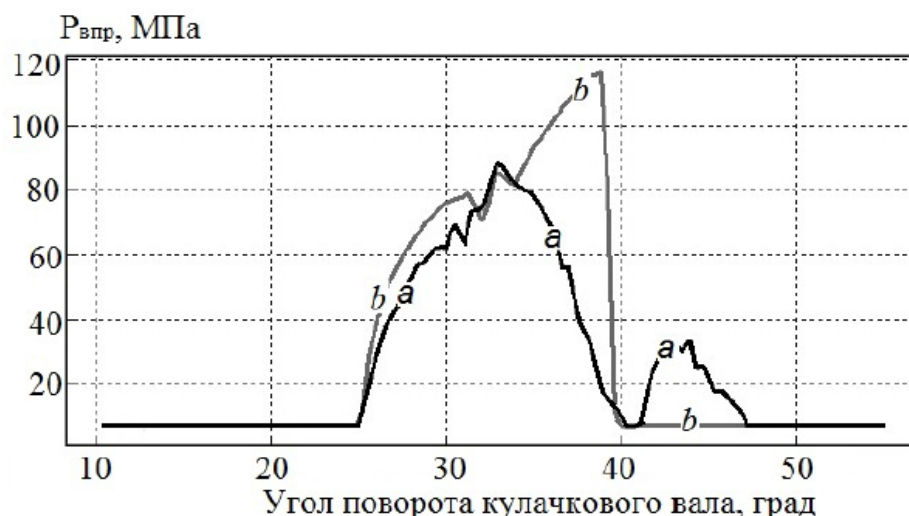
- минимизация неравномерности подачи топлива ЭТНВД на всех режимах работы дизеля;
- независимая регулировка подачи топлива по отдельным цилиндрам дизеля на номинальном режиме работы и на холостом ходу.

Задача повышения давления впрыска топлива решается за счет использования следующих технических решений:

- применения в конструкции ЭТНВД всех типов систем электронного управления подачей топлива плунжера без спиральной кромки и гильзы (моновтулки) без всасывающего и отсечного отверстий;
- применения систем электронного управления подачей топлива неразделенного вида с насос-форсунками;
- использования аккумуляторных систем Common Rail с топливным аккумулятором высокого давления, величина которого практически не зависит от оборотов коленчатого вала.

Характер изменения давления впрыскивания топлива а номинальном режиме работы дизеля при $n = 750 \text{ мин}^{-1}$ для штатной топливной системы дизеля 1-ПД4Д и системы ЭСУВТ.01 приведен на рисунке 1.8.

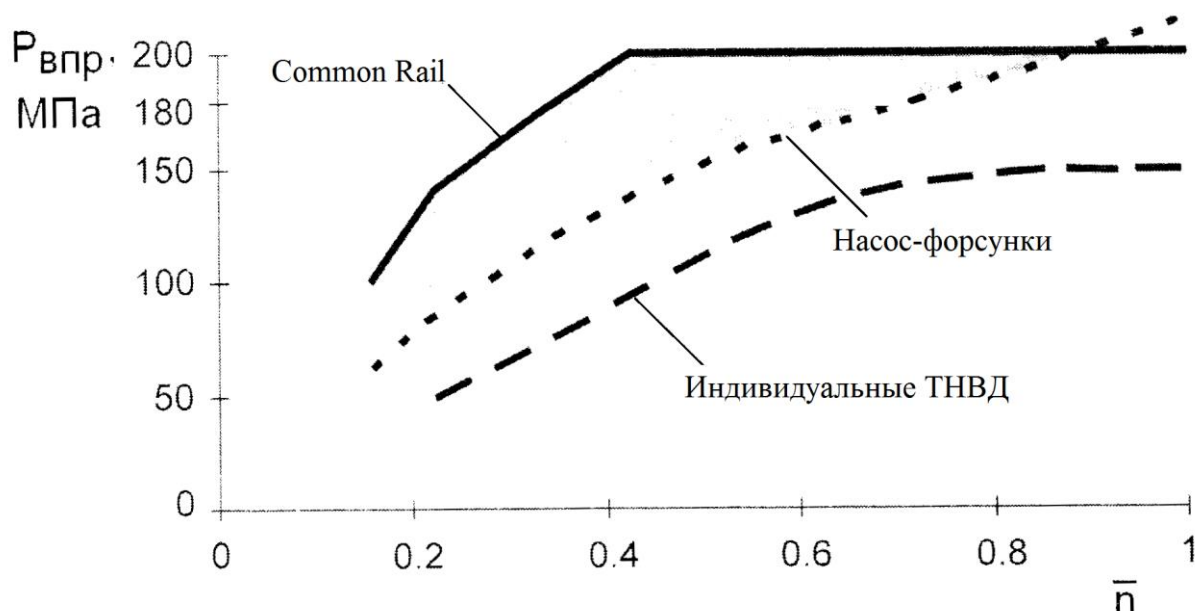
Данные свидетельствуют о высоком давлении впрыскивания - 117 МПа у дизельного двигателя с ЭСУВТ.01 против 93 МПа у дизельного двигателя со штатной топливной системой с механическим управлением [41].



а – штатная система топливоподачи дизеля 1-ПД4Д; б – система ЭСУВТ.01

Рисунок 1.8 - Характеристика давления впрыскивания топлива по углу поворота кулачкового вала ТНВД

Из анализа рисунка 1.9 видно, что наибольшая величина давления впрыска топлива форсункой достигается при использовании системы неразделенного вида. Величина максимального давления впрыска топлива в системах разделенного и неразделенного вида установлена с запасом. Это связано с необходимостью сохранения высокого давления впрыска топлива на малых оборотах холостого хода, поскольку привод остался механическим от коленчатого вала дизеля и давление впрыска топлива снижается по мере уменьшения оборотов [42]. На режимах малых нагрузок преимущество в давлении впрыска у системы *Common Rail*, у которой давление впрыска топлива в меньшей степени зависит от оборотов коленчатого вала дизеля.



$\bar{n}$ - отношение текущей частоты вращения вала дизеля к номинальной

Рисунок 1.9 - Максимальное давление впрыска топлива форсункой при работе дизеля по тепловозной характеристике, обеспечиваемое различными системами электронного управления подачей топлива

Стабильность поддержания давления впрыска во времени в значительной степени определяется конструктивным исполнением плунжерной пары. Стандартный плунжер ТНВД с механическим управлением топливоподачей дизеля 1-ПД4Д, изображенный в нижней части рисунка 1.10, имеет короткую рабочую часть 1, так как на некотором расстоянии от верхнего торца расположена отсечная кромка 2, поворотом которой относительного отсечного окна гильзы регулируется количество поданного топлива в цилиндр дизеля. Плунжер ЭТНВД

дизеля 1-ПД4Д с ЭСУВТ.01, изображенный в верхней части рисунка рисунок 1.10, имеет длинную рабочую часть 3 без отсечных кромок, а гильза (моновтулка) лишена всасывающего и отсечного отверстий. Такая плунжерная пара обладает повышенной плотностью за счет увеличения длины утечки для топлива, просочившегося в зазор между плунжером и гильзой в 3,7 раза. Радиальный износ данной плунжерной пары гораздо меньше сказывается на подаче топлива насосом. Средний срок службы такой плунжерной пары в среднем в 1,5-1,76 раза больше, чем у ТНВД с механическим управлением [43].

Для улучшения процесса сгорания топлива в цилиндрах дизеля на режиме холостого хода в системе ЭСУВТ.01 угол опережения подачи топлива уменьшается по мере снижения частоты вращения вала дизеля и увеличивает угол опережения подачи топлива по мере снижения температуры охлаждающей жидкости или масла. (рисунок 1.11).



1 - рабочая часть плунжера ЭТНВД; 2 – отсечная кромка; 3 – рабочая часть плунжера ТНВД с механическим управлением топливоподачей

Рисунок 1.10 - Общий вид плунжеров ЭТНВД системы ЭСУВТ.01 и ТНВД дизеля 1-ПД4Д с механическим управлением топливоподачей

Длительность поступления электрического сигнала на соленоид электромагнитного клапана ЭТНВД определяет цикловую подачу топлива в цилиндр дизеля. Поэтому важно, чтобы при одной и той же продолжительности управляющего сигнала каждый отдельно взятый ЭТНВД подавал равное количество топлива. Для определения цикловой подачи топлива проводятся стендовые испытания ЭТНВД, аналогичные испытаниям ТНВД с механическим

управлением (см. п. 1.4) с той лишь разницей, что количество поданного топлива регулируется изменением длительности подачи сигнала на соленоид электромагнитного клапана насоса.

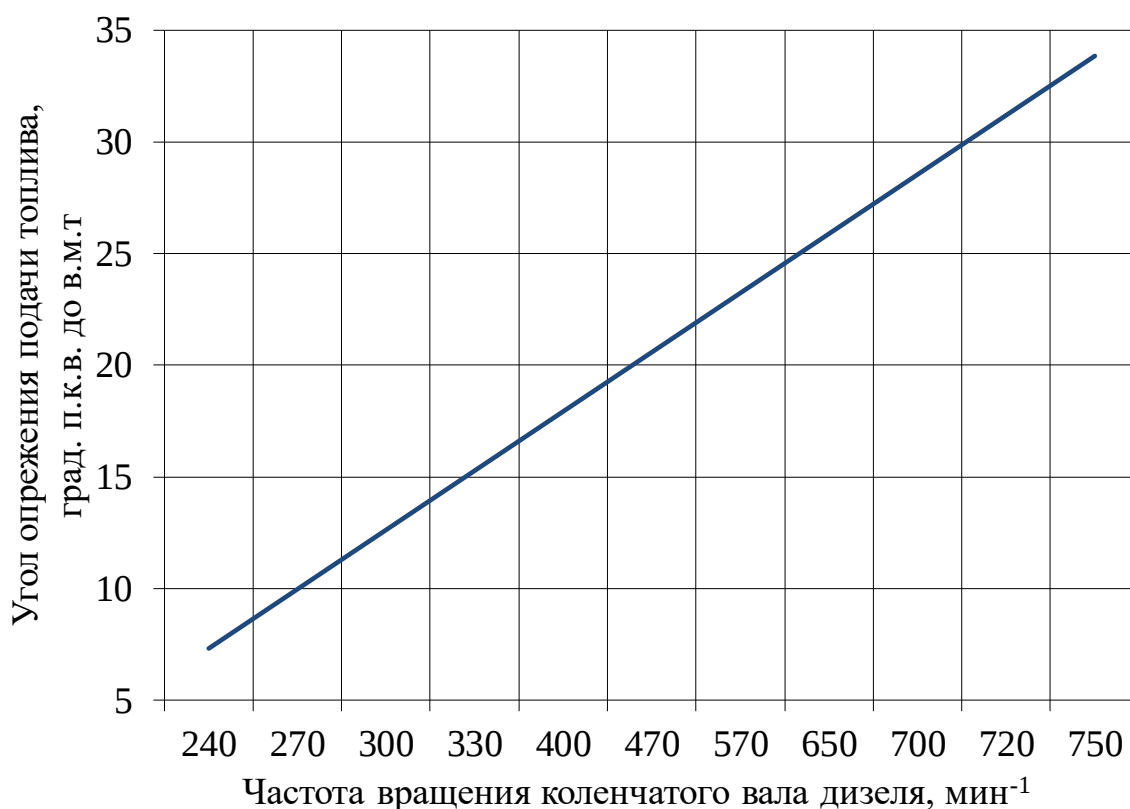


Рисунок 1.11 - Зависимость угла опережения подачи топлива от частоты вращения вала дизеля 1-ПД4Д с ЭСУВТ.01

Различия в цикловой подаче топлива ЭТНВД могут иметь существенный разброс. Стендовые испытания партии из шестидесяти ЭТНВД типа 4ЭТН.07.00.000 производства ООО «ППП Дизельавтоматика», установленных в составе системы ЭСУВТ.02 на дизели K6S310DR маневровых тепловозов ЧМЭЗ, показали, что неравномерность цикловой подачи топлива на режиме холостого хода составляет от 3,3 до 13,3 %, а на номинальном режиме от 0,7 до 2,2 %.

Устранение неравномерности подачи топлива ЭТНВД осуществляется в процессе изготовления на заключительной стадии проверки определяются рабочие характеристики каждого ЭТНВД и по полученным данным вычисляется поправка к параметрам работы испытанного ЭТНВД, представляющая собой численное значение величины отличия начала подачи и количества поданного

топлива от эталонного [44]. При получении блоком управления (БУ) данной информации он изменяет момент начала и продолжительность подачи управляющего сигнала на соленоид быстродействующего электромагнитного клапана, в результате чего характеристики цикловой подачи топлива отдельными ЭТНВД приводятся к среднему значению, что сводит к минимуму неравномерность цикловой подачи топлива [42]. Численное значение поправки зашифровывается на заводе-изготовителе в виде кода, цифры которого заносятся в БУ с помощью сервисной программы при установке или замене ЭТНВД.

Система ЭСУВТ.01, установленная на дизеле 1-ПД4Д, позволяет отдельно регулировать подачу топлива по цилиндрам в процентах от фактического значения в пределах ± 20 % и угол опережения подачи топлива пределах ± 15 градусов п.к.в. до в.м.т. на режиме холостого хода и номинальном [45]. Поправки к подаче топлива по отдельным ТНВД, сделанные оператором в процессе регулировки, сохраняются в памяти БУ ЭСУВТ.01.

Выравнивание нагрузок по цилиндрам в эксплуатации на дизельном двигателе 1-ПД4Д с ЭСУВТ.01 является достаточно трудоемкой задачей в силу взаимного влияния каждого из элементов топливной аппаратуры (ЭТНВД, трубка высокого давления, форсунка) на подачу топлива. Поэтому разработка методов снижения неравномерности распределения нагрузок по цилиндрам дизеля с ЭСУВТ.01 является актуальной задачей.

1.8 Выводы по разделу 1

1 Работа дизельного двигателя тепловоза в эксплуатации характеризуется широким диапазоном изменения частоты вращения коленчатого вала и нагрузки. Время работы дизеля тепловоза на режиме холостого хода составляет до 90 % от общего времени.

2 Исследованиями установлено, что неравномерность распределения цилиндрических мощностей связана с различием цикловых подач топлива. Разница подач топлива является следствием различия технического состояния и

характеристик топливных насосов высокого давления, форсунок и трубок высокого давления.

3 Работа дизельного двигателя на режиме холостого хода с большой разницей цилиндровых мощностей сопровождается повышенной вибрацией и вызывает риск отказа отдельных цилиндров.

4 Известные в настоящее время профилактические мероприятия по снижению неравномерности подачи топлива в цилиндры дизеля, трудноосуществимы в условиях сервисного локомотивного депо и не применяется.

5 Использование систем электронного управления подачей топлива позволяет улучшить рабочий процесс дизельного двигателя на режиме холостого хода, уменьшить отклонения в протекании характеристик электроуправляемых топливных насосов высокого давления и отказаться от разделения их на группы по производительности.

6 Разработка методов стабилизации цилиндровых мощностей дизельного двигателя представляет собой исследовательскую задачу и требует проведения комплексных экспериментальных исследований работы цилиндров дизельного двигателя 1-ПД4Д с электронной системой подачи топлива.

2 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ РАБОТЫ ДИЗЕЛЬНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ С ЭЛЕКТРОННОЙ СИСТЕМОЙ УПРАВЛЕНИЯ ПОДАЧЕЙ ТОПЛИВА НА РЕЖИМЕ ХОЛОСТОГО ХОДА

2.1 Методика исследований

Задачами экспериментальных исследований являлись:

- определение различия цилиндровых мощностей дизельных двигателей 1-ПД4Д с ЭСУВТ.01 на режиме холостого хода;
- оценка величин индикаторной мощности каждого цилиндра дизеля с помощью приращения средней продолжительности подачи топлива при отключении цилиндра.

Объектами исследований являлись дизельные двигатели 1-ПД4Д с ЭСУВТ.01 тепловозов ТЭМ18ДМ №№ 880-883 и 1022 производства АО «УК «БМЗ» приписки эксплуатационного локомотивного депо Бологовское Октябрьской Дирекции тяги – филиала ОАО «РЖД». Информация о дизельных двигателях, установленных на тепловозах, приведена в таблице 2.1. Испытания проводились на территории сервисного локомотивного депо Тверь ООО «ЛокоТех-Сервис» филиала Северо-Западный.

Таблица 2.1 - Информация о дизелях, установленных на тепловозах

№ п/п	Тепловоз ТЭМ18ДМ		Дизельный двигатель 1-ПД4Д		Система ЭСУВТ.01 модификации 01-06-02	
	Номер	Год выпуска	Заводской номер	Год выпуска	Заводской номер	Год выпуска
1	880	2015	1199	2015	153	2014
2	881	2015	1200	2015	154	2014
3	882	2015	1201	2015	160	2015
4	883	2015	1203	2015	158	2014
6	1022	2016	1393	2016	336	2016

Испытания по определению различия цилиндровых мощностей дизелей на режиме холостого хода проводились в четыре этапа:

1-й этап – запуск и прогрев дизеля до достижения температуры масла плюс 50 °С с последующим автоматическим переходом дизельного двигателя на пониженную частоту вращения коленчатого вала, равную 270 мин⁻¹;

2-й этап – обнуление поправок к углу опережения и цикловой подаче топлива по цилиндрам при их наличии. В процессе эксплуатации дизельного двигателя в интервалах времени между работами по стабилизации цилиндрических мощностей возможны случаи замены форсунок, трубок высокого давления и ЭТНВД. В результате чего сделанные ранее поправки к подаче топлива уже не приводят к выравниванию нагрузок по цилиндрам.

3-й этап – снятие индикаторных диаграмм и замер основных параметров рабочего процесса в цилиндрах дизельного двигателя;

4-й этап – последовательное отключение подачи топлива по цилиндрам в порядке их нумерации на дизельном двигателе и замер приращения средней величины продолжительности подачи топлива.

Все измерения осуществлялись после стабилизации температур воды, масла и выпускных газов на выходе из цилиндров. Во время испытаний тормозной компрессор и вентилятор охлаждающего устройства были отключены, а температура воды и масла дизеля поддерживалась только за счет открытия и закрытия жалюзи охлаждающего устройства. Таким образом, обеспечивалось постоянство нагрузки на дизель.

Во время испытаний применялись контрольно-измерительные приборы, по точности, обеспечивающие погрешности измерения, приведенные в таблице 2.2.

Индикаторные диаграммы рабочего процесса в цилиндрах дизеля снимались посредством комплекса интеллектуального производственного автоматизированных реостатных испытаний (КИПАРИС-ХР) производства ОАО «НИИТКД», г. Омск [38]. Основные параметры работы дизеля оценивались по данным приборов пульта управления тепловозом. Параметры работы системы ЭСУВТ.01 фиксировались с помощью персонального компьютера с установленной сервисной программой Inject Service, подключенного к блоку управления ЭСУВТ.01. Кроме того, посредством программы Inject Service

производилось управление работой цилиндров (включение/отключение, изменение количества поданного топлива) и оценка приращения продолжительности топливоподачи при отключении цилиндра. Для измерения температуры газов на выпуске из цилиндров все дизельные двигатели были оборудованы хромель-алюмелевыми термопарами, установленными в выхлопных коллекторах.

Таблица 2.2 - Измеряемые и определяемые параметры, погрешность их измерения

№ п/п	Наименование параметра	Обозначение	Средство измерения	Погрешность измерения
1	Частота вращения коленчатого вала дизеля	n	преобразователь ЭРУС 408113.006.00-041	$\pm 1 \text{ мин}^{-1}$
2	Температура выпускных газов	T_g	термопара ТХА-0193-01КСФ	$\pm 2,5 \text{ }^{\circ}\text{C}$
3	Давление газов в цилиндре дизеля	P	датчик давления МИДА-ДИ-55П	$\pm 1 \%$
4	Угол начала горения топлива	φ_c	комплекс автоматизированный реостатных испытаний (КИПАРИС-ХР)	$\pm 1 \text{ град. п.к.в.}$
5	Угол максимального давления сгорания топлива	φ_z		$\pm 1 \text{ град. п.к.в.}$
6	Жесткость процесса сгорания топлива	$\Delta P/\Delta \varphi$		-
7	Индикаторная мощность	$P_{i \text{ cil}}$		$\pm 4 \%$
8	Приращение продолжительности топливоподачи по остальным цилиндрам дизеля при отключении данного цилиндра	$\Delta \varphi_{ti}$	-	-

Индикаторная мощность цилиндра вычислялась комплексом КИПАРИС-ХР по результатам обработки индикаторных диаграмм. Погрешность измерения индикаторной мощности оценивалась путем сравнения средней величины измеренной индикаторной мощности пяти дизелей тепловозов с расчетной величиной индикаторной мощности дизеля.

Расчет индикаторной мощности дизеля выполнялся по формуле:

$$P_{ip} = \frac{\eta_i \cdot B_{\text{ч}} \cdot Q_{\text{H}}^p}{632 \cdot 1,36}, \quad (5)$$

где η_i – индикаторный КПД дизеля, который на режиме холостого хода принят равным 0,36 по результатам испытаний [15]; B_q – часовой расход топлива дизелем 1-ПД4Д с ЭСУВТ.01 при частоте вращения 270 мин^{-1} равный 7,5 кг/час.; Q_H^p – низшая теплотворная способность дизельного топлива, равная 10300 ккал/кг.

После подстановки значений параметров в формулу (5) $P_{ip} = 32,3 \text{ кВт}$. Среднее значение индикаторной мощности дизеля P_i , полученное при испытании дизелей тепловозов №№1-5, составляет 33,6 кВт, что превышает расчетную величину P_{ip} на 4 %.

2.2 Результаты определения разницы цилиндровых мощностей дизельных двигателей на режиме холостого хода

Результаты обработки индикаторных диаграмм по цилиндрам дизелей тепловозов сведены в таблицу 2.3. Анализ результатов показывает следующее:

- наименьшее зафиксированное значение давления сжатия, равное 3,08 МПа превышает минимально допустимое значение в 2,3 МПа, что свидетельствует об удовлетворительной газоплотности цилиндров дизелей тепловозов. Разница давления сжатия по цилиндрам находится в пределах от 0,06 до 0,17 МПа и не превышает нормативного значения в 0,3 МПа для цилиндров одного дизеля [48].
- различие углов начала горения топлива по цилиндрам $\Delta\varphi_c$ находится в пределах от 1,1 до 2,1 градуса п.к.в. до в.м.т., что указывает на то, что топливо в цилиндры испытанных дизелей впрыскивается форсунками примерно в один и тот же момент до в.м.т., т.е. фактические углы опережения впрыска топлива близки между собой.
- различие индикаторной мощности по цилиндрам дизелей изменяется в диапазоне от 1,3 кВт до 4,0 кВт. Разница индикаторных мощностей по цилиндрам, отнесенная к индикаторной мощности всего дизеля, выраженная в процентах, составляет от 3,8 до 11,5 %;

Таблица 2.3 - Результаты испытания дизелей 1-ПД4Д с ЭСУВТ.01 тепловозов ТЭМ18ДМ

№ п/п	Наименование параметра	Обозначение	Единица измерения	Значение параметров для дизеля тепловоза				
				883	882	880	1022	881
1	Наименьшая величина давления сжатия по цилиндрам	$P_{comp\ min}$	МПа	3,08	3,11	3,08	3,09	3,11
2	Разность между максимальным и минимальным значением величин давления сжатия по цилиндрам	ΔP_{comp}	МПа	0,13	0,09	0,17	0,17	0,06
3	Разность между максимальным и минимальным значением индикаторной мощности по цилиндрам	$\Delta P_{i\ cil}$	кВт	1,3	2,1	2,5	3,0	4,0
4	Разность между максимальным и минимальным значением угла начала горения топлива по цилиндрам	$\Delta \varphi_c$	град. п.к.в после в.м.т.	1,1	2,1	1,7	1,5	2,1
5	Разность между максимальным и минимальным значением угла максимального давления цикла по цилиндрам	$\Delta \varphi_z$	град. п.к.в после в.м.т.	1,3	2,1	1,5	3,1	2,0
6	Разность между максимальным и минимальным значением температуры выпускных газов по цилиндрам	ΔT_g	°С	20	25	29	40	38
7	Индикаторная мощность всех цилиндров дизеля	P_i	кВт	34,0	32,9	31,5	35,2	34,7
8	Отношение разности индикаторных мощностей по цилиндрам к индикаторной мощности дизеля	-	%	3,8	6,3	7,9	8,5	11,5

- различие температур выпускных газов на выходе из цилиндров T_g изменяется в пределах от 20 до 40 °С.

Проведенные испытания показали, что у дизелей с ЭСУВТ.01 наблюдаются различие индикаторных мощностей по отдельным цилиндрам, обусловленное различием количества подаваемого топлива в цилиндры дизеля и индикаторного КПД рабочих циклов.

2.3 Оценка индикаторной мощности цилиндра дизельного двигателя с электронной системой управления подачей топлива с помощью величины приращения средней продолжительности топливоподачи

2.3.1 Существующие методы оценки цилиндровой мощности

Проверка и регулировка работы дизель-генераторной установки, выполняемая после крупных видов ремонтов или замены отдельных частей дизеля, производится в ходе реостатных испытаний тепловоза на территории локомотивного депо. При этом в соответствии с руководствами [49, 50] регулирование цилиндровой мощности осуществляется на режиме номинальной мощности дизельного двигателя путем сравнения величин температур выпускных газов на выходе из цилиндров и максимальных давлений цикла. Руководствами [49, 50] регламентируется максимальная разница температур выпускных газов (ΔT_g) и максимальных давлений цикла (ΔP_{max}) по цилиндрам одного дизельного двигателя, величина которой не должна превышать 30 °С и 0,2 МПа. Если величина ΔT_g составляет более 30 °С, то производится выравнивание T_g путем регулирования подачи топлива в нужные цилиндры. Максимальное давление цикла P_{max} регулируется путем изменения угла опережения подачи топлива.

Вместе с тем при регулировке нагрузок цилиндров дизеля по величинам T_g и P_{max} возможны ошибки по следующим причинам:

- параметр T_g отражает мощность цилиндра дизеля только при правильно установленном угле опережения подачи топлива. Например, при малом $\phi_{оп}$

сгорание топлива продолжается на такте выпуска и температура газов будет завышенной.

- параметр T_g отражает нагрузку цилиндра дизеля только при исправной работе топливной аппаратуры [51], наиболее часто встречающиеся дефекты которой (плохой распыл топлива форсункой, подтекание распылителя, износ плунжерной пары ТНВД) приводят к неполному сгоранию топлива, увеличению T_g и снижению уровня P_{max} и $P_{i\ cil}$;

- точность измерения параметров T_g и P_{max} зависит от исправности используемых при испытаниях термопар и максиметра [52].

Для оценки изменения цилиндрических мощностей дизеля с ЭСУВТ.01 на режиме холостого хода с течением времени в эксплуатации были проведены испытания дизельного двигателя 1-ПД4Д тепловоза ТЭМ18ДМ №642 длительностью 18 месяцев. Оценка цилиндрических мощностей проводилась косвенно по величинам T_g . Анализ изменения T_g , приведенный на рисунке 2.1, подтверждает обычное в эксплуатации увеличение их разброса. Из рисунка 2.1 следует, что температура газов на выпуске из второго цилиндра резко уменьшилась в мае 2014 г. вследствие неисправности термопары.

Таким образом, техническое состояние термопары второго цилиндра не позволило достоверно определить его мощность, поэтому в данном случае не удалось определить распределение мощностей по всем цилиндрам дизельного двигателя на основании данных о температуре выпускных газов.

Анализ существующей технологии регулировки цилиндрических мощностей дизеля показал, что техническое состояние используемых при испытаниях измерительных приборов, дефекты в работе топливной аппаратуры и неправильная её настройка в ряде случаев не позволяют качественно её провести. Это обстоятельство является существенным недостатком указанной технологии. По этой причине разработка нового способа определения цилиндрической мощности дизеля на режиме холостого хода в условиях эксплуатации является актуальной задачей.

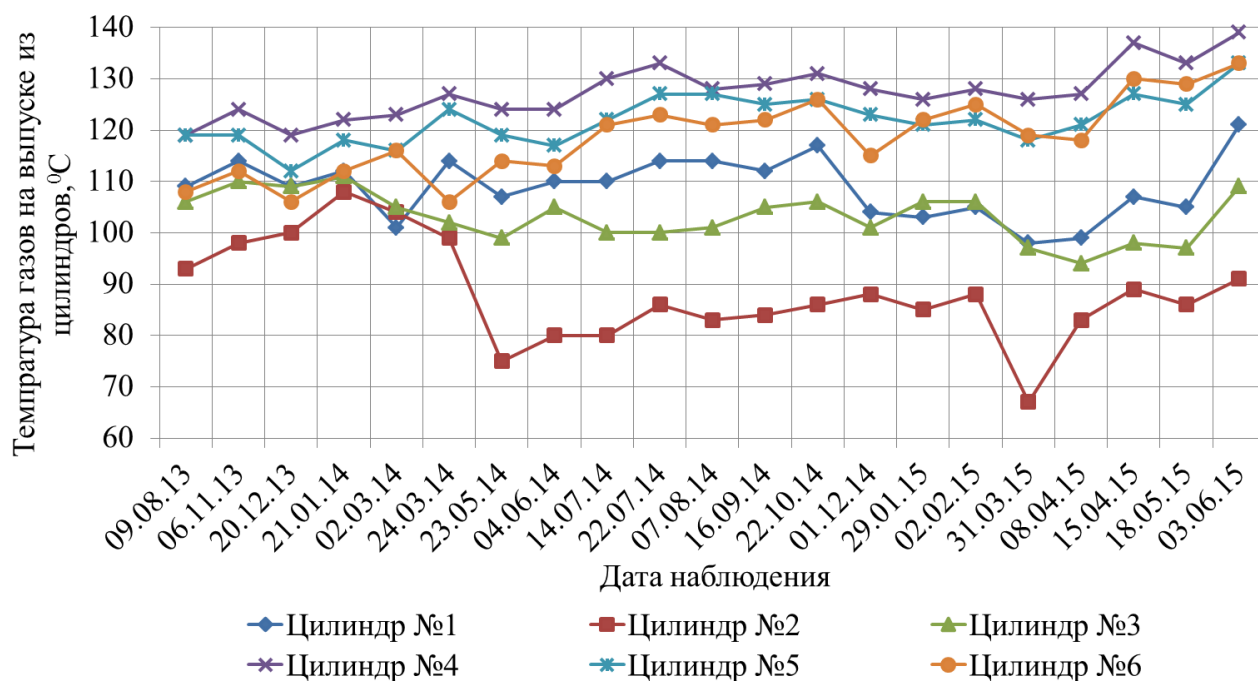


Рисунок 2.1 – Величина температуры газов на выпуске из цилиндров дизельного двигателя тепловоза ТЭМ18ДМ №642 на режиме холостого хода

2.3.2 Новый способ определения индикаторной мощности цилиндра дизеля

К новому способу предъявляются следующие требования:

- мощность каждого цилиндра должна определяться вне зависимости от технического состояния топливной аппаратуры и выполненных регулировок угла опережения подачи топлива $\varphi_{оп}$;
- для определения цилиндровой мощности не требуется использование дополнительных приборов (датчиков, преобразователей, термометров и т.д.).

В системе ЭСУВТ.01 для поддержания заданной частоты вращения коленчатого вала дизеля БУ подбирается величина средней продолжительности подачи топлива всеми ЭТНВД φ_t в градусах поворота коленчатого вала.

Допустим, что дизельный двигатель тепловоза работает на режиме холостого хода с заданной частотой вращения вала при постоянной внешней нагрузке. При отключении одного цилиндра дизеля его крутящий момент T_{1g} станет меньше момента нагрузки T_x , частота вращения начнет снижаться и БУ увеличит φ_t , а тем самым и $q_{ц}$ до восстановления заданной частоты вращения и

наступления равенства крутящего момента T_{1g} и момента нагрузки T_x . Чем выше индикаторная мощность отключенного цилиндра, тем больше будет потеря крутящего момента T_{1g} и тем больше будет новое значение φ_T , рассчитанное БУ для преодоления момента нагрузки T_x и восстановления заданной частоты вращения вала дизеля. Если цилиндр не работает, то в результате его отключения потери крутящего момента дизеля не произойдет и величина φ_T не изменится.

Для оценки мощности каждого цилиндра с помощью величины φ_T испытания всех дизелей проводились в следующей последовательности:

- фиксировалась величина φ_T по данным БУ при работе дизеля на холостом ходу с топливоподачей во все цилиндры;
- последовательно отключалась топливоподача в один из цилиндров согласно порядка их работы на дизеле и оценивалась величина продолжительности топливоподачи φ_{Ti} по оставшимся цилиндрам.

После проведения испытаний вычислялось приращение продолжительности топливоподачи при отключении каждого цилиндра по формуле:

$$\Delta\varphi_{Ti} = \varphi_{Ti} - \varphi_T, \quad (6)$$

Рассмотрим результаты испытаний дизелей тепловозов ТЭМ18ДМ №№881, 883, представленные в таблицах № 2.4 и № 2.5. Анализ данных таблиц показывает, что величина приращения продолжительности топливоподачи при отключении цилиндра $\Delta\varphi_{Ti}$ прямо пропорциональна его индикаторной мощности $P_{i\ cil}$. Поэтому величина $\Delta\varphi_{Ti}$ позволяет косвенно определить индикаторную мощность цилиндра. Связь индикаторной мощности с приращением продолжительности топливоподачи при отключении цилиндра оценивалась по величине отношения $P_{i\ cil}/\Delta\varphi_{Ti}$ для каждого цилиндра. Так, величина $P_{i\ cil}/\Delta\varphi_{Ti}$ изменяется у цилиндров дизеля тепловоза ТЭМ18ДМ №883 в пределах от 12,6 до 15,1, а у цилиндров дизеля тепловоза ТЭМ18ДМ №881 в пределах от 9,8 до 10,9. При этом разность между максимальным и минимальным значением индикаторной мощности по цилиндрам тепловозов ТЭМ18ДМ №№883 и 881 составляет 1,3 и 4,0 кВт.

Таблица 2.4 – Результаты испытания дизеля тепловоза ТЭМ18ДМ №883

№ п/п	Наименование параметра	Обозна- чение	Единица измерения	Значение параметров по цилиндрам дизеля					
				1	2	3	4	5	6
1	Индикаторная мощность	$P_{i\text{ cil}}$	кВт	5,5	4,8	5,4	6,0	6,0	6,1
2	Приращение продолжительности топливоподачи по остальным цилиндрам дизеля при отключении данного цилиндра	$\Delta\varphi_{Ti}$	град. п.к.в	0,40	0,34	0,43	0,46	0,40	0,45
3	Отношение индикаторной мощности к приращению топливоподачи при отключении данного цилиндра	$P_{i\text{ cil}}/\Delta\varphi_{Ti}$	кВт /град. п.к.в	13,9	14,1	12,6	13,2	15,1	13,7

Таблица 2.5 – Результаты испытания дизеля тепловоза ТЭМ18ДМ №881

№ п/п	Наименование параметра	Обозна- чение	Единица измерения	Значение параметров по цилиндрам дизеля					
				1	2	3	4	5	6
1	Индикаторная мощность	$P_{i\text{ cil}}$	кВт	6,6	4,8	5,0	8,0	4,0	6,1
2	Приращение продолжительности топливоподачи по остальным цилиндрам дизеля при отключении данного цилиндра	$\Delta\varphi_{Ti}$	град. п.к.в	0,61	0,45	0,48	0,82	0,37	0,59
3	Отношение индикаторной мощности к приращению топливоподачи при отключении данного цилиндра	$P_{i\text{ cil}}/\Delta\varphi_{Ti}$	кВт /град. п.к.в	10,9	10,8	10,5	9,8	10,9	10,3

Таким образом, можно сделать вывод о том, что чем больше различие цилиндровых мощностей дизельного двигателя, тем более выражена связь между индикаторной мощностью каждого цилиндра и приращением продолжительности топливоподачи при его отключении.

2.4 Выводы по разделу 2

По результатам исследований работы дизельных двигателей с электронной системой управления подачей топлива установлено, что:

- неравномерность распределения цилиндровых мощностей дизелей 1-ПД4Д с ЭСУВТ.01 на режиме холостого хода составляет до 11,5 % от всей индикаторной мощности дизеля и обусловлена разным количеством подаваемого в цилиндры топлива и различием индикаторного КПД рабочих циклов.
- величина приращения средней продолжительности подачи топлива по оставшимся в работе цилиндрам дизельного двигателя при отключении одного цилиндра позволяет косвенно определить его индикаторную мощность.

3 РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМОВ ТЕХНИЧЕСКОГО ДИАГНОСТИРОВАНИЯ РАБОТЫ ЦИЛИНДРОВ ДИЗЕЛЬНОГО ДВИГАТЕЛЯ С ЭЛЕКТРОННОЙ СИСТЕМОЙ УПРАВЛЕНИЯ ПОДАЧЕЙ ТОПЛИВА

Своевременное выявление и устранение неисправностей тепловозного дизельного двигателя без его разборки и отвлечения тепловоза из эксплуатации с использованием недорогостоящих технических средств и алгоритмов позволяет сократить расходы на его содержание в эксплуатации. Для эксплуатационного технического диагностирования тепловозных дизельных двигателей в условиях депо актуальна оперативность установления объективного диагноза простыми и надежными методами и средствами [53, 54].

Применение информативных методов технического диагностирования дизельных двигателей с ЭСУВТ.01 без постановки тепловоза на ремонт позволяет оценить работу цилиндров дизельного двигателя без его разборки и проведения реостатных испытаний тепловоза.

3.1 Анализ методов технического диагностирования работы цилиндров дизельного двигателя с электронной системой управления подачей топлива на режиме холостого хода

В настоящее время техническое диагностирование отечественных и зарубежных дизельных двигателей с электронной системой управления подачей топлива осуществляется с применением приведенных ниже методов.

Органолептический метод основан на определении качества работы цилиндра дизеля с помощью органов чувств. При техническом диагностировании работы цилиндров используются визуальный, тактильный и акустический методы. Визуальный и акустический методы применяются при последовательном кратковременном увеличении количества поданного топлива в цилиндры дизеля.

Цилиндр признается работающим, если при увеличении подачи топлива изменяются звук его работы и окраска выпускных газов.

Неисправная форсунка обнаруживается методом последовательного отключения топливоподачи по цилиндрам с одновременной оценкой дымности выпускных газов. При отключении цилиндра с неисправной форсункой дизель перестает дымить.

В основу тактильного метода заложена оценка пульсации топлива, которая свидетельствует о подаче топлива ЭТНВД в цилиндр дизеля. По силе пульсации можно ориентировочно определить неисправность. Сильная пульсация топлива указывает на зависание иглы форсунки, засорение распыливающих отверстий [55], слабая пульсация указывает на плохой распыл топлива форсункой, или малой подаче топлива ЭТНВД.

Органолептический метод отличается доступностью, простотой и успешно применяется для предварительной оценки, однако он обладает большой погрешностью [56].

При техническом диагностировании работы топливной аппаратуры пирометрическим методом последовательно измеряется температура каждой трубки высокого давления топлива посредством пирометра. Замеры ведутся на заглушенном дизеле тепловоза после его предварительного прогрева на номинальном режиме без нагрузки в течение 15-20 мин [57]. Отклонения температуры поверхности трубки высокого давления с неисправной форсункой от поверхности трубки с исправной топливной аппаратурой составляет 5 %, с неисправным ТНВД – 10 % [58]. Тепловизор в отличие от пирометра позволяет получить данные по температурам всех трубок за один замер, что повышает информативность контроля. Метод применяется при техническом диагностировании тепловозных дизельных двигателей ПД1М [57, 58].

Преимущества данного метода состоят в оперативности проведения работ, возможности записи результатов измерений на электронный носитель информации для дальнейшей обработки.

К недостаткам метода можно отнести следующее:

- высокая стоимость применяемых приборов;
- результат измерения температуры существенно зависит от расстояния до измеряемой поверхности, её загрязненности и цветовой гаммы [56];
- температура наружной поверхности трубки высокого давления существенно зависит от толщины её стенки [30]. Трубки, установленные на один дизель, могут иметь разную толщину стенок, что затрудняет определение дефектного узла топливной аппаратуры, учитывая небольшие отклонения температур трубки с неисправной форсункой или ТНВД.

Метод оценки величин T_g цилиндрам дизельного двигателя позволяет выявить неработающие цилиндры при наличии термопар, установленных в выпускных коллекторах. Значение T_g неработающего цилиндра составляет порядка 40 °С. Оценка по данному методу оперативна, но ей присущи недостатки (см. п.2.3).

При использовании метода оценки неравномерности вращения коленчатого вала дизельного двигателя измеряется повышение угловой скорости коленчатого вала при рабочем ходе поршня каждого цилиндра по данным преобразователя частоты вращения. По результатам замеров строится индикаторная диаграмма рабочего процесса в каждом цилиндре. Данный метод используется на высокооборотных дизельных двигателях с фирмы Caterpillar [49].

Преимущества метода в его автоматизации, отсутствии необходимости в специальных приборах и приспособлениях для проведения операции. Однако отсутствие доступа к результатам обработки индикаторных диаграмм, имеющихся только у сервисных инженеров-представителей фирмы Caterpillar, не позволяет установить точную причину неисправности цилиндра.

Метод поочередного отключения подачи топлива по цилиндрам дизельного двигателя заключается в сравнении величины φ_T при работе дизеля на всех цилиндрах и при работе с одним отключенным по формуле (6). Если цилиндр не работает, то его отключение не повлияет на среднюю продолжительность топливоподачи при работе дизеля на оставшихся цилиндрах и величина $\Delta\varphi_{Ti}$ будет равна нулю.

Техническое диагностирование с использованием данного метода применяется на дизельных двигателях серии 3500 фирмы Caterpillar, оборудованных системой электронного управления подачей топлива и осуществляется путем подключения к БУ персонального компьютера с сервисной программой [50].

Достоинства метода в его автоматизации, отсутствии необходимости в специальных приборах и приспособлениях для проведения проверки. Проверка оперативна и может быть осуществлена в любом месте эксплуатации тепловоза.

Недостатки метода:

- для получения достоверных результатов требуется сохранение постоянной нагрузки на дизель при проведении проверки (тормозной компрессор и вентилятор охлаждающего устройства должны быть отключены);
- метод позволяет определить неработающий цилиндр дизеля без определения точной причины неисправности.

Метод индицирования является наиболее информативным для изучения рабочего процесса в цилиндре дизельного двигателя и получил широкое распространение благодаря наличию надежных и достоверных средств измерения внутрицилиндровых параметров [60, 59]. Техническое диагностирование работы цилиндров дизельного двигателя по внутрицилиндровым процессам позволяет с помощью ограниченного числа измеряемых параметров получить не только качественную (исправен, неисправен), но и количественную информацию о многофакторном изменении технического состояния значительного числа агрегатов и систем, в том числе и топливной аппаратуры.

В настоящее время на железнодорожном транспорте применяются следующие системы индицирования: КИПАРИС-5 разработки ОАО «НИИТКД», г. Омск, DEPAS D4.0H разработки кафедры «Судовые энергетические установки и техническая эксплуатация» Одесского национального морского университета, а также усовершенствованная версия системы DEPAS D4.0H, созданная в ФГАОУВО «Российский университет транспорта», г. Москва и предназначенная для использования на тепловозных дизелях [61, 62].

Достоинства метода:

- результаты индицирования являются наиболее информативными, позволяют оценить работу цилиндра, а также выдавать диагностические заключения и рекомендации по устранению неисправностей [63].

Недостатки метода:

- сложность и высокая стоимость систем индицирования;
- для проведения индицирования и обработки результатов измерений требуется участие квалифицированного специалиста.

3.2 Обоснование выбора методов технического диагностирования работы цилиндров дизельного двигателя 1-ПД4Д с электронной системой управления подачей топлива

Обобщенный анализ методов технического диагностирования работы цилиндров дизеля с системами электронного управления подачей топлива показал следующее:

- наиболее информативным и точным является метод снятия индикаторных диаграмм по цилиндрам. Вместе с тем для проведения индицирования требуется дорогостоящее оборудование и высокая квалификация персонала;
- пирометрический и тепловизионный методы требуют дорогостоящего оборудования и квалифицированного персонала;
- объективная оценка работы цилиндров по температурам выпускных газов возможна только при исправной работе топливной аппаратуры и термопар;
- метод поочередного отключения подачи топлива по цилиндрам дизеля обладает существенными преимуществами в плане оперативности проведения технического диагностирования и отсутствии необходимости в дополнительных приборах и приспособлениях.

На основании проведенного анализа достоинств и недостатков известных методов технического диагностирования выбран метод поочередного отключения цилиндров для дизельного двигателя 1-ПД4Д с ЭСУВТ.01. Работа основных

потребителей нагрузки (тормозной компрессор и вентилятор охлаждающего устройства) при проверке работы цилиндров дизельного двигателя отслеживается преобразователями давления воздуха и температуры масла системы ЭСУВТ.01. Для уточнения причин отказа цилиндра предлагается использовать комбинацию методов поочередного отключения подачи топлива и кратковременного увеличения количества поданного топлива ЭТНВД по цилиндрам дизельного двигателя (см. п. 3.2.1). Для этого при увеличении цикловой подачи топлива в цилиндр фиксируется изменение частоты вращения вала дизельного двигателя. Если при этом изменение частоты вращения вала составит более $\pm 5 \text{ мин}^{-1}$, то цилиндр признается работающим. В противном случае цилиндр признается неработающим.

Причинами отказа цилиндра дизеля могут быть следующие: неисправность форсунки, ЭТНВД и его привода, большой износ деталей ЭТНВД и форсунки, попадание воздуха в трубку высокого давления и др. Если при увеличении подачи топлива ранее неработающий цилиндр начнет работать, то это свидетельствует о том, что плунжер ЭТНВД не заклинен в моноштулке, электрогидравлический клапан ЭТНВД не заклинен во втулке, привод ЭТНВД, включающий в себя кулачковый вал и толкатель, исправны, в трубке высокого давления отсутствует воздух, сигнал поступает от БУ к ЭТНВД (кабели связи, разъемы не повреждены).

Таким образом, предлагаемый подход в техническом диагностировании работы цилиндров, заключающийся в комбинации методов последовательного отключения топливоподачи и кратковременного увеличения топливоподачи позволяет уточнить причину отказа цилиндра.

3.3 Алгоритмы технического диагностирования работы цилиндров дизельного двигателя 1-ПД4Д с электронной системой управления подачей топлива на режиме холостого хода

Основанием для разработки и проверки алгоритмов технического диагностирования явились соответствующие телеграммы ОАО «РЖД»,

представленные в Приложении Б. Проверка алгоритмов выполнена в сервисном локомотивном депо Тверь ООО «ЛокоТех-Сервис» филиал «Северо-Западный» на тепловозах ТЭМ18ДМ №№ 880, 881, 882, 883, 884, 1022 приписки эксплуатационного локомотивного депо Бологовское Октябрьской Дирекции тяги ОАО «РЖД».

Определение неработающего цилиндра предполагает реализацию следующих алгоритмов:

- А1 – алгоритм технического диагностирования работы цилиндров дизеля методом их последовательного отключения;
- А2 - алгоритм технического диагностирования работы цилиндров дизеля методом последовательного кратковременного увеличения топливоподачи.

3.3.1 Алгоритм технического диагностирования работы цилиндров дизеля методом их последовательного отключения (алгоритм А1)

Блоки №1 и №4. Проверка БУ ЭСУВТ.01 поступления сигналов от датчиков давления масла, давления воздуха после тормозного компрессора, температуры масла на входе в дизель, дискретных сигналов, поступающих от электрической схемы тепловоза (рисунок 3.1). Техническое диагностирование может быть осуществлено только при наличии сигналов от датчиков.

Блоки № 2 и № 3. Измерение БУ ЭСУВТ.01 текущей частоты вращения вала дизеля, температуры масла, давления воздуха после тормозного компрессора и давления масла. Выполнение приведенных в таблице 3.1 условий является обязательным для начала технического диагностирования. Если хотя бы одно из условий не выполняется, то измерения повторяются.

При выполнении блока №5 происходит обнуление БУ ЭСУВТ.01 всех поправок к количеству поданного топлива $q_{ц}$ и углу опережения подачи топлива по цилиндрам $\varphi_{оп.}$ (при их наличии).

При выполнении блока №6 осуществляется измерение и фиксация в памяти БУ средней продолжительности топливоподачи $\varphi_{т}$ по цилиндрам дизеля.

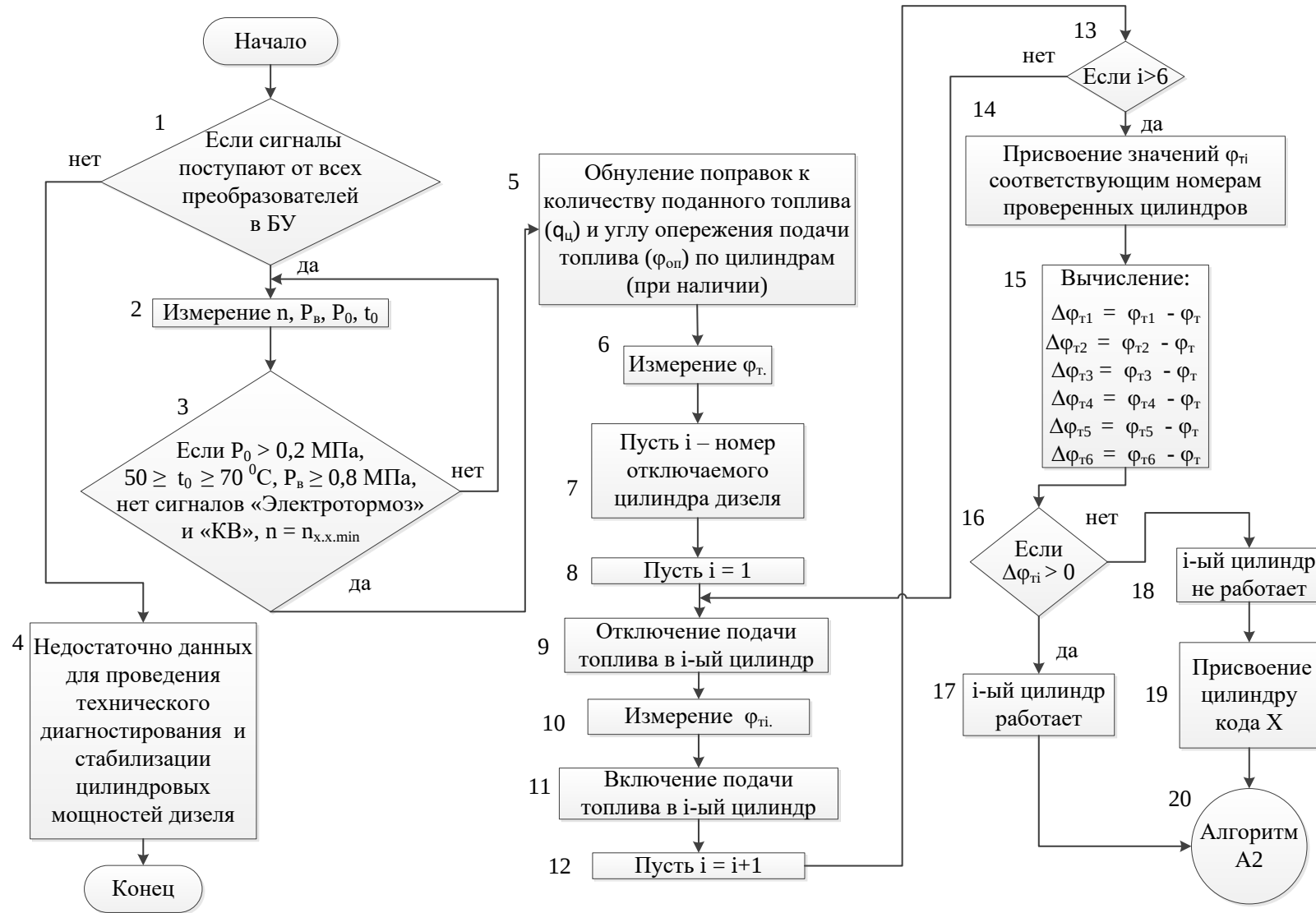


Рисунок 3.1 – Блок-схема алгоритма технического диагностирования работы цилиндров методом их последовательного отключения

Таблица 3.1 - Условия проведения технического диагностирования и стабилизации цилиндровых мощностей дизеля

№ п/п	Наименование параметра	Обозначение	Размерность	Значение	Примечание
1	Дискретный сигнал «КВ»	-	-	-	Дискретный сигнал КВ поступает в БУ при переводе реверсивной рукоятки в поездной режим и включении тумблера «Управление машинами». Дискретный сигнал «Электротормоз» поступает в БУ при переводе тумблера «Тяга-тормоз» в положение «Тормоз» и контроллера машиниста в одно из тормозных положений. При проведении технического диагностирования данные сигналы не должны поступать в БУ.
3	Дискретный сигнал «Электротормоз»	-	-	-	
3	Частота вращения коленчатого вала	n	мин ⁻¹	240-300	Установленная частота вращения вала на данном дизельном двигателе
4	Давление масла	P ₀	МПа	более 0,2	Приведены условия перехода на пониженную частоту вращения вала дизеля холостого хода.
5	Давление воздуха после тормозного компрессора	P _в	МПа	более 0,8	При достижении температуры масла на входе в дизель 70 °С включается вентилятор охлаждающего устройства.
6	Температура масла на входе в дизель	T ₀	°С	50-70	

При выполнении блоков №7 - 13 осуществляются операции последовательного отключения и включения в работу БУ отдельных цилиндров дизеля. Выключение подачи топлива в цилиндр производится путем обесточивания магнита электрогидравлического клапана ЭТНВД. После отключения цилиндра измеряется φ_{ti} .

Проведение блока №14 предусматривает присвоение значений величинам средней продолжительности топливоподачи φ_{ti} соответствующим номерам цилиндров, при отключении которых происходил замер.

Блок №15. Вычисление величины приращения средней длительности топливоподачи $\Delta\varphi_{ti}$ для каждого цилиндра дизеля.

Блоки №16 - 19. Оценка величины $\Delta\varphi_{ti}$. Если $\Delta\varphi_{ti}$ больше нуля, то цилиндр признается работающим. Если величина $\Delta\varphi_{ti}$ равна нулю, то цилиндр признается неработающим и ему присваивается код X.

20. Переход к алгоритму A2.

3.3.2 Алгоритм технического диагностирования работы цилиндров дизеля методом последовательного увеличения топливоподачи (алгоритм A2)

Блок-схема алгоритма технического диагностирования работы цилиндров дизельного двигателя методом последовательного увеличения топливоподачи представлена на рисунке 3.2. Алгоритм выполняется в следующей последовательности.

Блок №1. Выдача на экран БУ сообщения о начале технического диагностирования для оповещения локомотивной бригады, поскольку при увеличении топливоподачи ЭТНВД в цилиндр меняется звук работы дизельного двигателя.

Блок №2. Измерение частоты вращения коленчатого вала дизельного двигателя.

Блоки № 3 - 9 Операции последовательного кратковременного увеличения длительности топливоподачи по цилиндрам дизельного двигателя. При увеличении длительности топливоподачи измеряется частота вращения коленчатого вала дизельного двигателя n_i .

Блок №10. Присвоение значений частоты вращения n_i соответствующим номерам проверенных цилиндров.

Блок №11. Вычисление разницы Δn_i частоты вращения.

Блоки №12 - 15 Если разница Δn_i больше либо равна величине 5 мин^{-1} то цилиндр признается работающим. Если разница Δn_i меньше величины 5 мин^{-1} то цилиндр признается неработающим и на экран БУ выводится соответствующее сообщение.

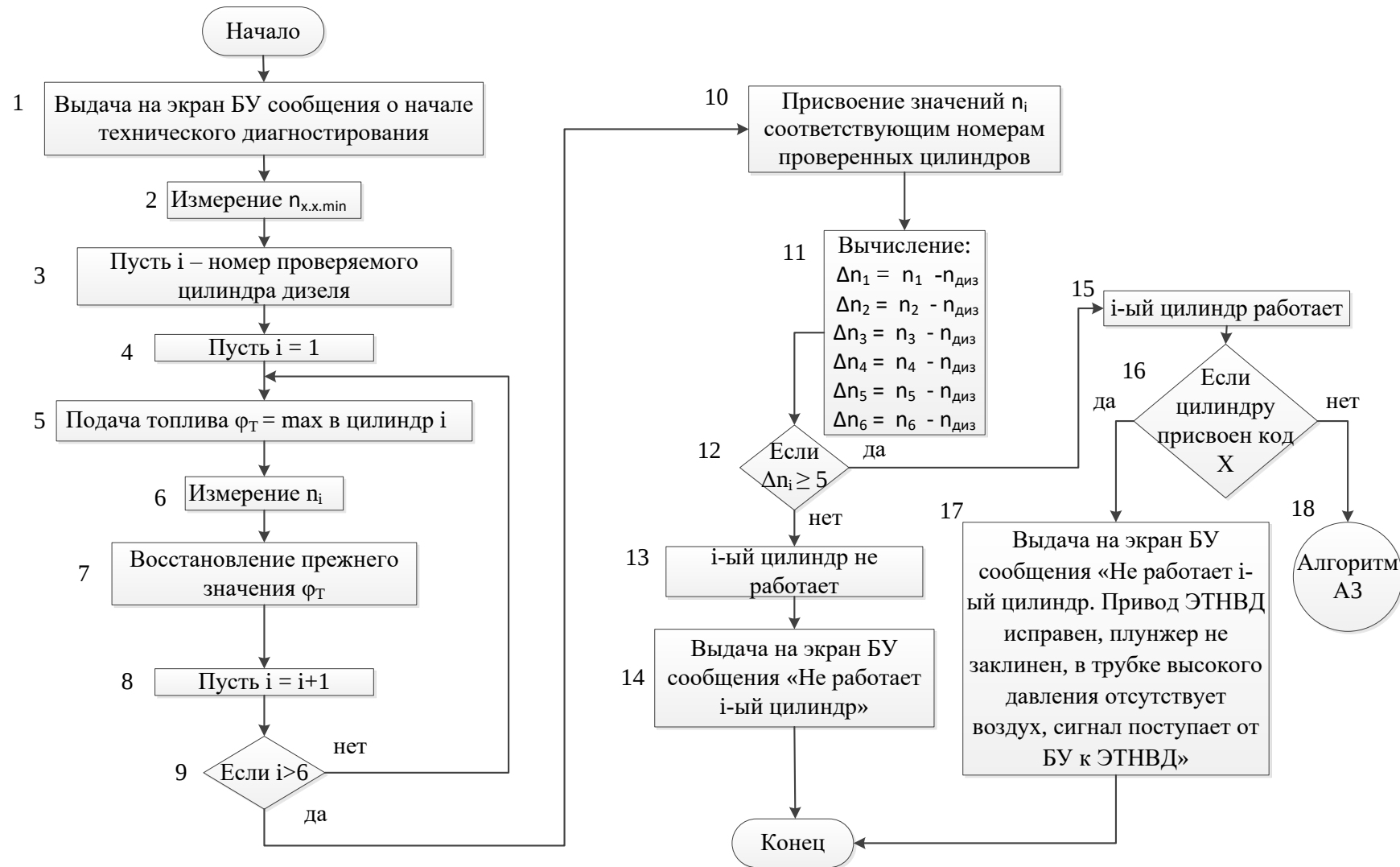


Рисунок 3.2 Блок-схема алгоритма технического диагностирования работы цилиндров дизеля методом последовательного увеличения топливоподачи

Блоки №16 и №17 Если по результатам выполнения алгоритма А1 работающему цилиндру присвоен код Х, то на экране БУ появляется сообщение о том, что привод ЭТНВД исправен, плунжер не заклинен, в трубке высокого давления отсутствует воздух, сигнал поступает от БУ к ЭТНВД.

Блок №18. При исправной работе всех цилиндров дизельного двигателя осуществляется переход к алгоритму сравнения величин приращений топливоподач по цилиндрам дизельного двигателя (алгоритму А3), приведенному в п. 5.1 главы 5.

3.4 Выводы по разделу 3

1 Разработаны алгоритмы технического диагностирования работы цилиндров дизеля 1-ПД4Д с ЭСУВТ.01, основанные на методах поочередного отключения подачи топлива по цилиндрам дизельного двигателя и последовательного кратковременного увеличения топливоподачи в цилиндры дизеля, которые позволяют выявить неработающий цилиндр и уточнить причину его отказа.

2 Проверка дизельных двигателей тепловозов ТЭМ18ДМ №№ 880, 881, 882, 883, 884, 1022 по указанным алгоритмам выявила работоспособность всех цилиндров. Последующее снятие индикаторных диаграмм по цилиндрам и оценка результатов измерений подтвердили результаты технического диагностирования.

4 МЕТОДЫ СТАБИЛИЗАЦИИ ЦИЛИНДРОВЫХ МОЩНОСТЕЙ ДИЗЕЛЬНОГО ДВИГАТЕЛЯ 1-ПД4Д С ЭЛЕКТРОННОЙ СИСТЕМОЙ УПРАВЛЕНИЯ ПОДАЧЕЙ ТОПЛИВА

4.1 Общие положения

В диссертационной работе разработаны два метода стабилизации цилиндровых мощностей:

- расчетный метод, суть которого состоит в последовательном отключении подачи топлива по цилиндрам дизеля и измерении приращений топливоподачи $\Delta\varphi_{ti}$ по формуле (6) п. 2.3, значения которых используются для расчета поправок к количеству поданного топлива по цилиндрам для стабилизации цилиндровых мощностей.
- экспериментальный метод, при котором аналогично предыдущему методу производится последовательное отключение подачи топлива по цилиндрам дизеля и измерение величин $\Delta\varphi_{ti}$. Путем последовательного регулирования подачи топлива по цилиндрам производится выравнивание величин $\Delta\varphi_{ti}$ между собой.

4.2 Расчетный метод стабилизации цилиндровых мощностей дизеля

При разработке метода принят подход сравнения параметров дизельного двигателя при работе ТНВД всех цилиндров и при отключении каждого ТНВД. При этом нагрузка на дизель постоянна и он работает с постоянной эффективной мощностью:

$$P_e = const, \quad (7)$$

При этом мощность, затрачиваемая на трение в узлах движения и насосные потери, с достаточной для практики точностью может быть принята постоянной. Тогда из уравнения баланса мощности (см. формулу (8)) на валу дизеля следует, что и индикаторная мощность также будет неизменна.

$$P_e = P_i - P_m, \quad (8)$$

где P_i – индикаторная мощность, кВт; P_m – мощность механических потерь.

Целью методики является установление аналитической взаимосвязи между мощностью дизельного двигателя и параметрами топливоподачи в каждый цилиндр на рассматриваемом режиме при тех же условиях работы ЭТНВД цилиндров. Использование полученных зависимостей позволяет провести стабилизацию мощностей цилиндров дизельного двигателя 1-ПД4Д на режиме холостого хода.

При разработке методики принят следующий порядок.

На режиме холостого хода дизель развивает определенную эффективную мощность, которая затрачивается на привод вспомогательных механизмов (вентиляторы охлаждения тяговых электродвигателей, вспомогательный генератор). При постоянной частоте вращения вала эффективная мощность P_e , измеряемая в кВт и расход топлива дизеля $G_{\text{ч}}$, измеряемый в кг/ч, определяются:

$$P_e = \alpha_1 \cdot Q_{\text{H}}^{\text{T}} \cdot G_{\text{ч}} \cdot \eta_e, \quad (9)$$

$$P_e = \alpha_2 \cdot q_{\text{ц}} \cdot \frac{n}{60 \cdot m} \cdot \varphi_T \cdot i, \quad (10)$$

где Q_{H}^{T} – низшая теплотворная способность топлива, кДж/кг; α_1 – коэффициент связи размерности переменных, кВт·ч/кДж; α_2 – коэффициент связи размерности переменных, кг/г; η_e – эффективный КПД дизеля; $q_{\text{ц}}$ – характеристика удельной подачи топлива ЭТНВД, г/град. п.к.в., определенная при испытаниях ЭТНВД на стенде конструкции АО «ВНИИЖТ» [47]. Патент на изобретение представлен в Приложении В; n – частота вращения вала дизеля, мин⁻¹; i – число цилиндров дизеля; m – коэффициент тактности дизеля; φ_T – средняя длительность топливоподачи в цилиндры дизеля, град. п.к.в.

Подставляя уравнение (10) в уравнение (9) получим мощность дизеля P_e и его i -го цилиндра P_{ei} :

$$P_e = \alpha_3 \cdot i \cdot \eta_e \cdot \varphi_T, \quad (11)$$

$$P_{ei} = \alpha_3 \cdot \eta_{ei} \cdot \varphi_T, \quad (12)$$

где коэффициент: $\alpha_3 = \alpha_1 \cdot \alpha_2 \cdot Q_H^T \cdot q_{ц} \cdot \frac{n}{60 \cdot m},$ (13)

Составляющие, которые входят в уравнение (13), представляют собой константы, поэтому коэффициент α_3 имеет постоянное значение.

На основе выражений (11) и (12) составлены уравнения баланса мощности дизеля P_0 при работе ЭТНВД всех цилиндров и отключении первого P_1 , в которых использованы индексы, соответствующие этому параметру:

$$P_0 = \sum_{i=1}^6 P_{in} = P_{10} + P_{20} + P_{30} + P_{40} + P_{50} + P_{60}, \text{ при } n = 0, \quad (14)$$

$$\begin{cases} P_0 = \sum_{i=1}^6 P_{in} = P_{11} + P_{21} + P_{31} + P_{41} + P_{51} + P_{61}, \\ P_{11} = 0 \text{ при } i = n = 1 \end{cases}, \quad (15)$$

где P_{in} - мощность i -го цилиндра дизеля при работе ЭТНВД всех цилиндров ($n = 0$) и при отключении ЭТНВД первого цилиндра ($n = 1$), кВт.

Подставив уравнение (12) в правые части выражений (14) и (15) получим:

$$P_0 = \alpha_3 \cdot \varphi_{Tn} \cdot \sum_{i=1}^6 \eta_{in} = \alpha_3 \cdot \varphi_{T0} \cdot (\eta_{10} + \eta_{20} + \eta_{30} + \eta_{40} + \eta_{50} + \eta_{60}), \text{ при } n = 0, \quad (16)$$

$$P_1 = \alpha_3 \cdot \varphi_{Tn} \cdot \sum_{i=2}^6 \eta_{in} = \alpha_3 \cdot \varphi_{T1} \cdot (\eta_{21} + \eta_{31} + \eta_{41} + \eta_{51} + \eta_{61}),$$

при $n = 1,$ (17)

где φ_{Tn} - длительность топливоподачи i -го цилиндра дизеля при работе ЭТНВД всех цилиндров ($n = 0$); φ_{T1} - длительность топливоподачи i -го цилиндра дизеля при отключении ЭТНВД первого цилиндра ($n = 1$), град. п.к.в.; η_{in} - эффективный КПД i -го цилиндра дизеля при работе ТНВД всех цилиндров ($n = 0$) и при отключении ЭТНВД первого цилиндра ($n = 1$).

Следует отметить, что КПД с подстрочными индексами (η_{in}) не несет физического смысла и предназначен для решения математических уравнений.

Установим связь КПД η_{in} с параметрами работы i -го цилиндра P_{in} и φ_{Tn} . Обработка экспериментальных данных показала, что при работе ЭТНВД всех цилиндров и при отключении ЭТНВД одного цилиндра значение коэффициента

η_{in} изменяется, поскольку изменяется его мощность, которая зависит от длительности топливоподачи в этот цилиндр φ_{Ti} .

Для оценки нагрузки цилиндров дизеля (16) и (17) принято, что изменение эффективного КПД i -го цилиндра дизеля $\Delta\eta_{in}$ зависит от изменения длительности топливоподачи в этот цилиндр $\varphi_{Ti} - \varphi_{T0}$ на всех рассматриваемых режимах работы ТНВД ($n = 0 \dots 6$):

$$\eta_{in} = \eta_{i0} + \Delta\eta_{in} = \eta_{i0} \cdot \left(1 + \frac{\Delta\eta_{in}}{\eta_{i0}}\right) = \eta_{e0} \cdot \left(1 + K \cdot \frac{\varphi_{Tn} - \varphi_{T0}}{\varphi_{T0}}\right) = \dots$$

$$= \eta_{i0} \cdot \alpha_n, \text{ при } n = 0 \dots 6., \quad (18)$$

$$\alpha_n = 1 + K \cdot \frac{\varphi_{Tn} - \varphi_{T0}}{\varphi_{T0}}, \quad (19)$$

где α_n – коэффициент влияния изменения длительности топливоподачи i -го цилиндра дизеля на его КПД при работе ЭТНВД всех цилиндров ($n = 0$) и при отключении ЭТНВД i -го цилиндра ($n = 1 \dots 6$); K – коэффициент связи параметров работы цилиндра η_{ei} и φ_{Ti} .

С учетом этого допущения и последующего совместного решения уравнений (16) и (17) относительно суммы коэффициентов $\eta_{20}, \dots, \eta_{60}$ получим:

$$\frac{P_0}{\varphi_{T0} \cdot \alpha_3} - \eta_{10} = (\eta_{20} + \eta_{30} + \eta_{40} + \eta_{50} + \eta_{60}), \text{ при } \alpha_n = 1, n = 0, \quad (20)$$

$$\frac{P_1}{\varphi_{T1} \cdot \alpha_3 \cdot \alpha_1} = \eta_{20} + \eta_{30} + \eta_{40} + \eta_{50} + \eta_{60} \text{ при } n = 1, \quad (21)$$

После совместного решения уравнений (19) и (20) с учетом подхода, принятого при составлении методики ($P_n = \text{const}$ при $n = 0 \dots 6$), получим:

$$\eta_{10} = \frac{1}{\alpha_3} \cdot \left(\frac{P_0}{\varphi_{T0}} - \frac{P_1}{\alpha_1 \cdot \varphi_{T1}}\right) = \frac{P_0}{\alpha_3} \cdot \left(\frac{1}{\varphi_{T0}} - \frac{1}{\alpha_1 \cdot \varphi_{T1}}\right) \text{ при } i = n = 1, \quad (22)$$

По аналогии с выражением (19) составлено выражение расчета коэффициента η_{in} для каждого цилиндра дизеля ($i=1 \dots 6$) на режимах работы ТНВД всех цилиндров, соответствующих $n = 0$:

$$\eta_{i0} = \frac{1}{\alpha_3} \cdot \left(\frac{P_0}{\varphi_{T0}} - \frac{P_n}{\alpha_n \cdot \varphi_{Tn}}\right) = \frac{P_0}{\alpha_3} \cdot \left(\frac{1}{\varphi_{T0}} - \frac{1}{\alpha_n \cdot \varphi_{Tn}}\right) \text{ при } i = n = 1 \dots 6. \quad (23)$$

С учетом полученных значений η_{i0} уравнение баланса мощности дизеля при работе ТНВД всех цилиндров (16) до и после стабилизации их цилиндрических мощностей запишется:

$$P_0(\varphi_{T0}) = \alpha_3 \cdot \varphi_{T0} \cdot \sum_{i=1}^6 \eta_{i0} = \alpha_3 \cdot (\varphi_{T0} \cdot \eta_{10} + \varphi_{T0} \cdot \eta_{20} + \dots + \varphi_{T0} \cdot \eta_{60}) \quad (24)$$

$$P_0(\varphi_{Ti}) = \alpha_3 \cdot \sum_{i=1}^6 \varphi_{Ti} \cdot \eta_{iB} = \alpha_3 \cdot (\varphi_{T1} \cdot \eta_{1B} + \varphi_{T2} \cdot \eta_{2B} + \dots + \varphi_{T6} \cdot \eta_{6B}), \quad (25)$$

где $P_0(\varphi_{T0})$ и $P_0(\varphi_{Ti})$ - мощность дизеля при работе ТНВД всех цилиндров ($n=0$) до и после стабилизации их мощностей, кВт; φ_{T0} и φ_{Ti} - длительность топливоподачи в каждый i -й цилиндр дизеля до и после стабилизации их мощностей, град. п.к.в.;

η_{i0} и η_{iB} - коэффициент до и после стабилизации мощностей цилиндров.

По аналогии с (18) составлено выражение расчета коэффициента η_{iB} для каждого цилиндра дизеля ($i = 1 \dots 6$) на режимах работы после стабилизации мощностей всех цилиндров ($n = 0$):

$$\begin{aligned} \eta_{iB} &= \eta_{i0} + \Delta\eta_{iB} = \eta_{i0} \cdot \left(1 + \frac{\Delta\eta_{iB}}{\eta_{i0}}\right) = \\ &= \eta_{i0} \cdot \left(1 + K \cdot \frac{\varphi_{Ti} - \varphi_{T0}}{\varphi_{T0}}\right) = \eta_{i0} \cdot \alpha_{iB}, \text{ при } i = 1 \dots 6, \end{aligned} \quad (26)$$

$$\alpha_{iB} = 1 + K \cdot \frac{\varphi_{Ti} - \varphi_{T0}}{\varphi_{T0}}, \quad (27)$$

Следует отметить, что в уравнении (25) слагаемые правой части, представляющие мощность каждого i -го цилиндра дизеля после её стабилизации, связаны между собой зависимостью:

$$P_0(\varphi_{Ti}) = \alpha_3 \cdot \sum_{i=1}^6 \varphi_{Ti} \cdot \eta_{iB}, \quad (28)$$

Учитывая подход, принятый при составлении методики ($P_n = \text{const}$ при $n = 0 \dots 6$), и после совместного решения уравнений (24), (25) и (28) получим:

$$6 \cdot (\varphi_{Ti} \cdot \eta_{iB}) = \varphi_{T0} \cdot \sum_{i=1}^6 \eta_{i0} = \frac{P_0(\varphi_{Ti})}{\alpha_3}, \quad (29)$$

откуда определим длительность топливоподачи в каждый i -й цилиндр дизеля после стабилизации их мощностей φ_{Ti} :

$$\varphi_{Ti} = \frac{P_0(\varphi_{Ti})}{6 \cdot \alpha_3 \cdot \eta_{iB}} = \frac{\varphi_{T0}}{6 \cdot \eta_{iB}} \cdot \sum_{i=1}^6 \eta_{i0}, \quad (30)$$

Подставив (25), (22) и (23) в (29) найдем:

$$\varphi_{Ti} = \frac{\varphi_{T0}}{6 \cdot \eta_{iB}} \cdot \sum_{i=1}^6 \eta_{i0} = \frac{P_0}{6 \cdot \alpha_3 \cdot \eta_{i0} \cdot \alpha_{iB}} = \frac{1}{6 \cdot \left(\frac{1}{\varphi_{T0}} - \frac{1}{\varphi_{Tn} \cdot \alpha_n} \right) \cdot (1 + k \cdot \frac{\varphi_{Ti} - \varphi_{T0}}{\varphi_{T0}})}, \quad (31)$$

Решая (30) относительно φ_{Ti} получим:

$$6 \cdot (\varphi_{Tn} \cdot \alpha_n - \varphi_{T0}) \cdot k \cdot \varphi_{Ti}^2 + \\ + 6 \cdot (\varphi_{Tn} \cdot \alpha_n - \varphi_{T0}) \cdot \varphi_{T0} \cdot (1 - k) \cdot \varphi_{Ti} - \varphi_{T0}^2 \cdot \varphi_{Tn} \cdot \alpha_n = 0, \quad (32)$$

Выражение (31) устанавливает связь между длительностью топливоподачи в каждый i -й цилиндр дизеля до и после стабилизации их мощностей на основе результатов тестирования дизеля при работе на 6 и 5 цилиндрах. При обработке результатов учтено изменение КПД рабочего процесса цилиндра дизеля в зависимости от мощности на режимах тестирования и при ее стабилизации.

Поправки к количеству поданного топлива для стабилизации мощностей цилиндров определяются в результате решения квадратного уравнения (32).

4.3 Экспериментальный метод стабилизации цилиндровых мощностей

При стабилизации цилиндровых мощностей частота вращения дизеля поддерживается постоянной и соответствует установленной для режима холостого хода (таблица 3.1). Нагрузка на дизель тепловоза также поддерживается постоянной (тормозной компрессор и вентилятор охлаждающего устройства не работают).

Стабилизация цилиндровых мощностей выполняется в следующем порядке. Измеряется средняя продолжительность топливоподачи по цилиндрам $\varphi_{\text{т}}$. Последовательно на короткое время отключается подача топлива по цилиндрам

дизеля в порядке их нумерации на дизеле и оценивается $\Delta\varphi_{ti}$ по формуле (6). В результате последовательного отключения каждого из цилиндров получается шесть значений $\Delta\varphi_{ti}$, которые затем сравниваются между собой. Если разница между значениями $\Delta\varphi_{ti}$ превышает 0,1 град. п.к.в., то начинается процесс выравнивания нагрузок. В цилиндр или цилиндры, в результате отключения которых получено наименьшее значение $\Delta\varphi_{ti}$, увеличивается подача топлива. В цилиндр или цилиндры, в результате отключения которых получено наибольшее значение $\Delta\varphi_{ti}$, уменьшается подача топлива. Затем процедура отключения цилиндров, сравнения величин $\Delta\varphi_{ti}$ и регулировки подачи топлива повторяется до тех пор, пока разница между значениями $\Delta\varphi_{ti}$ не достигнет значения 0,1 град. п.к.в., что обусловлено тем, что при этом величины ΔP_{cil} и ΔT_g находятся в пределах от 1,0 до 1,8 кВт и от 9 до 12 °С соответственно. Указанные значения ΔP_{cil} и ΔT_g получены по результатам стабилизации цилиндрических мощностей дизельных двигателей тепловозов ТЭМ18ДМ №№ 883 и 1022 экспериментальным методом и являются достаточными для обеспечения равномерного распределения цилиндрических мощностей дизеля.

Если при регулировке разница между значениями $\Delta\varphi_{ti}$ не достигнет значения 0,1 град. п.к.в., то стабилизация цилиндрических мощностей прекращается, возвращаются прежние поправки к цикловой подаче топлива и к углу опережения подачи топлива по цилиндрам дизеля.

4.4 Вывод по разделу 4

По результатам рассмотрения методов стабилизации цилиндрических мощностей следует, что расчетный метод существенно сократить временные затраты на проведение работ благодаря тому, что поправки к количеству поданного топлива по цилиндрам для стабилизации их цилиндрических мощностей рассчитываются программным путем, а не подбираются вручную оператором.

Экспериментальная проверка, выполненная на стендовом дизель-генераторе

1-ПДГ4Д, показала, что затраты времени при использовании алгоритма стабилизации цилиндрических мощностей расчетным методом составили 5 мин., а при применении алгоритма стабилизации цилиндрических мощностей экспериментальным методом – 45 минут.

5 АЛГОРИТМЫ СТАБИЛИЗАЦИИ ЦИЛИНДРОВЫХ МОЩНОСТЕЙ ДИЗЕЛЬНОГО ДВИГАТЕЛЯ 1-ПД4Д С ЭЛЕКТРОННОЙ СИСТЕМОЙ УПРАВЛЕНИЯ ПОДАЧЕЙ ТОПЛИВА

На основе расчетного и экспериментального методов стабилизации цилиндровых мощностей дизеля 1-ПД4Д с ЭСУВТ.01 составлены алгоритмы, представленные в виде блок-схем:

- А3 - алгоритм сравнения величин приращений топливоподачи по цилиндрам дизеля;
- А4 - алгоритм стабилизации цилиндровых мощностей дизеля экспериментальным методом;
- А5 - алгоритм стабилизации цилиндровых мощностей дизеля расчетным методом.

5.1 Алгоритм сравнения величин приращений топливоподачи по цилиндрам дизельного двигателя

Блок №1. Измерение и фиксация в памяти БУ средней продолжительности топливоподачи φ_T по цилиндрам дизеля (рисунок 5.1).

Блоки №2 – 8. Операции последовательного отключения и включения в работу отдельных цилиндров дизеля. После отключения каждого цилиндра дизеля измеряется φ_{Ti} . Перед каждым отключением цилиндра дизеля выполняется алгоритм А1, приведенный на рисунке 3.2.

Блок №9. Присвоение значений величин φ_{Ti} соответствующим номерам цилиндров, при отключении которых происходил замер.

Блок №10. Вычисление величины $\Delta\varphi_{Ti}$ для каждого цилиндра дизеля.

Блок №11. Сравнение величин $\Delta\varphi_{Ti}$ между собой.

Блок №12. Определение цилиндров с минимальным $\Delta\varphi_{Ti \min}$ и максимальным $\Delta\varphi_{Ti \max}$ значением приращения топливоподачи.

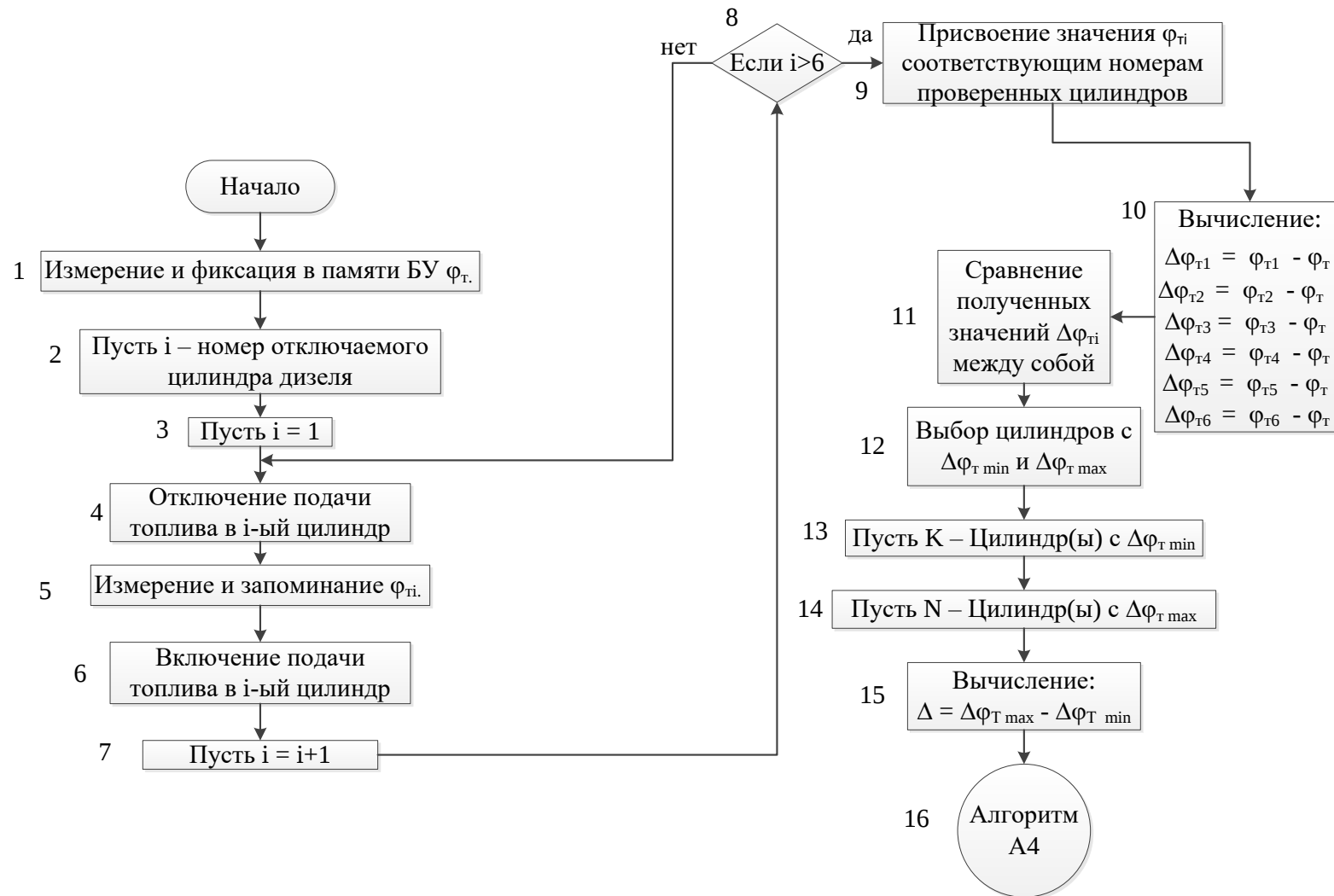


Рисунок 5.1 Блок-схема алгоритма сравнения величин приращений топливopодач по цилиндрам дизеля

Блок №13. Присвоение кода К цилиндру с минимальным значением приращения топливоподачи $\Delta\varphi_{ti \min}$. Если два или более цилиндров имеют равные минимальные значения приращений топливоподачи, то каждому из них присваивается код К.

Блок №14. Присвоение кода N цилиндру с максимальным значением приращения топливоподачи $\Delta\varphi_{ti \max}$. Если два и более цилиндров имеют равные значения $\Delta\varphi_{ti \max}$, то каждому из них присваивается код N.

Блок №15. Определение разности Δ между значениями $\Delta\varphi_{ti}$ цилиндров N и К.

Блок №16. Переход к алгоритму А4.

5.2 Алгоритм стабилизации цилиндрических мощностей дизеля экспериментальным методом

Блок №1. Если выполняется условие $\Delta \leq 0,1$, то выравнивания приращений топливоподачи по цилиндрам дизеля производить не требуется и дальнейшие работы прекращаются (рисунок 5.2).

Блок №2. Увеличение продолжительности топливоподачи по цилиндру (цилиндрам) с кодом К на 5 %.

Блоки №3 - 6 Операции последовательного увеличения БУ количества поданного топлива $q_{ц}$ в цилиндр(ы) К на 5 % при невыполнении условия $\Delta \leq 0,1$. После каждого увеличения топливоподачи $q_{ц}$ следует выполнение алгоритма А3 и определения нового значения Δ . Если после увеличения топливоподачи $q_{ц}$ в цилиндр (цилиндры) N на 20 % условие $\Delta \leq 0,1$ все еще не выполняется, то следует переход к блоку №7. При выполнении указанного условия на любом этапе техническое диагностирование прекращается с сохранением сделанных поправок к продолжительности топливоподачи $q_{ц}$ по цилиндрам.

Блоки №7 - 10 Операции последовательного уменьшения БУ количества поданного топлива $q_{ц}$ в цилиндр(ы) N на 5 % в случае, если условие $\Delta \leq 0,1$ не

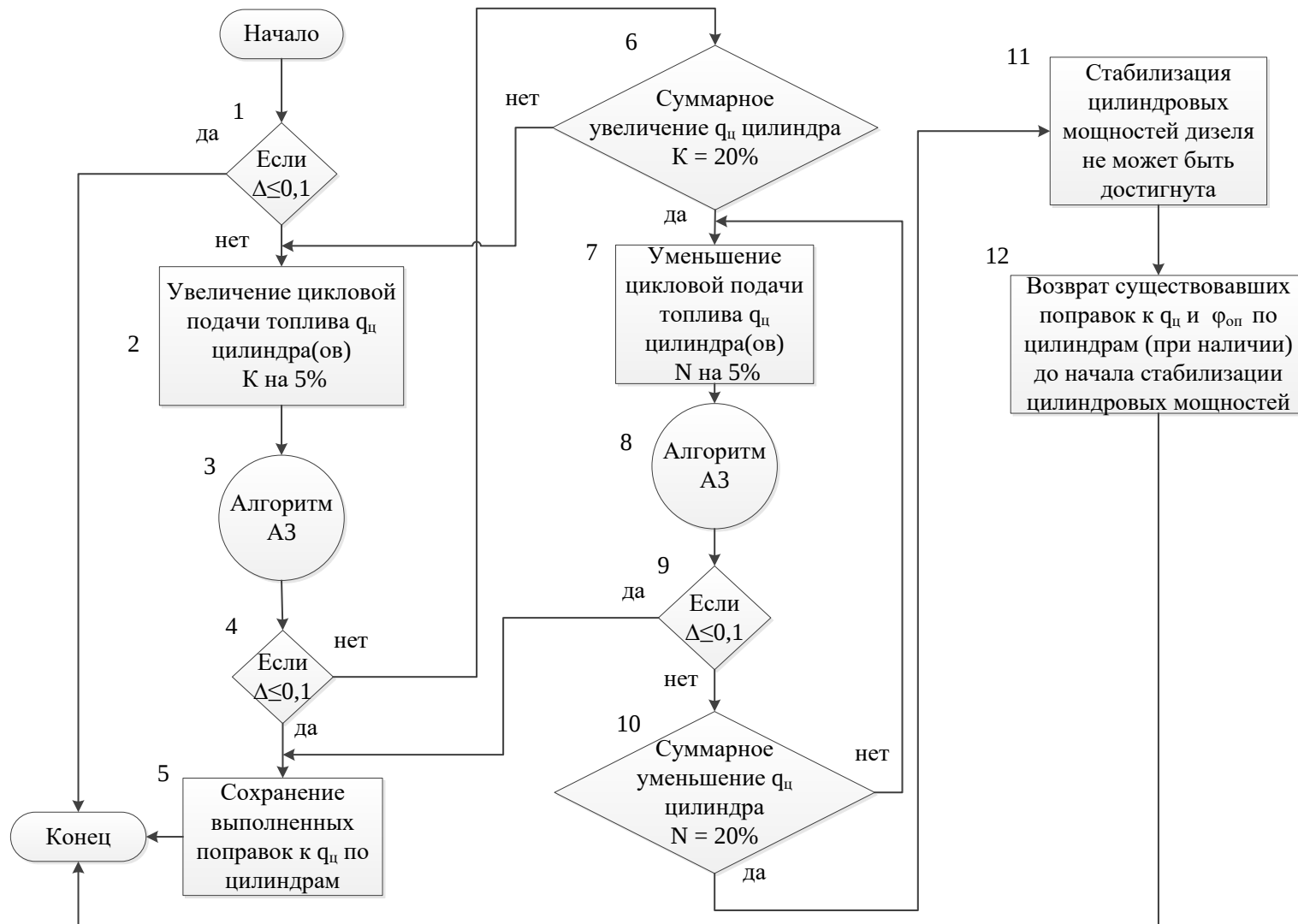


Рисунок 5.2 Блок-схема алгоритма стабилизации цилиндровых мощностей дизеля экспериментальным методом

выполняется. После каждого уменьшения топливоподачи $q_{ц}$ следует выполнение алгоритма АЗ и определение нового значения Δ .

Блоки №11 и №12 Если условие $\Delta \leq 0,1$ не выполняется, то стабилизация цилиндровых мощностей дизельного двигателя не может быть достигнуто, после чего возвращаются поправки к продолжительности топливоподачи $q_{ц}$ по цилиндрам, существовавшие до начала технического диагностирования работы цилиндров дизеля.

5.3 Алгоритм стабилизации цилиндровых мощностей дизельного двигателя расчетным методом

Блок №1. Проведение алгоритма АЗ (рисунок 5.1).

Блок №2. Если выполняется условие $\Delta \leq 0,1$, то выравнивания приращений топливоподач по цилиндрам дизельного двигателя производить не требуется и дальнейшие работы прекращаются.

Блок №3. Запись в программу, выполняющую стабилизацию цилиндровых мощностей величин $\Delta\varphi_{ti}$, полученных по результатам проведения алгоритма АЗ.

Блок №4. Расчет программой поправок к топливоподаче $q_{ц}$ по цилиндрам, необходимых для выравнивания нагрузок.

Блок №5. Присвоение поправок к топливоподаче $q_{ц}$ соответствующим цилиндрам.

Блоки №6 - 8 Если условие $\Delta \leq 0,1$ не выполняется, то выдается сообщение: на экран БУ «Стабилизация цилиндровых мощностей дизеля не может быть достигнута», после чего возвращаются поправки к продолжительности топливоподачи $q_{ц}$ по цилиндрам, существовавшие до начала технического диагностирования работы цилиндров дизеля.

Блок №9. При выполнении условия $\Delta \leq 0,1$ стабилизация цилиндровых мощностей прекращается с сохранением сделанных поправок к продолжительности топливоподачи $q_{ц}$ по цилиндрам.

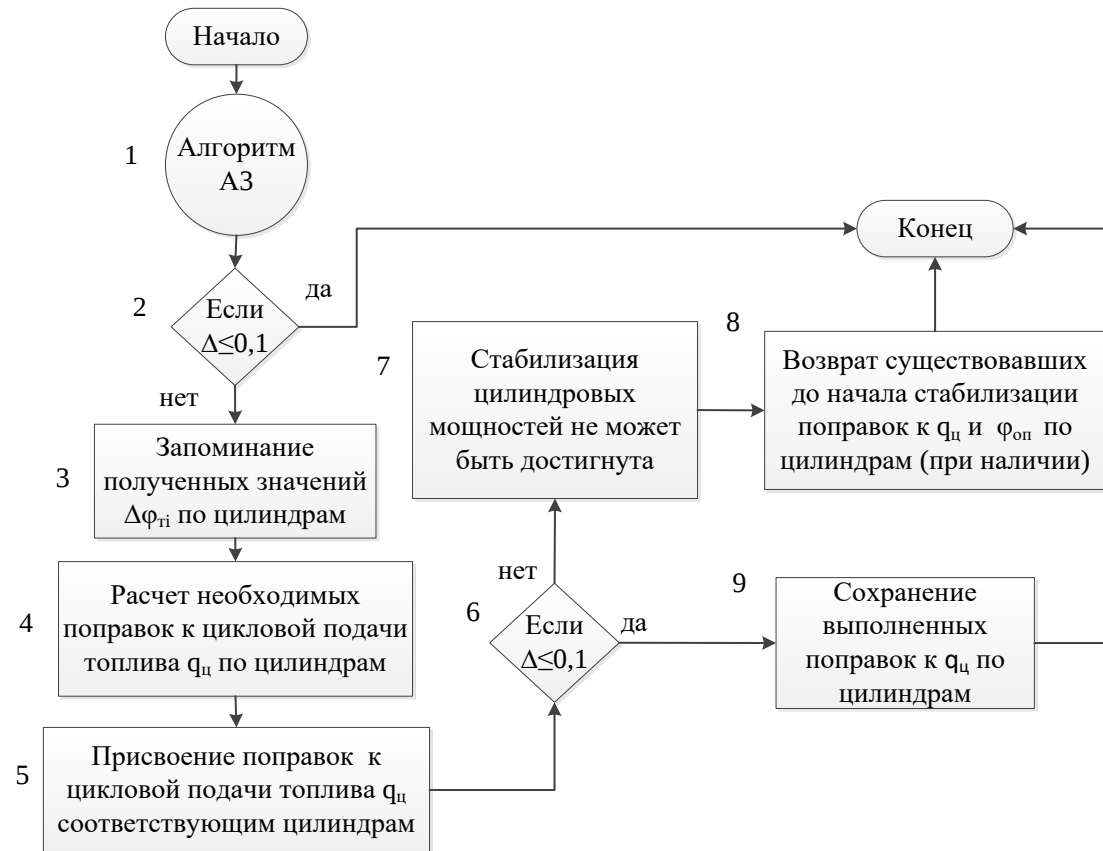


Рисунок 5.3 Блок-схема алгоритма стабилизации цилиндрических мощностей расчетным методом

5.4 Вывод по разделу 5

Разработаны алгоритмы стабилизации цилиндрических мощностей дизеля 1-ПД4Д тепловоза ТЭМ18ДМ с электронной системой управления подачей топлива ЭСУВТ.01, основанные на расчетном и экспериментальном методах. При стабилизации цилиндрических мощностей выполняется алгоритм сравнения величин приращений топливоподачи по цилиндрам дизеля, затем алгоритм стабилизации цилиндрических мощностей расчетным или экспериментальным методом.

6 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА АЛГОРИТМОВ СТАБИЛИЗАЦИИ ЦИЛИНДРОВЫХ МОЩНОСТЕЙ ДИЗЕЛЬНОГО ДВИГАТЕЛЯ 1-ПД4Д С ЭЛЕКТРОННОЙ СИСТЕМОЙ УПРАВЛЕНИЯ ПОДАЧЕЙ ТОПЛИВА

Проверка алгоритмов стабилизации цилиндровых мощностей по расчетному и экспериментальному методам проведена по согласованной с ОАО «Пензадизельмаш» и ООО «ППП «Дизельавтоматика» методике на стендовом дизель-генераторе 1-ПДГ4Д № 001 ДЛ с электронной системой управления подачей топлива ЭСУВТ.01 (рисунок 6.1), установленном в дизельной лаборатории ОАО «Пензадизельмаш». Титульный и второй листы Программы и методики проверки балансировки нагрузок цилиндров дизеля 1-ПД4Д с электронной системой управления подачей топлива представлены в Приложении Г. Материалы проверки отражены в Акте, приведенном в Приложении Д.



Рисунок 6.1 - Общий вид стендового дизель-генератора 1-ПДГ4Д с ЭСУВТ.01

Стабилизация цилиндровых мощностей дизеля экспериментальным методом проведено на тепловозах:

- ТЭМ18ДМ №1022 в условиях сервисного локомотивного депо Тверь ООО «ЛокоТех-Сервис» филиала «Северо-Западный после проведения

тепловозу технического обслуживания ТО-3. Материалы проверки отражены в Акте, приведенном в Приложении Е;

- ТЭМ2УМ №1033 в условиях АО «Даугавпилсский локомотиворемонтный завод» после проведения тепловозу капитального ремонта. Материалы проверки отражены в Акте, приведенном в Приложении Ж.

В качестве исходных данных при стабилизации цилиндровых мощностей на стендовом дизель-генераторе в качестве использовались данные БУ ЭСУВТ.01, записанные с помощью сервисной программы Inject Service. Для проверки расчетного метода кандидатом технических наук Поварковым Игорем Леонидовичем была разработана программа в MS «Excel», в которой осуществлялся расчет необходимых поправок к топливоподаче по цилиндрам дизеля. При использовании обоих методов поправки к количеству поданного топлива по цилиндрам вводились в БУ посредством сервисной программы Inject Service. Перечень необходимых параметров системы ЭСУВТ.01 для проведения стабилизации цилиндровых мощностей по обоим методам представлен в таблице 6.1.

Таблица 6.1 - Исходные данные для стабилизации цилиндровых мощностей и их необходимая точность

№ п/п	Наименование параметра	Расчетный метод	Экспериментальный метод
1	Частота вращения коленчатого вала дизеля, мин ⁻¹	±1	±1
2	Средняя по цилиндрам длительность топливоподачи, %	±3	±6
3	Фактическая длительность подачи топлива в каждый цилиндр дизеля, %	±3	Параметр не используется
4	Длительность отключения цилиндра дизеля, сек	не менее 40	не менее 15
5	Длительность измерения каждого параметра, сек	не менее 30	не менее 10

Поскольку БУ не выдает информации о фактической продолжительности подачи топлива в каждый цилиндр дизеля, то при проверке расчетного метода

использованы данные средней по цилиндрам длительности топливоподачи, рассчитываемые БУ ЭСУВТ.01.

6.1 Результаты проверки алгоритмов стабилизации цилиндрических мощностей на стендовом дизель-генераторе

По результатам проверки алгоритма стабилизации цилиндрических мощностей расчетным методом установлено:

- перераспределение индикаторных мощностей по цилиндрам при сохранении разности мощностей 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 установлено:

- снижение разности индикаторных мощностей по цилиндрам 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 по обоим методам не привела к заметному снижению часового расхода топлива стендовым дизель-генератором.

6.2 Результаты проверки алгоритма стабилизации цилиндрических мощностей на дизеле тепловоза

По результатам проверки алгоритма стабилизации цилиндрических мощностей экспериментальным методом на дизеле тепловоза ТЭМ18ДМ №1022 установлено:

- снижение разницы индикаторных 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;

- снижение жесткости процесса сгорания топлива по цилиндрам с 0,30 МПа/град. п.к.в. до 0,09 МПа/град. п.к.в.

Таким образом, мощности каждого цилиндра дизеля стабилизировались, и уменьшилась жесткость процесса сгорания топлива.

Результаты стабилизации цилиндрических мощностей отражены на рисунках 6.2 - 6.4.

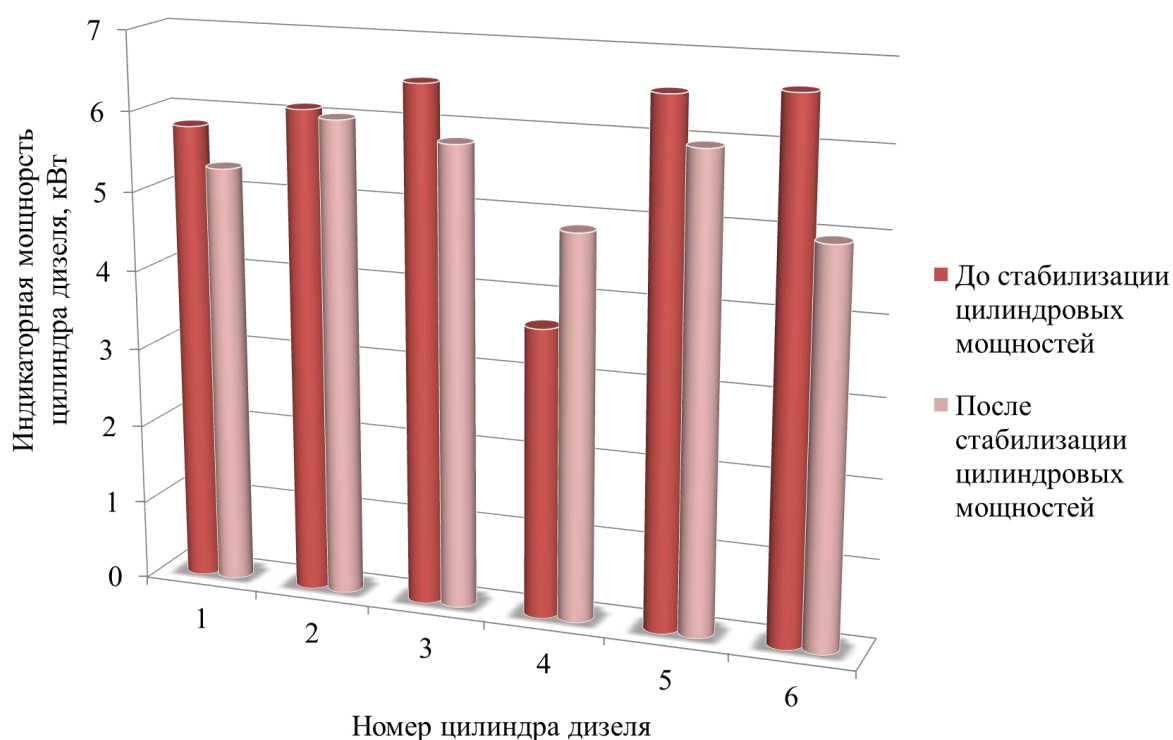


Рисунок 6.2 Распределение индикаторных мощностей по цилиндрам дизель-генератора тепловоза ТЭМ18ДМ №1022 до и после их стабилизации

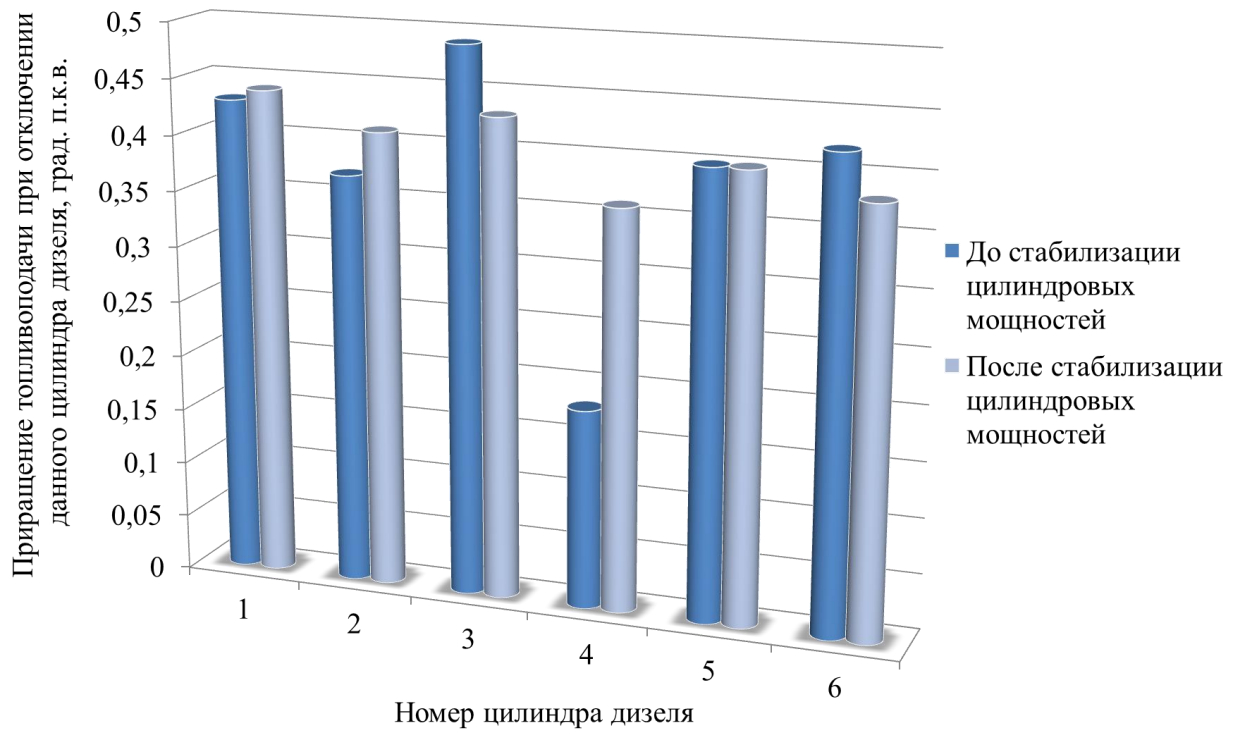


Рисунок 6.3 Изменение значений приращения топливоподачи при отключении цилиндров дизель-генератора тепловоза ТЭМ18ДМ №1022 до и после стабилизации цилиндровых мощностей

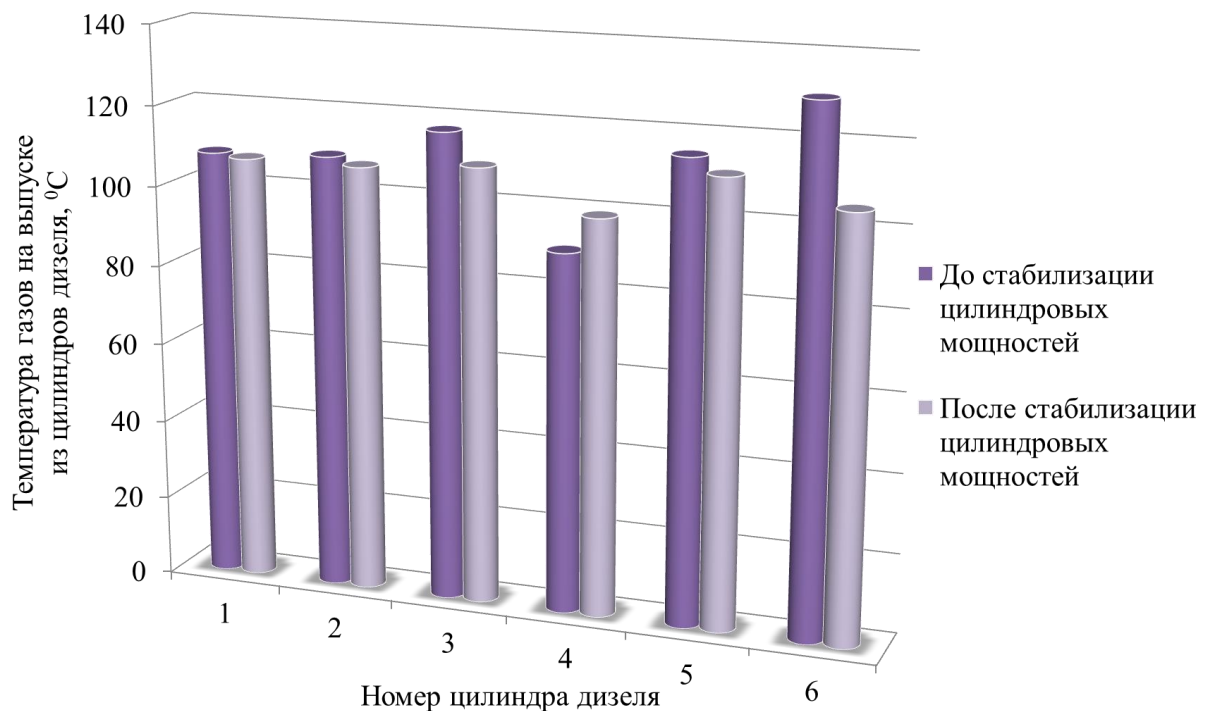


Рисунок 6.4 Распределение температур газов на выпуске из цилиндров дизель-генератора тепловоза ТЭМ18ДМ №1022 до и после стабилизации цилиндровых мощностей

6.3 Выводы по разделу 6

1 В результате применения алгоритма стабилизации цилиндрических мощностей экспериментальным методом достигнуто снижение разницы индикаторных мощностей по цилиндрам на 0,7 кВт на стендовом дизель-генераторе и на 2,0 кВт на дизеле тепловоза ТЭМ18ДМ.

2 В результате применения алгоритма стабилизации цилиндрических мощностей расчетным методом получено перераспределение индикаторных мощностей по цилиндрам стендового дизель-генератора с сохранением разницы мощностей, равной 2,2 кВт.

3 Расчетный метод стабилизации цилиндрических мощностей требует уточнения величины изменения индикаторного КПД при варьировании количества поданного в цилиндр топлива, а также величин отличия механических потерь по отдельным цилиндрам дизеля.

7 ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРЕДЛАГАЕМЫХ МЕРОПРИЯТИЙ

Система ЭСУВТ.01 позволяет снизить частоту вращения вала дизеля на холостом ходу до 240 мин^{-1} . При работе на данном режиме неравномерность индикаторных мощностей по цилиндрам 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 тепловозом на холостом ходу.

Устранение различия цилиндрических мощностей дизеля достигается регулировкой дизеля при проведении реостатных испытаний тепловоза после проведения текущих ремонтов ТР-2, ТР-3, СР [48]. Однако в интервале эксплуатации до ТР-2 [8] 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 цилиндрических мощностей по цилиндрам после проведения каждого ТО-3 и ТР-1. Это позволит поддерживать равномерность распределения индикаторных мощностей по цилиндрам, повысит время работы дизеля на пониженной частоте вращения коленчатого вала и экономию топлива тепловозом в эксплуатации.

Оценка экономической эффективности использования алгоритмов технического диагностирования и стабилизации цилиндрических мощностей дизеля с ЭСУВТ.01 выполнена для парка из двадцати локомотивов в соответствии с методическими рекомендациями [64, 65] в интервале эксплуатации тепловозов с ЭСУВТ.01 в течение срока службы системы 15 лет.

Исходные данные для расчета экономической эффективности от использования алгоритмов технического диагностирования и стабилизации цилиндрических мощностей на дизеле с ЭСУВТ.01 представлены в таблице 7.1.

Средние нормы периодичности проведения ТО и ТР тепловозу ТЭМ18ДМ заданы согласно [8].

Таблица 7.1 - Исходные данные для расчета технико-экономической эффективности от использования разработанных алгоритмов

№ п/п	Наименование величины	Обозначение	Единица измерения	Значение	Источник получения
1	Парк локомотивов ТЭМ18ДМ с ЭСУВТ.01	A	единицы	20	АСУТ-ЦТ
2	Стоимость программы для БУ ЭСУВТ.01, выполняющей техническое диагностирование и стабилизацию цилиндровых мощностей дизеля	K _{по}	рубли	100000	Наряд-заказ АО «ВНИИЖТ»
3	Горизонт расчета	T _{гр}	годы	15,0	[66]
4	Часовая тарифная ставка мастера реостатных испытаний выполняющего техническое диагностирование и стабилизацию цилиндровых мощностей	З	рубли	113,03	Тарифно-квалификационный справочник
5	Отчисления в пенсионный фонд, фонд занятости, социального страхования и обязательного медицинского страхования [56]	K ₁	рубли	34,1	НК РФ
6	Отчисления, учитывающие размер надбавок и премий [56]	K ₂	рубли	70,0	
7	Норма времени на проведение технического диагностирования и стабилизацию цилиндровых мощностей дизеля с ЭСУВТ.01	t	часы	0,75	Приложение Ж
8	Цена одной тонны дизельного топлива	Ц _т	рубли	40615	Росжелдор снаб
9	Часовой расход топлива тепловозом ТЭМ2 (ТЭМ18ДМ) с ЭСУВТ.01 на холостом ходу при частоте вращения 300 мин ⁻¹ .	G _{ч1}	кг/час	6,91	Акт испытаний
10	Часовой расход топлива тепловозом ТЭМ2 (ТЭМ18ДМ) с ЭСУВТ.01 на холостом ходу при частоте вращения 240 мин ⁻¹ .	G _{ч2}	кг/час	5,37	Акт испытаний
11	Число ремонтов КР в интервале горизонта расчета	n _{кр}	единицы	1	АСУТ-ЦТ
12	Число ремонтов СР в интервале горизонта расчета	n _{ср}	единицы	1	АСУТ-ЦТ
13	Число ремонтов ТР-1 в интервале горизонта расчета	n _{тр-1}	единицы	8	АСУТ-ЦТ
14	Число ремонтов ТР-2 в интервале горизонта расчета	n _{тр-2}	единицы	4	АСУТ-ЦТ
15	Число ремонтов ТР-3 в интервале горизонта расчета	n _{тр-3}	единицы	2	АСУТ-ЦТ
16	Число технических обслуживаний ТО-3 в интервале горизонта расчета	n _{то-3}	единицы	130	АСУТ-ЦТ
17	Время работы тепловоза на режиме пониженной частоты вращения коленчатого вала дизеля (240 мин ⁻¹) при выравнивании нагрузок	τ	часы	1	Приложение Ж

Количество капитальных ремонтов в интервале $T_{гр}$ определялось по формуле:

$$n_{кр} = \frac{T_{гр}}{T_{кр}}, \quad (33)$$

где $T_{кр}$ – периодичность проведения ремонтов КР в интервале $T_{гр}$, лет.

Количество средних ремонтов в интервале $T_{гр}$ определялось по формуле:

$$n_{ср} = \frac{T_{гр}}{T_{ср}} - n_{кр}, \quad (34)$$

где $T_{ср}$ – периодичность проведения ремонтов СР в интервале $T_{гр}$, лет.

Количество текущих ремонтов ТР-3 в интервале $T_{гр}$ определялось по формуле:

$$n_{тр-3} = \frac{T_{гр}}{T_{тр-3}} - n_{кр} - n_{ср}, \quad (35)$$

где $T_{тр-3}$ – периодичность проведения ремонтов СР в интервале $T_{гр}$, лет.

Количество текущих ремонтов ТР-2 в интервале $T_{гр}$ определялся по формуле:

$$n_{тр-2} = \frac{T_{гр}}{T_{тр-2}} - n_{кр} - n_{ср} - n_{тр-3}, \quad (36)$$

где $T_{тр-2}$ – периодичность проведения ремонтов ТР-2 в интервале $T_{гр}$, лет.

Количество текущих ремонтов ТР-1 в интервале $T_{гр}$ определялся по формуле:

$$n_{тр-1} = \frac{T_{гр}}{T_{тр-1}} - n_{кр} - n_{ср} - n_{тр-3} - n_{тр-2}, \quad (37)$$

где $T_{тр-1}$ – периодичность проведения ремонтов ТР-1 в интервале $T_{гр}$, лет.

Количество текущих обслуживаний ТО-3 в интервале $T_{гр}$ определялось по формуле:

$$n_{то-3} = \frac{T_{гр}}{T_{то-3}} - n_{кр} - n_{ср} - n_{тр-3} - n_{тр-2} - n_{тр-1}, \quad (38)$$

где $T_{то-3}$ – периодичность проведения обслуживаний ТО-3 в интервале $T_{гр}$, лет.

Время нахождения тепловоза в работе определялось по формуле:

$$T_p = T_k \cdot K_{тг}, \quad (39)$$

где $K_{\text{ТГ}}$ – коэффициент технической готовности, принятый равным 0,9;
 T_k – годовой бюджет времени тепловоза, который составляет 8760 часов.

Время работы тепловоза на режиме холостого хода ($T_{\text{ХХ}}$) в году составляет 5518 часов (70 % от T_p).

Годовые расходы на техническое диагностирование и выравнивание нагрузок по цилиндрам дизеля определялись по формуле:

$$U = (n_{\text{ТО-3}} + n_{\text{ТР-1}}) \cdot (t \cdot 3 \cdot \left(1 + \frac{K_1}{100}\right) \cdot \left(1 + \frac{K_2}{100}\right) + G_{\text{Ч2}} \cdot \tau \cdot \frac{\text{Ц}_\text{Т}}{1000})), \quad (40)$$

где 3 – часовая тарифная ставка мастера реостатных испытаний выполняющего техническое диагностирование и стабилизацию цилиндрических мощностей, руб.; t – норма времени на проведение технического диагностирования и стабилизацию цилиндрических мощностей дизеля с ЭСУВТ.01, час; K_1 – отчисления в пенсионный фонд, фонд занятости, социального страхования и обязательного медицинского страхования, руб.; K_2 – отчисления, учитывающие размер надбавок и премий, руб.; $\text{Ц}_\text{Т}$ – цена одной тонны дизельного топлива, руб.; $G_{\text{Ч2}}$ – часовой расход топлива тепловозом ТЭМ2 на режиме пониженной частоты вращения коленчатого вала дизеля холостого хода, кг/час; τ – время работы тепловоза на режиме пониженной частоты вращения коленчатого вала дизеля при стабилизации цилиндрических мощностей, час.

По данным расшифровки данных бортовых регистраторов тепловозов, оборудованных ЭСУВТ.01 установлено, что время работы на режиме пониженной частоты вращения коленчатого вала составляет 80 % от общего времени работы на холостом ходу. Это связано с тем, что в связи с повышенной вибрацией в кабине машинисты переводят дизель на штатные обороты холостого хода 300 мин⁻¹. С учетом этого перерасход топлива в год рассчитывался по формуле:

$$\Delta G_{\text{Ч}} = (G_{\text{Ч1}} - G_{\text{Ч2}}) \cdot (T_{\text{ХХ}} \cdot 0,2), \quad (41)$$

В денежном эквиваленте годовой перерасход топлива рассчитывался по формуле:

$$U_T = (\Delta G_{\text{ч}} \cdot \text{Ц}_T), \quad (42)$$

Стабилизация цилиндрических мощностей дизеля после проведения каждого ТО-3 и ТР-1 позволяет повысить вдвое продолжительность работы дизеля тепловоза на пониженной частоте вращения коленчатого вала дизеля и снизить перерасход топлива в эксплуатации.

$$\Delta U_T = \frac{U_T}{2}, \quad (43)$$

Экономия эксплуатационных расходов за внедрения алгоритмов технического диагностирования и стабилизации цилиндрических мощностей рассчитывался по формуле:

$$P = (\Delta U_T \cdot T_{\text{гр}}) - (U \cdot T_{\text{гр}}), \quad (44)$$

Затраты на поддержку программного обеспечения, посредством которого выполняется техническое диагностирование и стабилизация цилиндрических мощностей, за срок эксплуатации системы ЭСУВТ.01 определялись по формуле:

$$З = T_{\text{гр}} \cdot (K_{\text{по}} + 0,1 \cdot K_{\text{по}}), \quad (45)$$

где $K_{\text{по}}$ – стоимость программного обеспечения, выполняющего техническое диагностирование и стабилизацию цилиндрических мощностей.

Экономический эффект за счет использования алгоритмов технического диагностирования и стабилизации цилиндрических мощностей дизеля в интервале эксплуатации тепловоза $T_{\text{гр}}$ рассчитывался по формуле:

$$\mathcal{E} = (P - З) \cdot (1 - K_{\text{п}}), \quad (46)$$

где $K_{\text{п}}$ – налог на прибыль, равный 20 %; $З$ – затраты за срок службы системы ЭСУВТ.01, руб; P – экономия эксплуатационных расходов за внедрения алгоритмов технического диагностирования и стабилизации цилиндрических мощностей, руб.

Экономический эффект за счет использования алгоритмов технического диагностирования и стабилизации цилиндрических мощностей дизеля в интервале

эксплуатации $T_{гр}$ парка тепловозов ТЧЭ-4 Бологовское рассчитывался по формуле:

$$\mathcal{E}_A = ((\Delta U_T \cdot 15) - 3) \cdot A, \quad (47)$$

Срок окупаемости алгоритмов технического диагностирования и стабилизации цилиндровых мощностей дизеля рассчитывался по формуле:

$$T_{ок} = \frac{3}{P}, \quad (48)$$

Результаты расчета экономического эффекта приведены в таблице 7.2.

Таблица 7.2 - Результаты расчета технико-экономической эффективности применения разработанных алгоритмов на дизелях 1-ПД4Д с ЭСУВТ.01

№ п/п	Наименование величины	Обозначение	Единица измерения	Значение
1	Годовой бюджет времени работы тепловоза	T_p	часы	7884
2	Эксплуатационные расходы при техническом диагностировании и стабилизации цилиндровых мощностей на один тепловоз в год	U	руб.	3701
3	Годовой перерасход топлива одним тепловозом в эксплуатации до использования алгоритмов технического диагностирования и стабилизации цилиндровых мощностей	ΔG	кг	1699
4	Затраты, понесенные вследствие перерасхода топлива в эксплуатации тепловоза за один год	U_T	руб.	69028
5	Экономия эксплуатационных расходов за счет применения алгоритмов технического диагностирования и стабилизации цилиндровых мощностей на двадцати тепловозах ТЧЭ-4 Бологовское за срок службы ЭСУВТ.01	P	руб.	462183
6	Затраты на поддержку программного обеспечения в течение срока службы системы ЭСУВТ.01	$З$	млн. руб.	1,3
7	Экономический эффект за счет использования алгоритмов технического диагностирования и стабилизации цилиндровых мощностей в интервале эксплуатации двадцати тепловозов ТЭМ18ДМ приписки ТЧЭ-4 Бологовское в течение срока службы системы ЭСУВТ.01	$\mathcal{E}$	млн. руб.	13,6
8	Годовой экономический эффект за счет использования алгоритмов технического диагностирования и стабилизации цилиндровых мощностей в интервале эксплуатации двадцати тепловозов ТЭМ18ДМ приписки ТЧЭ-4 Бологовское в течение срока службы системы ЭСУВТ.01	$\mathcal{E}_A$	млн. руб.	4,35
9	Срок окупаемости предложенных технических решений	$T_{ок}$	годы	0,65

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе на основе проведенных исследований решена актуальная научно-практическая задача повышения экономичности работы дизеля 1-ПД4Д с ЭСУВТ.01 на режиме холостого хода стабилизацией цилиндровых мощностей. Основные результаты, выводы и практические рекомендации заключаются в следующем:

1 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;

2 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;

3 разработаны и апробированы методы технического диагностирования работы цилиндров дизеля, позволяющие уточнить причину отказа цилиндра;

4 разработан расчетный и экспериментальный методы стабилизации цилиндровых мощностей дизеля 1-ПД4Д с ЭСУВТ.01 на режиме холостого хода;

5 на основе разработанных методов составлены алгоритмы технического диагностирования работы цилиндров и стабилизации цилиндровых мощностей дизеля;

6 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;

7 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;

8 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 цилиндровых 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;

9 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 цилиндровых 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 сокращений и условных обозначений

БУ	- блок управления
в.м.т.	- верхняя мёртвая точка
град.	- градусы
зав. №	- заводской номер
КПД	- коэффициент полезного действия
п.к.в.	- поворот коленчатого вала дизеля
ТНВД	- топливный насос высокого давления
ТО	- техническое обслуживание
ТР	- текущий ремонт
ЭТНВД	- электроуправляемый топливный насос высокого давления
ЭСУВТ.01	- система электронного управления подачей топлива производства ООО «ППП Дизельавтоматика» модификаций ЭСУВТ.01-06-00, ЭСУВТ.01-06-01 и ЭСУВТ.01-06-02, установленная на дизельные двигатели ПД1М и 1-ПД4Д тепловозов ТЭМ2 и ТЭМ18ДМ
ЭСУВТ.02	- система электронного управления подачей топлива производства ООО «ППП Дизельавтоматика», установленная на дизельные двигатели K6S310DR тепловозов ЧМЭЗ
Common Rail	- система электронного управления подачей топлива с общей рампой высокого давления и электроуправляемыми форсунками

Список литературы

1. Стратегия научно-технического развития холдинга «Российские железные дороги» на период до 2020 года и перспективу до 2025 года «Белая книга», 2015. - 64 с.
2. Мозговой К. Топливо влетает в копейчку [Электронный ресурс] / К. Мозговой // Гудок. – 2019. - № 81. – Режим доступа: <https://www.gudok.ru>.
3. Стратегия научно-технического развития холдинга «Российские железные дороги» на период до 2025 года и перспективу до 2030 года «Белая книга», 2018. - 128 с.
4. Гапанович В. А. Энергосбережение на железнодорожном транспорте: Справочно-методическое издание / В. А. Гапанович. – М.: «Интехэнерго-Издат», «Теплоэнергетик», 2014. – 304 с.
5. Техническое заключение по результатам мониторинга эксплуатации тепловоза ТЭМ18ДМ №642, оборудованного системой ЭСУВТ.01: отчет о НИР / Антюхин Г. Г. – М.: Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта, 2014. – 201 с.
6. Холяпин, М. В. Регистратор параметров работы тепловоза / М. В. Холяпин [и др.] // Железнодорожный транспорт. - 2005. - №9. – С. 30-35.
7. Кузькин В. Г. Регулировка дизелей промысловых судов / В. Г. Кузькин, А. А. Минько. - М.: Агропромиздат, 1988. - 255 с.
8. Тепловоз ТЭМ18ДМ. Руководство по эксплуатации. Часть 3. Инструкция по техническому обслуживанию и текущему ремонту ТЭМ18ДМ РЭ2, 2012. - 214 с.
9. Антюхин Г. Г. Совершенствование схемы воздухообеспечения и агрегатов наддува тепловозных дизелей 10Д100: дис...канд. техн. наук: 05.22.07 / Антюхин Георгий Георгиевич. - М., 1992. - 172 с.
10. Лакин, И. К. Анализ режимов работы тепловозов 2ТЭ116У по данным бортовых МСУ / И. К. Лакин, В. А. Мельников, Д. И. Габа // Локомотив. – 2015. - № 5. – С. 34-36.

11. Костин А. К. и др. Работа дизелей в условиях эксплуатации: справочник / А. К. Костин. – Л.: Машиностроение, Ленинградское отделение, 1989. – 284 с.
12. Заславский, Г. Н. К вопросу исследования работы тепловозного двигателя Д50 на режиме холостого хода / Г. Н. Заславский // Труды Харьковского института инженеров транспорта имени С.М. Кирова. – 1961. – № 50. – С. 36-40.
13. Струнгарь, С. А. Исследование работы тепловозных дизелей с пониженной частотой вращения коленчатого вала на режиме холостого хода / С. А. Струнгарь, Е. Е. Коссов // Вестник транспорта Поволжья. - 2017. - № 3. – С. 49-53.
14. Струнгарь, С. А. Экспериментальная проверка метода выравнивания нагрузок цилиндров дизеля с электронным управлением подачей топлива / 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. Гогричиани. – М.: РАС. – 2019. – часть 1. – С. 122-128.
15. Разработка норм плотности плунжерных пар топливных насосов тепловозов ТЭ1 и ТЭ2 в эксплуатации: отчет о НИР / Гуревич А.Н. – М.: ЦНИИ МПС, 1952. – 76 с.
16. Поляков, В. Н. Повышение экономичности тепловозного двигателя и его моторесурса изменением режима охлаждения / В. Н. Поляков // Труды Харьковского института инженеров железнодорожного транспорта имени С. М. Кирова. –1961. – №50. – С. 78-87.
17. Пойда А. А. Влияние низких температур воздуха на работу тепловозных дизелей / А. А. Пойда, Н. А. Арыкин. - М.: ВЗИИТ, 1975. - 34 с.
18. Струнгарь, С. А. Современные системы впрыска топлива тепловозных дизелей / С. А. Струнгарь // Вестник ВНИИЖТ. – 2014. - №4. – С. 46-53.
19. Вернер, Н. Д. Улучшение работы тепловозных двигателей Д50 и Д100 на режимах холостого хода и малых нагрузок / Н. Д. Вернер // Труды Харьковского института инженеров железнодорожного транспорта имени С. М. Кирова. – 1961. – №46. – С. 133-140.

20. Кузнецов, Т. Ф. К вопросу создания топливной аппаратуры для форсированного двигателя типа Д50 / Т. Ф. Кузнецов, З. И. Сурженко, Т. Ф. Бобров // Труды Харьковского института инженеров железнодорожного транспорта им. С.М. Кирова. – 1961. – №50. – С. 52-58.
21. Марков, В. А., Фурман, В. В., Миронов, В. А. Экспериментальные исследования электронной системы управления топливоподачей тепловозного дизеля / В. А. Марков, В. В. Фурман, В. А. Миронов // Известия высших учебных заведений. - 2012. - №1. - С. 38-48.
22. Отчет №12 по испытаниям двигателя Д50 №24А по выбору наилучшего режима работы двигателя без нагрузки: отчет о НИР / Струнге Б. Н., Заславский Г. Н., Симсон А. Э. – Харьков: Харьковский завод транспортного машиностроения имени В.А. Малышева, 1951. – 78 с.
23. ТУ3129-052-24428398-2011. Система электронного управления подачей топлива ЭСУВТ. Технические условия: дата введения 2012-04-06.
24. Файнзильбер Э. М. Двигатели внутреннего сгорания (основы теории и элементы конструкции): курс лекций / Э. М. Файнзильбер. - М.: ВЗИИТ, 1961. - 74 с.
25. Результаты стендовых испытаний двигателя Д50 на сжиженном газе: отчет о НИР / Гуревич А.Н. - М.: ЦНИИ МПС, 1960. – 62 с.
26. Балакин В. И. Топливная аппаратура быстроходных дизелей / В. И. Балакин, А. Ф. Еремеев, Б. Н. Семенов. - Л.: Машиностроение, 1967. - 300 с.
27. Белявцев А.В. Топливная аппаратура автотракторных дизелей: конструктивные особенности и эксплуатация / А. В. Белявцев, А. С. Процеров. – М.: Росагропромиздат, 1988. – 233 с.
28. Топливные насосы дизелей Д49, 10Д100, 11Д45, 14Д40, ПД1М, К6S310DR: технологическая инструкция по техническому обслуживанию и текущему ремонту ТИ711. - М.: ПКБ ЦТ, 1991. - 149 с.
29. Федотов Г. Б. Топливные системы тепловозных дизелей. Ремонт, испытания, совершенствование / Г. Б. Федотов, Г. И. Левин. - М.: Транспорт, 1983. - 192 с.

30. Повышение стабильности топливоподачи и межремонтных сроков службы топливной аппаратуры дизелей типа Д100 с разработкой прогрессивных методов восстановления прецизионных деталей: отчет о НИР / Федотов Г. Б. – М.: ЦНИИ МПС, 1982. – 141 с.
31. Гуревич, А. Н. Особенности работы и регулировки топливной аппаратуры тепловозного дизеля 11Д45 / А. Н. Гуревич, Г. Б. Федотов, Е. Е. Коссов // Труды ЦНИИ МПС. - 1967. - Вып. 359. - С. 101-110.
32. Эксплуатационные испытания насосов двойного регулирования на дизелях 10Д100М с использованием однорежимных форсунок: отчет о НИР / Гизатуллин Р. К. – Гомель: Белорусский институт железнодорожного транспорта, 1992. – 22 с.
33. Исследование работоспособности и ремонтпригодности топливной аппаратуры дизелей типа Д49 с разработкой указаний по содержанию и регулировке в эксплуатации: отчет о НИР / Федотов Г. Б., Шевлягин В. П., Якунин В. Н. – М.: ЦНИИ МПС, 1980. – 89 с.
34. Попов В. Я. Восстановление топливной аппаратуры дизелей / В. Я. Попов, А. В. Евсиков. – М.: Военное издательство министерства обороны СССР, 1952. – 244 с.
35. Кузнецов, В. А. О влиянии характерных неисправностей форсунок на производительности топливоподающей системы дизеля типа Д100 / В. А. Кузнецов [и др.] // Проблемы повышения эффективности использования тепловозов на железных дорогах Казахстана. Тезисы докладов. – 1979. - №1. - С. 99-101.
36. Грехов Л. В. Топливная аппаратура дизелей с электронным управлением: учебно-практическое пособие / Л. В. Грехов. - М.: Легион - Автодата, 2009. – 176 с.
37. Родичев В. А. Устройство и техническое обслуживание легковых автомобилей: учебник водителя автотранспортных средств категории «В» / В. А. Родичев, А. А. Кива. – М.: Издательский дом «Академия», 2004. – 80 с.

38. Райф К. Современные системы впрыска топлива дизельных двигателей / К. Райф. - М.: ООО «Издательство «За рулем»», 2013. - 176 с.
39. Райф К. Системы управления дизельными двигателями (в кратком изложении) / К. Райф. - М.: ООО «Издательство «За рулем»», 2013. - 232 с.
40. Дизель Wartsila W6L20L. Руководство по эксплуатации. 2013.- 323 с.
41. Фурман В. В. Улучшение эксплуатационно-технических характеристик дизель-генераторов тепловозов путем создания и совершенствования систем управления: дис...д-ра техн. наук: 05.04.02 / Фурман Виктор Владимирович. – М., 2016. – 321 с.
42. Никитин А. М. Диагностирование электронных дизелей: учебное пособие / А. М. Никитин. – СПб.: ГМА им. С.О. Макарова, 2004. – 60 с.
43. Козлов В. П. Регулирование и испытание двигателей рыбопромысловых судов / В. П. Козлов. - Южно-Сахалинск: Южно-Сахалинское книжное издательство Сахалинского отделения, 1968. - 214 с.
44. Грехов Л. В. Конструкция, расчет и технический сервис топливоподающих систем дизелей / Л. В. Грехов, И. И. Габитов, А. В. Неговора. - М.: Легион - Автодата, 2013. - 292 с.
45. Система электронного управления подачей топлива ЭСУВТ.01. Руководство по эксплуатации / Саратов: ООО «ППП «Дизельавтоматика», 2012. - 83 с.
46. Комплекс производственный автоматизированных реостатных испытаний типа «Кипарис-5» [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.niitkd.com>
- Насырова Г.А. Модели государственного регулирования страховой деятельности [Электронный ресурс] / Г.А.Насырова // Вестник Финансовой академии. - 2003. - N 4. - Режим доступа: [http://vestnik.fa.ru/4\(28\)2003/4.html](http://vestnik.fa.ru/4(28)2003/4.html)
47. Пат. 2668509 Российская Федерация, МПК7 F 02 M 65/00. Стенд для испытания и регулировки электронно-управляемых топливных насосов высокого давления дизелей / Антюхин Г. Г., Струнгарь С. А., Ежевская Л. А.; заявитель и патентообладатель Науч.-ислед. ин-т железнодорожного транспорта. – № 2017139776; заявл. 15.11.17; опубл. 01.10.18. – 10 с.

48. Руководство по техническому обслуживанию и текущему ремонту тепловозов ТЭМ2, ТЭМ2 ИО. – М.: ПКБ ЦТ, 2004. - 310 с.
49. Сергеев, К. О. Диагностика форсунок высокооборотных судовых дизелей [Текст] / К. О. Сергеев, А. А. Панкратов // Вестник АГТУ. Серия: Морская техника и технология. – 2017. - №1. – С. 50-58.
50. Тепловоз ТЭМ-2: руководство по эксплуатации и обслуживанию ПО «Брянский машиностроительный завод». – М.: Транспорт, 1983. – 239 с.
51. Кузьмин Р. В. Техническое состояние и надежность судовых механизмов / Р. В. Кузьмин. - Л.: Судостроение, 1974. - 336 с.
52. Васькевич Ф. А. Повышение эффективности эксплуатации главных судовых дизелей методами регулирования и диагностики топливной аппаратуры / Ф. А. Васькевич. – Новороссийск: МГА имени адмирала Ф. Ф. Ушакова, 2009. – 174 с.
53. Никитин Е. А. Диагностирование дизелей / Е.А. Никитин [и др.]. - М.: Машиностроение, 1987. - 224 с.
54. Просвилов Ю. Е. Методы и средства технического диагностирования локомотивов: учеб.пособие по специальности 17.09 – Локомотивы / Ю.Е. Просвилов. – Самара: Самарский институт инженеров железнодорожного транспорта им. М.Т. Елизарова, 1991. - 60 с.
55. Рахматулин М. Д. Ремонт топливной аппаратуры тепловозного дизеля Д50 / Рахматулин. - М.: Трансжелдориздат, 1952. - 72 с.
56. Горин А. В. Методы контроля теплотехнического состояния охлаждающих устройств тепловозов в эксплуатации: дис. ... канд. техн. наук: 05.22.07/ Горин Антон Владимирович. – М., 2016. – 240 с.
57. Овчаренко, С. М. Основные положения создания системы бесконтактного теплового контроля систем и узлов тепловозов / С. М. Овчаренко, О. В. Балагин, Д. В. Балагин // Технологическое обеспечение ремонта и повышение динамических качеств железнодорожного подвижного состава: Материалы третьей всероссийской научно-технической конференции с международным участием в трех частях. - 2009. - Часть 1. - С.14-21.

- 58 Балагин, О. В. Моделирование процесса выделения теплоты в трубопроводе высокого давления топливной аппаратуры тепловозных дизелей / О. В. Балагин, Д. В. Балагин, Р. Ю. Якушин // Омский научный вестник. – 2014. - №1. – С. 89-92.
59. Варбанец, Р. А. Метод межградиентной минимизации Powell`64 в задачах мониторинга рабочего процесса судовых дизелей / Р. А. Варбанец [и др.] // Вестник АГТУ. Серия: Морская техника и технология. – 2017. - №4. – С. 49-61.
60. Варбанец Р. А. Диагностический контроль рабочего процесса судовых дизелей в эксплуатации: дис...д-ра техн. наук: 05.05.03 / Варбанец Роман Анатольевич. – Одесса, 2010. – 411 с.
61. Варбанец, Р. А. Мониторинг рабочего процесса и параметрическая диагностика среднеоборотного тепловозного дизеля K6S310DR / Р. А. Варбанец [и др.] // Вестник АГТУ. Серия: Морская техника и технология. – 2014. - №2. – С. 52-61.
62. Балабин, В. Н. Экспресс-диагностика тепловозных дизелей / В. Н. Балабин, В. З. Какоткин, И. И. Лобанов // Мир транспорта. – 2012. - №3. – С. 38-43.
63. Соловьев Б. И. Теплотехнические испытания и эксплуатация судовых дизелей / Б. И. Соловьев. – М.: Транспорт, 1973. – 240 с.
64. Методические рекомендации по определению экономической эффективности мероприятий научно-технического прогресса на железнодорожном транспорте / Э. И. Хаит, Г. Е. Писаревский, Л. А. Мазо. - М.: Транспорт, 1991. - 239 с.
65. Хаит Э. И. Определение экономической эффективности новой техники, изобретений и рационализаторских предложений. Методические указания / Э. И. Хаит. – Минск: Полымя, 1979. - 144 с.

Приложения

ПРИЛОЖЕНИЕ А

(справочное)

**Основные технические характеристики отечественных и зарубежных
дизельных двигателей с электронной системой впрыска топлива,
установленные на тепловозах парка ОАО «РЖД»**

Таблица А1 - Основные технические характеристики зарубежных дизельных двигателей с электронной системой впрыска топлива, установленные на тепловозах парка ОАО «РЖД»

№ п/п	Наименование параметра	Тип дизеля					
		3508B	K6S310DR	20V4000R43	W6L20L	GEVO V12	C18
1	Завод-изготовитель дизеля	Caterpillar	ЧКД Прага	MTU	Wärtsilä	GE	Caterpillar
2	Число цилиндров	8	6	20	6	12	6
3	Способ расположения цилиндропоршневой группы	V-образное	Рядное	V-образное	V-образное	V-образное	Рядное
4	Угол развала цилиндров, град	60	0	90	90	45	0
5	Рабочий объем цилиндра, л	34,4	162,9	95,2	52,8	188,4	18,13
6	Диаметр цилиндров, мм	170	310	170	200	250	145
7	Ход поршня, мм	190	360	210	280	320	183
8	Номинальная мощность, кВт (л.с.)	970 (1320)	992 (1350)	2700 (3621)	883 (1200)	3100 (4216)	571 (776)
9	Номинальная частота вращения, мин ⁻¹	1500	750	1800	1000	1050	1500
10	Минимально устойчивая частота вращения на холостом ходу, мин ⁻¹	700	280	-	350	440	-

Продолжение таблицы А1

№ п/п	Наименование параметра	Тип дизеля					
		3508B	K6S310DR	20V4000R43	W6L20L	GEVO V12	C18
11	Удельный эффективный расход топлива на номинальном режиме работы, г/кВт·час	183	262	208	196	201	180
12	Расход топлива режиме холостого хода, кг/час	-	6,5	-	5,7	11,6	-
13	Тип топливной системы	Безаккумуляторная неразделенного вида	Безаккумуляторная разделенного вида	Аккумуляторная	Аккумуляторная	Безаккумуляторная разделенного вида	Безаккумуляторная неразделенного вида
14	Тепловоз, на котором установлен дизельный двигатель	ТЭМ-ТМХ	ЧМЭЗ	2ТЭ25АМ, 2ТЭ116УР	ТЭМ18В	2ТЭ116УД, 3ТЭ25К ^{2М}	ТЭМ35

Таблица А2 - Основные технические характеристики отечественных дизельных двигателей и дизель генераторов с электронной системой впрыска топлива, установленные на тепловозах парка ОАО «РЖД»

№ п/п	Наименование параметра	Тип дизеля/дизель-генератора		
		21-26ДГ	18-9ДГ	1-ПД4Д
1	Завод-изготовитель дизеля	ОАО «Коломенский завод»	ОАО «Коломенский завод»	ОАО «Пензадизельмаш»
2	Число цилиндров	12	16	6
3	Способ расположения цилиндропоршневой группы	V-образное	V-образное	Рядное
4	Угол развала цилиндров, град	45	45	0
5	Рабочий объём цилиндра, л	165,7	220,7	157,2
6	Диаметр цилиндров, мм	260	260	318
7	Ход поршня, мм	260	260	330
8	Номинальная мощность, кВт (л.с.)	2500 (3400)	2650 (3604)	883 (1200)
9	Номинальная частота вращения, мин ⁻¹	1000	1000	750
10	Минимально устойчивая частота вращения на холостом ходу, мин ⁻¹	350	280	270
11	Удельный эффективный топлива на номинальном режиме работы, г/кВт·час	182	225	197,2 ^{+9,2}
12	Расход топлива на режиме холостого хода, кг/час	-	10,8	7,5
13	Тип топливной системы	Безаккумуляторная разделенного вида	Безаккумуляторная разделенного вида	Безаккумуляторная разделенного вида
14	Тепловоз, на котором установлен дизельный двигатель	2ТЭ25А	2ТЭ116	ТЭМ18ДМ

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

(обязательное)

**Телеграммы ОАО «РЖД» на проведение диагностики дизелей тепловозов
ТЭМ18ДМ с электронной системой управления подачей топлива**

1056/5088 2-0-0-0 Из ОАО РЖД № 586. 22.01.2016 12:29 Рогачева

**ОАО «РЖД»
ТЕЛЕГРАММА**

Т, ТЧЭ-4 ОКТ
ООО «Локомотивные технологии»
ОАО «ВНИИЖТ»

С целью отработки технологии диагностики дизелей тепловозов ТЭМ18ДМ №№ 880, 881, 882, 883, 884, оснащенных системами электронного управления подачей топлива (ЭСУВТ) и алгоритмов диагностики их технического состояния в эксплуатации, в период 1 квартала 2016 г. направляются в ТЧЭ Бологое и СЛД Тверь сотрудники ОАО «ВНИИЖТ» Антюхин Г.Г., Чернышёв П.В. и Струнгарь С.А.

ТГ ОКТ Сидоркину А.В., ТЧЭ Бологое ОКТ Акинину В.Б. и СЛД Тверь Лозгачеву О.Ф. (по согласованию):

организовать пропуск на территорию депо сотрудников ОАО «ВНИИЖТ» и предоставление им необходимой информации;

обеспечить доступ сотрудников ОАО «ВНИИЖТ» на указанные тепловозы и оказать им содействие на проведение работ по диагностике ЭСУВТ при выполнении тепловозам технического обслуживания ТО-3;

обеспечить соблюдение требований безопасности, охраны труда и внутреннего распорядка при нахождении на территории депо сотрудников ОАО «ВНИИЖТ»;

оказать условия для проживания сотрудников ОАО «ВНИИЖТ» на период проведения испытаний.

Заместителю генерального директора ОАО «ВНИИЖТ» Назарову О.Н. (по согласованию) организовать проведение испытаний тепловозов с ЭСУВТ при ТО-3 и результаты направить в ЦТ до 20 апреля 2016 г.

ЦТГ



О.В.Чикиркин

Л 100X-430/187
22.01.2016г

Исп.: Архипов А.Н., ЦТ
(499) 260-15-65

1056/5088 2-0-0-0 Из ОАО РЖД № 543. 15.06.2016 11:40 Беляева

**ОАО «РЖД»
ТЕЛЕГРАММА**

Т, ТЧЭ-4 ОКТ

ООО «Локомотивные технологии»

АО «ВНИИЖТ»

С целью отработки технологии диагностики дизелей тепловозов серии ТЭМ18ДМ № 880, 881, 882, 883 и 884, оснащенных системами электронного управления подачи топлива (ЭСУВТ) и алгоритмов диагностики их технического состояния в эксплуатации, в период 2 и 3 кварталов 2016 г. направляются в ТЧЭ Бологое и СЛД Тверь сотрудники АО «ВНИИЖТ» Антюхин Г.Г., Чернышёв П.В. и Струнгарь С.А.

ТГ ОКТ Сидоркину А.В., ТЧЭ Бологое ОКТ Акинину В.Б. и СЛД Тверь Лозгачеву О.Ф. (по согласованию):

организовать пропуск на территорию депо и предоставление необходимой информации сотрудникам АО «ВНИИЖТ»;

обеспечить доступ сотрудников АО «ВНИИЖТ» на указанные тепловозы и оказать им содействие на проведение работ по диагностике ЭСУВТ при выполнении тепловозам технического обслуживания ТО-3 и текущего ремонта ТР-1;

обеспечить соблюдение требований безопасности, охраны труда и внутреннего распорядка при нахождении на территории депо сотрудников АО «ВНИИЖТ»;

оказать условия для проживания сотрудников АО «ВНИИЖТ» на период проведения испытаний.

Заместителю генерального директора АО «ВНИИЖТ» Назарову О.Н. (по согласованию) организовать проведение испытаний тепловозов с ЭСУВТ и результаты направить в ЦТ до 7 октября 2016 г.

Зам. ЦТГ



К.Ю.Никольский

*Иск-8819/187
15.06.2016*

Исп.: Архипов А.Н., ЦТ
(499) 260-15-65

ПРИЛОЖЕНИЕ В
(обязательное)
Патент на изобретение

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2668509

**Стенд для испытания и регулировки электронно-
управляемых топливных насосов высокого давления
дизелей**

Патентообладатель: *Акционерное общество "Научно-
исследовательский институт железнодорожного
транспорта" (RU)*

Авторы: *Антюхин Георгий Георгиевич (RU), Струнгарь
Святослав Алексеевич (RU), Ежеская Людмила Алексеевна
(RU)*

Заявка № 2017139776

Приоритет изобретения 15 ноября 2017 г.

Дата государственной регистрации в

Государственном реестре изобретений

Российской Федерации 01 октября 2018 г.

Срок действия исключительного права

на изобретение истекает 15 ноября 2037 г.



Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Г.П. Ивлиев

ПРИЛОЖЕНИЕ Г

(обязательное)

**Титульный и второй листы программы и методики проверки балансировки
нагрузок цилиндров дизеля 1-ПД4Д с электронной системой управления
подачей топлива**

**АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО
«НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ
ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА»
(АО «ВНИИЖТ»)**

УТВЕРЖДАЮ
Заместитель Генерального
директора АО «ВНИИЖТ»


Р.В. Мурзин
«1» _____ 2018 г.


**ДИЗЕЛЬ 1-ПД4Д
С ЭЛЕКТРОННОЙ СИСТЕМОЙ ВПРЫСКА ТОПЛИВА ЭСУВТ.01**

**ПРОГРАММА И МЕТОДИКА
ПРОВЕРКИ БАЛАНСИРОВКИ НАГРУЗОК ЦИЛИНДРОВ ДИЗЕЛЯ**

ТПС3904.ВНИИЖТ.ЭСУВТ.ПМ79

Подп. и дата	
Инв.№	
Взам. инв.№	
Подп. и дата	
Инв.№подл.	

СОГЛАСОВАНО
Технический директор
ОАО «Пензадизельмаш»

Согласовано техником
от 17.09.18 №18/2/022 Д.В. Паламарчук
«__» _____ 20__ г.

РАЗРАБОТАНО
Заведующий отделением
«Тяговый подвижной состав»

Заручейский
«__» _____ 20__ г.

СОГЛАСОВАНО
Генеральный директор
ООО «ППП-Дизельавтоматика»



Фурман
В.В. Фурман
«08» _____ 2018 г.

Москва 2018 г.

ПРИЛОЖЕНИЕ Д

(обязательное)

**Акт стендовых испытаний дизель-генератора 1-ПДГ4Д
с электронной системой управления подачей топлива**

УТВЕРЖДАЮ

Технический директор

ОАО «Пензадизельмаш»

Д.В. Паламарчук

« 2019 г.

АКТ

стендовых испытаний дизель-генератора ПДГ4Д
с электронной системой управления подачей топлива

28 февраля 2019 года

г. Пенза

Настоящий акт составлен по результатам стендовых испытаний дизель-генератора 1-ПДГ4Д с электронной системой управления подачей топлива ЭСУВТ.01. Испытания с проверкой методов балансировки нагрузок по цилиндрам, разработанных АО «ВНИИЖТ», проводились на режиме пониженных оборотов холостого хода 270 мин^{-1} и нагрузке тягового генератора $15 \pm 2 \text{ кВт}$.

Проверка выполнена сотрудниками АО «ВНИИЖТ» и ОАО «Пензадизельмаш» по утвержденной и согласованной с ОАО «Пензадизельмаш» и ООО «ППП Дизельавтоматика» программе и методике ТПС3904.ВНИИЖТ.ЭСУВТ.ПМ79.

1. Цель испытаний.

Экспериментальная проверка методов балансировки нагрузок цилиндров дизеля с ЭСУВТ при работе на режиме холостого хода.

2. Объект испытаний.

Дизель-генератор 1-ПДГ4Д зав. номер 001ДЛ, 2012 года выпуска, оборудованный системой ЭСУВТ.01, установленный на стенде дизельной лаборатории, аттестованном и оборудованном поверенными средствами измерений.

3. Дата проведения испытаний: 26-27 февраля 2019 года.

4. Место проведения испытаний: дизельная лаборатория ОГК ОАО «Пензадизельмаш».

5. Конструктивные особенности дизеля и его оборудования:

- система ЭСУВТ типа 01.06.02 зав. №242 2015 года выпуска. Нарботка системы ЭСУВТ.01 на дизеле на дату проведения проверки составила 992 часа.
- турбокомпрессор ТК30Н26У2СБ4 зав. номер 3952 2018 года выпуска;
- форсунки черт. Д50.17.1СБ производства ООО ПКФ «Полёт» г. Заречный с распылителями $9 \times 0,38 \times 155^0$ производства Motorpal (республика Чехия), имеющими девять сопловых отверстий диаметром 0,38 мм.

- трубки нагнетательные с внутренним диаметром 3,5 мм. черт. Д50.23.115-5-03, Д50.23.116-5-03, Д50.23.117-5-03, Д50.23.118-5-03, Д50.23.119-5-03, Д50.23.120-5-03 для цилиндров №№1-6.

6. Конструктивные особенности системы ЭСУВТ:

- блок питания зав. №267 2015 года выпуска;
- блок управления зав. № 242 2015 года выпуска;
- электроуправляемые ТНВД типа 4ЭТН 06.00.000 зав. № 1751, 1749, 1747, 1750, 1748, 1745 2015 года выпуска.

7. Объем испытаний.

7.1. В соответствии с программой и методикой ТПС3904.ВНИИЖТ.ЭСУВТ.ПМ79 испытания производились в два этапа:

- испытания дизеля с балансировкой нагрузок цилиндров методом последовательных приближений;
- испытания дизеля с балансировкой нагрузок цилиндров по методике АО «ВНИИЖТ».

7.2 На каждом этапе испытаний производилось измерение параметров работы дизеля, снятие индикаторных диаграмм по цилиндрам дизеля, оценка температур выпускных газов, измерение часового расхода топлива. Измерение часового расхода топлива производилось не менее трех раз. При этом каждое измерение является средним арифметическим значением трех замеров длительностью по 100 секунд каждый.

8. Условия проведения испытаний.

8.1. Время начала и окончания испытаний:

начало: 8-30 26.02.2019 г.

окончание: 15-00 27.02.2013 г.

8.2 Испытания проводились в дизельной лаборатории ОГК ОАО «Пензализельмаш» при фактических климатических условиях (температура, атмосферное давление и относительная влажность окружающего воздуха).

8.3 Проверка проводилась на дизельном топливе «Евро» по ГОСТ 32511-2013 и моторном масле М14Г₂ЦС по ГОСТ 12337-84. В качестве охлаждающей жидкости использовался конденсат.

9. Средства измерения:

- измерительная система «Алмаз-ИС»;
 - датчики системы ЭСУВТ.01;
-

- устройство для снятия индикаторных диаграмм из состава производственного комплекса реостатных испытаний типа «Кипарис-5».

10. Результаты испытаний.

Результаты проверки отражены в Протоколах стендовых испытаний дизель-генератора 1-ПДГ4Д.

11. Заключение.

11.1 Испытания по программе и методике ТПС3904.ВНИИЖТ.ЭСУВТ.ПМ79 выполнены в полном объеме.

11.2 В результате балансировки нагрузок цилиндров методом последовательных приближений получено:

- уменьшение разности нагрузок по цилиндрам дизеля с 2,5 до 1,8 кВт;
- снижение разности температур выпускных газов по цилиндрам с 18 до 8 °С;
- увеличение часового расхода топлива с 8,49 до 8,56 кг/час.

11.3 В результате балансировки нагрузок цилиндров по методике АО «ВНИИЖТ» получено:

- снижение разности температур выпускных газов по цилиндрам с 16 до 14 °С;
- снижение часового расхода топлива с 8,52 до 8,36 кг/час.
- перераспределение нагрузок по цилиндрам дизеля. Разность нагрузок по цилиндрам дизеля при этом не изменилась и осталась равной 2,2 кВт.

11.4 Изменение часового расхода топлива до и после балансировки нагрузок по обоим методам связано по большей части с изменением температур охлаждающей жидкости и масла дизеля в процессе испытаний при проведении замеров.

11.5 Настоящие результаты испытаний касаются только стендового дизель-генератора 1-ПДГ4Д №001ДЛ.

От ОАО «Пензадизельмаш»:

Главный конструктор



В.А. Миронов

Начальник дизельной лаборатории



А.П. Янкин

Инженер-испытатель



А.Ю. Никитин

От АО «ВНИИЖТ»:

Ведущий научный сотрудник



А.Н. Корнев

Старший научный сотрудник

С.А. Струнгарь

ПРОТОКОЛ

стендовых испытаний дизеля 1-ПД4Д зав №001ДЛ с электронной системой управления подачей топлива ЭСУВТ.01
Дата 26.02.2019 г., топливо «Евро» по ГОСТ 32511-2013, масло М14Г2ЦС по ГОСТ 12337-84.

Первый этап испытаний. Равная длительность подачи топлива в цилиндры дизеля.

№ п/п	Наименование параметра	Обозна- чение	Единица измерения	Значение параметров по цилиндрам дизеля					
				1	2	3	4	5	6
1	Давление сжатия	P _с	кг/см ²	29,7	31,4	30,3	30,2	31,1	30,9
2	Максимальное давление сгорания	P _{max}	кг/см ²	40,0	43,5	41,6	42,2	42,6	44,7
3	Угол начала горения топлива	φ _с	град. п.к.в по- сле в.м.т.	2,6	0,3	1,2	0,9	2,0	1,6
4	Угол максимального давления сгорания топлива	φ _z	град. п.к.в по- сле в.м.т.	4,5	3,2	4,5	3,6	5,3	3,7
5	Индикаторная мощность	P _{i cil}	кВт	6,0	6,8	6,9	7,4	7,7	8,5
6	Температура газов на выпуске из цилиндров	T _g	°C	88	96	88	102	96	106
8	Температура охлаждающей жидкости на входе в дизель	t _в	°C	60,0-70,0					
9	Температура масла на входе в дизель	t _м	°C	59,0-63,0					
10	Давление масла на седьмой опоре распредвала	P _м	кг/см ²	3,0					
11	Давление топлива	P _т	кг/см ²	2,5-5,5					
12	Температура топлива	t _т	°C	28,5-29,3					
Результаты измерения часового расхода топлива, кг/час									
№ замера		1	2	3	4	5	Среднее значение		
Значение расхода топлива		8,48	8,57	8,51	8,44	8,47	8,49		

Измерения провели:

Начальник дизельной лаборатории ОГК ОАО «Пензадизельмаш»

Инженер-испытатель дизельной лаборатории ОГК ОАО «Пензадизельмаш»

Ведущий научный сотрудник АО «ВНИИЖТ»

Старший научный сотрудник АО «ВНИИЖТ»

 А.П. Янкин
 А.Ю. Никитин
 А.Н. Корнев
 С.А. Струнгарь

ПРОТОКОЛ

стендовых испытаний дизеля 1-ПД4Д зав №001ДЛ с электронной системой управления подачей топлива ЭСУВТ.01
Дата 26.02.2019 г., топливо «Евро» по ГОСТ 32511-2013, масло М14Г2ЦС по ГОСТ 12337-84.

Первый этап испытаний. Балансировка нагрузок цилиндров методом последовательных приближений.

№ п/п	Наименование параметра	Обозна- чение	Единица измерения	Значение параметров по цилиндрам дизеля					
				1	2	3	4	5	6
1	Давление сжатия	P _c	кг/см ²	30,1	31,7	30,6	30,5	30,6	30,9
2	Максимальное давление сгорания	P _{max}	кг/см ²	42,1	44,9	43,1	42,2	41,0	42,5
3	Угол начала горения топлива	φ _c	град. п.к.в по- сле в.м.т.	2,2	0,1	0,5	-0,5	1,2	2,1
4	Угол максимального давления сгорания топлива	φ _z	град. п.к.в по- сле в.м.т.	4,7	3,4	3,2	3,2	4,7	3,6
5	Индикаторная мощность	P _{i cil}	кВт	7,3	7,8	6,7	6,8	6,0	6,9
6	Температура газов на выпуске из цилиндров	T _g	°C	96	101	95	99	93	93
8	Температура охлаждающей жидкости на входе в дизель	t _в	°C	62,0-70,0					
9	Температура масла на входе в дизель	t _м	°C	59,0					
10	Давление масла на седьмой опоре распредвала	P _м	кг/см ²	3,0					
11	Давление топлива	P _т	кг/см ²	2,5-5,5					
12	Температура топлива	t _т	°C	29,0-29,5					
Результаты измерения часового расхода топлива, кг/час									
№ замера		1	2	3	4	5	6	Среднее значение	
Значение расхода топлива		8,53	8,49	8,70	8,63	8,53	8,50	8,56	

Измерения провели:

Начальник дизельной лаборатории ОГК ОАО «Пензадизельмаш»

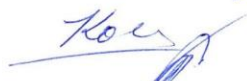
Инженер-испытатель дизельной лаборатории ОГК ОАО «Пензадизельмаш»

Ведущий научный сотрудник АО «ВНИИЖТ»

Старший научный сотрудник АО «ВНИИЖТ»

 А.П. Янкин

 А.Ю. Никитин

 А.Н. Корнев

 С.А. Струнгарь

ПРОТОКОЛ

стендовых испытаний дизеля 1-ПД4Д зав №001ДЛ с электронной системой управления подачей топлива ЭСУВТ.01
Дата 27.02.2019 г., топливо «Евро» по ГОСТ 32511-2013, масло М14Г2ЦС по ГОСТ 12337-84.

Второй этап испытаний. Равная длительность подачи топлива в цилиндры дизеля.

№ п/п	Наименование параметра	Обозна- чение	Единица измерения	Значение параметров по цилиндрам дизеля					
				1	2	3	4	5	6
1	Давление сжатия	P _c	кг/см ²	29,9	32,0	31,0	31,0	31,0	30,9
2	Максимальное давление сгорания	P _{max}	кг/см ²	40,9	43,4	42,7	42,9	43,2	44,5
3	Угол начала горения топлива	φ _c	град. п.к.в по- сле в.м.т.	2,2	0,4	0,4	0,5	1,5	2,0
4	Угол максимального давления сгорания топлива	φ _z	град. п.к.в по- сле в.м.т.	4,7	2,4	3,7	3,2	5,5	3,7
5	Индикаторная мощность	P _{i cil}	кВт	6,2	5,9	6,6	7,1	7,8	8,1
6	Температура газов на выпуске из цилиндров	T _g	°C	87	92	87	100	96	103
8	Температура охлаждающей жидкости на входе в дизель	t _в	°C	61,1-66,8					
9	Температура масла на входе в дизель	t _м	°C	57,0					
10	Давление масла на седьмой опоре распредвала	P _м	кг/см ²	3,1					
11	Давление топлива	P _т	кг/см ²	2,5-5,5					
12	Температура топлива	t _т	°C	38,9-29,5					
Результаты измерения часового расхода топлива, кг/час									
№ замера		1	2	3	Среднее значение				
Значение расхода топлива		8,54	8,52	8,50	8,52				

Измерения провели:

Начальник дизельной лаборатории ОГК ОАО «Пензадизельмаш»

Инженер-испытатель дизельной лаборатории ОГК ОАО «Пензадизельмаш»

Ведущий научный сотрудник АО «ВНИИЖТ»

Старший научный сотрудник АО «ВНИИЖТ»



А.П. Янкин



А.Ю. Никитин



А.Н. Корнев



С.А. Струнгарь

ПРОТОКОЛ

стендовых испытаний дизеля 1-ПД4Д зав №001ДЛ с электронной системой управления подачей топлива ЭСУВТ.01
Дата 27.02.2019 г., топливо «Евро» по ГОСТ 32511-2013, масло М14Г2ЦС по ГОСТ 12337-84.

Второй этап испытаний. Балансировка нагрузок цилиндров по методике АО «ВНИИЖТ».

№ п/п	Наименование параметра	Обозна- чение	Единица измерения	Значение параметров по цилиндрам дизеля					
				1	2	3	4	5	6
1	Давление сжатия	P _с	кг/см ²	30,1	31,4	30,3	30,3	30,7	31,0
2	Максимальное давление сгорания	P _{max}	кг/см ²	42,1	44,6	41,9	41,5	41,7	42,5
3	Угол начала горения топлива	φ _с	град. п.к.в по- сле в.м.т.	2,1	0,1	0,1	0,1	1,2	0,8
4	Угол максимального давления сгорания топлива	φ _z	град. п.к.в по- сле в.м.т.	5,5	3,2	3,2	3,6	5,2	3,7
5	Индикаторная мощность	P _{i cil}	кВт	7,8	7,3	5,6	6,7	6,3	7,2
6	Температура газов на выпуске из цилиндров	T _g	°С	98	102	88	94	92	99
8	Температура охлаждающей жидкости на входе в дизель	t _в	°С	69,7-70,8					
9	Температура масла на входе в дизель	t _м	°С	59,0					
10	Давление масла на седьмой опоре коленчатого вала	P _м	кг/см ²	3,1					
11	Давление топлива	P _т	кг/см ²	2,5-5,5					
12	Температура топлива	t _т	°С	29,9-30,0					
Результаты измерения часового расхода топлива, кг/час									
№ замера		1	2	3	Среднее значение				
Значение расхода топлива		8,38	8,35	8,36	8,36				

Измерения провели:

Начальник дизельной лаборатории ОГК ОАО «Пензадизельмаш»

Инженер-испытатель дизельной лаборатории ОГК ОАО «Пензадизельмаш»

Ведущий научный сотрудник АО «ВНИИЖТ»

Старший научный сотрудник АО «ВНИИЖТ»

 А.П. Янкин
 А.Ю. Никитин
 А.Н. Корнев
 С.А. Струнгарь

ПРИЛОЖЕНИЕ Е

(обязательное)

Акт проверки алгоритмов диагностики и балансировки нагрузок по цилиндрам на дизеле тепловоза ТЭМ18ДМ №1022, оснащенного электронной системой управления подачей топлива ЭСУВТ.01

24 мая 2019 г.

Сервисное локомотивное депо
Тверь ООО «ЛокоТех-Сервис»
филиал Северо-Западный

АКТ

проверки алгоритмов диагностики и балансировки нагрузок по цилиндрам на дизеле тепловоза ТЭМ18ДМ №1022, оснащенного электронной системой управления подачей топлива ЭСУВТ.01

Настоящий акт составлен по результатам проверки на дизеле тепловоза ТЭМ18ДМ №1022 приписки ТЧЭ-4 Бологовское, оснащенного электронной системой управления подачей топлива (ЭСУВТ.01), алгоритмов диагностики и балансировки нагрузок по цилиндрам (далее по тексту – алгоритмов), разработанных старшим научным сотрудником АО «ВНИИЖТ» С.А. Струнгарь.

Проверка алгоритмов выполнена после проведения тепловозу технического обслуживания ТО-3.

1. Основание для разработки алгоритмов:

актуальность безразборной оценки технического состояния дизелей тепловозов с ЭСУВТ.01 в условиях сервисного локомотивного депо для установления объема и необходимости проведения работ по ремонту топливной аппаратуры, а также повышения стабильности работы дизелей тепловозов на режиме пониженных оборотов холостого хода в эксплуатации.

2. Место проведения работ: сервисное локомотивное депо Тверь ООО «ЛокоТех-Сервис» филиал Северо-Западный.

3. Дата проверки алгоритмов: 23 мая 2019 года.

4. Объект исследований:

- тепловоз ТЭМ18ДМ №1022 2016 года постройки;
- дизель 1ПД4Д зав. номер 1393, 2016 года выпуска, оборудованный системой ЭСУВТ;
- наработка тепловоза от постройки на дату проведения диагностики по данным системы АСУТ-ЦТ составила 830 суток.

5. Конструктивные особенности дизеля и его оборудования:

- система ЭСУВТ модификации 01-06-02 зав. №336 2016 года выпуска.
- турбокомпрессор ТК30Н26У2СБ4 зав. номер 4814 2016 года выпуска;

6. Конструктивные особенности системы ЭСУВТ:

- блок питания зав. №350 2016 года выпуска;
- блок управления зав. № 336 2016 года выпуска;
- электроуправляемые ТНВД типа 4ЭТН 06.00.000 зав. № 1776, 2335, 1478, 2383, 2338, 2339 цилиндров дизеля №№ 1-6.

7. Объем работ, выполненных при проверке алгоритмов:

7.1 диагностика работы цилиндров дизеля методом поочередного кратковременного увеличения продолжительности топливоподачи при помощи опции «Проверка цилиндра» сервисной программы Inject Service;

7.2 диагностика работы цилиндров дизеля методом их последовательного отключения с использованием алгоритмов;

7.3 снятие индикаторных диаграмм по цилиндрам дизеля и оценка температур выпускных газов при исходном техническом состоянии дизеля тепловоза;

7.4 балансировка нагрузок по цилиндрам;

7.5 снятие индикаторных диаграмм по цилиндрам дизеля и оценка температур выпускных газов после балансировки нагрузок по цилиндрам.

8. Условия проведения проверки алгоритмов:

8.1. время начала и окончания проверки:

начало: 17:30 23.05.2019 г.

окончание: 20:00 23.05.2017 г.

Процедура балансировки нагрузок по цилиндрам дизеля заняла 45 минут.

8.2 дизель тепловоза был экипирован дизельным топливом по ГОСТ 305-2013 и моторном маслом М14В₂ по ГОСТ 12337-84, охлаждающей жидкостью, соответствующей требованиям инструкции ПКБ ЦТ.25.0088.

8.3 при проверке алгоритмов дизель тепловоза работал на режиме холостого хода с частотой вращения вала дизеля 270 об/мин., тормозной компрессор и вентилятор охлаждающего устройства были отключены.

9. Средства измерения:

- контрольно-измерительные приборы пульта машиниста тепловоза, АПК «Борт» и блока управления системы ЭСУВТ.01;

- устройство для снятия индикаторных диаграмм, входящее в состав автоматизированного производственного комплекса реостатных испытаний типа «Кипарис-5».

10. Результаты проверки алгоритмов:

результаты проверки алгоритмов на дизеле тепловоза ТЭМ18ДМ №1022 с ЭСУВТ.01 приведены в Приложении А.

11. Заключение:

11.1 по результатам диагностики работы цилиндров методами кратковременного поочередного увеличения продолжительности топливopодачи и последовательного их отключения с использованием алгоритмов установлено, что все цилиндры дизеля работают. Последующее снятие индикаторных диаграмм полностью подтвердило полученные результаты диагностики.

11.2 по результатам балансировки нагрузок по цилиндрам при помощи алгоритмов установлено следующее:

- максимальная разница величин температур выпускных газов, по цилиндрам дизеля снизилась на 28°C и составила 12°C .
- максимальная разница индикаторных мощностей по цилиндрам, по цилиндрам дизеля снизилась на 2,0 кВт и составила 1,0 кВт.
- максимальная разница величин максимального давления сгорания, по цилиндрам дизеля снизилась на 0,06 МПа и составила 0,45 МПа.

Таким образом, доказана работоспособность и возможность применения алгоритмов диагностики и балансировки нагрузок по цилиндрам на дизеле 1ПД4Д тепловоза ТЭМ18ДМ оснащенном системой ЭСУВТ.01.

11.3 тепловоз ТЭМ18ДМ №1022 после проверки алгоритмов диагностики и балансировки нагрузок по цилиндрам находится в технически исправном и работоспособном состоянии. Все измененные параметры работы системы ЭСУВТ.01 после проведения проверки алгоритмов были возвращены к первоначальным значениям.

11.4 настоящий акт касается только силовой установки тепловоза ТЭМ18ДМ №1022, подвергнутого процедуре проверки алгоритмов диагностики и балансировки нагрузок по цилиндрам.

От сервисного локомотивного депо

Тверь:

Главный инженер

С.В. Галынский

От Дирекции тяги Октябрьской ж.д.

Приёмщик локомотивов

М.Г. Зате́ев

От АО «ВНИИЖТ»:

Старший научный сотрудник

С.А. Струнгарь

Приложение А

Протокол снятия индикаторных диаграмм по цилиндрам дизеля тепловоза ТЭМ18ДМ №1022 с системой электронного управления впрыском топлива ЭСУВТ.01 на холостом ходу до балансировки нагрузок по цилиндрам

Атмосферное давление 746 мм. рт. ст

Температура воздуха на входе в турбокомпрессор (окружающей среды) + 20°C

Относительная влажность воздуха 55 %

Частота вращения коленчатого вала дизеля 270 об/мин.

Средняя по цилиндрам длительность топливоподачи при всех включенных цилиндрах – 3,0 град. п.к.в

Наименование параметра	Обозначение	Единица измерения	Значение параметров по цилиндрам дизеля					
			1	2	3	4	5	6
Давление сжатия	P_c	МПа	3,05	3,15	3,11	3,09	3,22	3,06
Максимальное давление сгорания	P_z	МПа	3,05	3,32	3,44	3,10	3,56	3,40
Угол начала горения	φ_c	град. п.к.в после в.м.т.	13,5	13,1	12,6	12,1	12,2	13,6
Угол максимального давления сгорания	φ_z	град. п.к.в после в.м.т.	17,4	15,6	15,4	15,9	14,3	15,6
Индикаторная мощность	$N_{иц}$	кг×дм	52,4	55,4	58,9	33,2	59,4	60,2
Индикаторная мощность	$N_{иц}$	кВт	5,8	6,1	6,5	3,7	6,6	6,7
Температура газов на выпуске из цилиндров	t_r	°C	108	109	117	90	115	130
Приращение длительности подачи топлива при отключении данного цилиндра	$\Delta\varphi_{fi}$	град. п.к.в.	0,43	0,37	0,49	0,18	0,40	0,42
Температура смазочного масла на выходе из дизеля	t_m	°C	57					
Температура охлаждающей жидкости на выходе из дизеля	t_b	°C	65					
Давление моторного масла	P_m	МПа	0,31					
Давление топлива после ФТОТ	P_T	МПа	0,4-0,5					
Температура топлива	t_T	°C	28					
Угол опережения подачи топлива	$\Phi_{оп}$	град. п.к.в. до В.М.Т.	9,4					

Измерения провел старший научный сотрудник АО «ВНИИЖТ» _____ Струнгарь С.А.

Продолжение приложения А

Протокол снятия индикаторных диаграмм по цилиндрам дизеля тепловоза ТЭМ18ДМ №1022 с системой электронного управления впрыском топлива ЭСУВТ.01 на холостом ходу после балансировки нагрузок по цилиндрам

Атмосферное давление 746 мм. рт. ст

Температура воздуха на входе в турбокомпрессор (окружающей среды) + 20°C

Относительная влажность воздуха 55 %

Частота вращения коленчатого вала дизеля 270 об/мин.

Средняя по цилиндрам длительность топливоподачи при всех включенных цилиндрах – 3,01 град. п.к.в

Наименование параметра	Обозначение	Единица измерения	Значение параметров по цилиндрам дизеля					
			1	2	3	4	5	6
Давление сжатия	P_c	МПа	3,01	3,03	3,09	3,09	3,19	3,05
Максимальное давление сгорания	P_z	МПа	3,0	3,19	3,32	3,14	3,45	3,12
Угол начала горения	φ_c	град. п.к.в после в.м.т.	13,0	13,4	12,6	12,9	11,8	12,4
Угол максимального давления сгорания	φ_z	град. п.к.в после в.м.т.	16,5	16,1	15,3	15,4	14,1	15,1
Индикаторная мощность	$N_{iц}$	кг×дм	48,1	54,2	52,7	44,0	53,9	45,0
Индикаторная мощность	$N_{iц}$	кВт	5,3	6	5,8	5,0	6,0	5,0
Температура газов на выпуске из цилиндров	t_r	°C	107	107	109	99	111	105
Приращение длительности подачи топлива при отключении данного цилиндра	$\Delta\varphi_{ti}$	град. п.к.в.	0,44	0,41	0,43	0,36	0,40	0,38
Температура смазочного масла на выходе из дизеля	t_m	°C	58					
Температура охлаждающей жидкости на выходе из дизеля	t_b	°C	65					
Давление моторного масла	P_m	МПа	0,3					
Давление топлива после ФТОТ	P_T	МПа	0,35-0,58					
Температура топлива	t_T	°C	32					
Угол опережения подачи топлива	$\Phi_{оп}$	град. п.к.в. до В.М.Т.	9,4					

Измерения провел старший научный сотрудник АО «ВНИИЖТ» _____ Струнгарь С.А.

ПРИЛОЖЕНИЕ Ж

(обязательное)

**Акт об установке системы электронного управления подачей топлива на
тепловозе ТЭМ2УМ №1033 ПАО «Северсталь»**

24.02.2020 г.

Акционерное общество
«Даугавпилсский
Локомотиворемонтный Завод»

АКТ**об установке системы электронного управления подачей топлива на
тепловозе ТЭМ2УМ №1033 ПАО «Северсталь»**

Настоящий акт составлен о том, что в соответствии с договором № 3.ТПС.10.06095/19 в период с 18 по 22 февраля 2020 г. на территории акционерного общества «Даугавпилсский Локомотиворемонтный Завод» (АО «ДЛРЗ») силами специалистов завода при техническом сопровождении сотрудников АО «ВНИИЖТ» была проведена установка и наладка системы электронного управления подачей топлива модификации ЭСУВТ.01-06-00 (ЭСУВТ.01) производства ООО «ППП «Дизельавтоматика» на дизель-генераторе тепловоза ТЭМ2УМ №1033 собственности ПАО «Северсталь».

Тепловоз ТЭМ2УМ 1993 года выпуска, оборудован дизель-генератором 1-ПДГ4А зав. №1346 1993 года выпуска производства АО «Пензадизельмаш» с турбокомпрессором ТК30Н17ЖУ2 зав. №4102 1997 года выпуска производства АО «Пензадизельмаш».

Установка системы ЭСУВТ.01 проводилась в соответствии с инструкцией по монтажу ЭСУВТ.01.00.000 ИМ, согласованной со структурными подразделениями ОАО «РЖД».

При подготовке к установке системы ЭСУВТ.01 на тепловозе выполнен демонтаж:

- штатного гидромеханического регулятора числа оборотов;
- механизма привода реек механических топливных насосов высокого давления;
- штатного топливного коллектора;
- механических топливных насосов высокого давления.

Демонтированное оборудование передано АО «ДЛРЗ».

При установке системы ЭСУВТ.01 на тепловозе выполнен монтаж:

- шести электроуправляемых топливных насосов высокого давления типа 4ЭТН.06.00.000 зав. №№6754, 6751, 6752, 6755, 6750, 6753 2019 года выпуска;
- блока питания системы ЭСУВТ.01 зав. № 972 2019 года выпуска;
- блока управления системы ЭСУВТ.01 зав. № 947 2019 года выпуска;
- топливного коллектора;

- модулятора, преобразователей частоты вращения коленчатого вала, фазовой отметки, температуры воды на выходе из дизеля и давления масла на входе в дизель;
- жгутов и кабелей связи в высоковольтной камере и машинном помещении;
- тумблера перехода на пониженную частоту вращения дизеля на режиме холостого хода, равную 240 об/мин. на пульте машиниста;
- подключение системы ЭСУВТ.01 к электрической схеме тепловоза.

В ходе проведения работ проведена настройка клапанов топливной системы для обеспечения давления в топливном коллекторе $4,0 \text{ кг/см}^2$ при работе дизеля на 8-ой позиции контроллера машиниста под нагрузкой. По окончании монтажа была выполнена проверка герметичности масляной, водяной и топливной систем тепловоза.

21 февраля 2020 г. после монтажа системы ЭСУВТ.01 на тепловозе были выполнены следующие работы:

- внесение кодов электроуправляемых ТНВД в блок управления ЭСУВТ.01;
- проверка работы электромагнитных клапанов электроуправляемых ТНВД на заглушенном дизеле;
- определение и ввод в блок управления ЭСУВТ.01 угла «заклинки»;
- проверка работы электроуправляемых ТНВД на запущенном дизеле;
- проверка перехода дизеля на пониженную частоту вращения коленчатого вала 240 об/мин на режиме холостого хода;
- проверка работы дизель-генератора на всех позициях контроллера машиниста на режиме холостого хода;
- проверка работы дизель-генератора без преобразователя частоты вращения коленчатого вала или фазовой отметки на всех позициях контроллера машиниста на режиме холостого хода;
- проверка защиты ЭСУВТ.01 от разноса дизеля;
- выравнивание нагрузок цилиндров дизеля на нулевой позиции контроллера машиниста по экспериментальному методу АО «ВНИИЖТ» при частоте вращения коленчатого вала 240 об/мин. Нагрузка цилиндра оценивалась по температуре выпускных газов. В результате выравнивания достигнуто снижение разности температур выпускных газов на выходе из цилиндров с 40°C до 5°C (таблица 1).

22 февраля 2020 г. при проведении реостатных испытаний тепловоза выполнены следующие работы:

- проверка работы дизель-генератора на всех позициях контроллера машиниста под нагрузкой;

- проверка и регулировка максимальных давлений цикла и температур выпускных газов на выходе из цилиндров на восьмой позиции контроллера машиниста.

Таблица 1

Наименование параметра	Номер цилиндра дизеля						Разница температур, °C	Примечание
	1	2	3	4	5	6		
Температура газов на выпуске из цилиндра, °C	80	100	60	100	60	80	40	До выравнивания нагрузок
	80	90	80	85	85	90	5	После выравнивания нагрузок

В ходе проверки работы и настройки дизель-генератора тепловоза при реостатных испытаниях отказов и неисправностей узлов и агрегатов дизель-генератора и системы ЭСУВТ.01 не зафиксировано.

По окончании реостатных испытаний тепловоз был сдан приемщику ОТК АО «ДЛРЗ».

24 февраля 2020 г. проведена «горячая» приёмка тепловоза приемщиком ОТК АО «ДЛРЗ». Выполнена пломбировка винтов крепления крышки разъема связи блока управления ЭСУВТ.01 с персональным компьютером.

Результаты реостатных испытаний приведены в Приложении 1.

После установки системы ЭСУВТ.01 специалистам АО «ДЛРЗ» были переданы два запасных электроуправляемых ТНВД типа 4ЭТН.06.00.000 зав. №6756, 6757 2019 года выпуска, один экземпляр руководства по эксплуатации ЭСУВТ.01.00.000 РЭ, один диск с сервисной программой Inject Service и один комплект ЗИП.

От АО «ДЛРЗ»

Руководитель

Службы технического контроля

От АО «ВНИИЖТ»

Ведущий научный сотрудник

Старший научный сотрудник



К.Н.Болгов

А.Н. Корнев

С.А. Струнгарь