

На правах рукописи



**Силюта Анатолий Геннадьевич**

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ СИЛОВОЙ  
УСТАНОВКИ ТЕПЛОВОЗА ПУТЕМ РАСШИРЕНИЯ ОБЛАСТИ  
РЕЖИМОВ РАБОТЫ ДИЗЕЛЯ ПРИ ПРИМЕНЕНИИ ЭЛЕКТРОННОЙ  
СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ**

05.22.07 – Подвижной состав железных дорог, тяга поездов  
и электрификация

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Москва – 2019

Работа выполнена в акционерном обществе «Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта» (АО «ВНИИЖТ»)

Научный руководитель **Коссов Евгений Евгеньевич**  
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты: **Рыжов Валерий Александрович**, доктор технических наук, доцент, Коломенский институт (филиал) ФГБОУ ВО «Московский политехнический университет», г. Коломна, заведующий кафедрой «Двигатели внутреннего сгорания»

**Савастенко Андрей Александрович**, кандидат технических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ)», г. Москва, доцент кафедры «Теплотехника и автотракторные двигатели»

Ведущая организация федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Самарский государственный университет путей сообщения», г. Самара

Защита состоится «25» июня 2019 г., в 15.00 часов на заседании диссертационного совета Д 218.005.01 на базе федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Российский университет транспорта» (ФГАОУ ВО «Российский университет транспорта») по адресу: 127994, ГСП-4, г. Москва, ул. Образцова, д. 9, стр. 9, ауд. 2505.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГАОУ ВО «Российский университет транспорта» ([www.miit.ru](http://www.miit.ru)). Автореферат размещен на сайте Минобрнауки России ([www.vak.ed.gov.ru](http://www.vak.ed.gov.ru)).

Отзывы на автореферат, заверенные печатью организации (в двух экземплярах), просим направлять в адрес ученого совета университета.

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2019 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
д.т.н., проф.



Николай Николаевич Воронин

## **Общая характеристика работы**

### **Актуальность темы исследования**

Среднее эффективное давление современных высокофорсированных дизелей тепловозов достигает 1,8-2,0 МПа. Это позволило увеличить секционную мощность тепловозов до 3500-4000 кВт и КПД тепловоза до 33-35 %. При этом скоростные характеристики дизеля стали более нелинейными, возросла вероятность попадания турбокомпрессоров в зону неустойчивой работы. Изменение скоростной характеристики дизеля при повышении форсирования приводит к относительному снижению эффективной мощности на частичных нагрузках и малоэффективному использованию оборудования на низких и средних частотах вращения коленчатого вала дизеля, к снижению КПД тепловоза при работе на этих режимах.

Можно перенастроить турбокомпрессор так, чтобы повысить производительность на неноминальных режимах. Это позволит повысить топливную экономичность двигателя на частичных нагрузках. Однако при нагрузках, составляющих более 70 % от номинальной мощности, и низких температурах наружного воздуха давление наддувочного воздуха будет чрезмерно повышено и потребуются меры по снижению максимального давления сгорания. Для поддержания давления наддува в установленных границах на тепловозах применяют системы перепуска части наддувочного воздуха на вход в турбину или за турбину. Опыт эксплуатации систем перепуска рабочего тела показал, что принципиально эта задача решается. На практике система перепуска работает сравнительно небольшое время работы (для умеренного типа климата не более 0,2 % от общего времени работы), имеет сложную конструкцию, отказ которой может привести к повреждению двигателя из-за попадания выхлопных газов после турбины в охладитель наддувочного воздуха.

Другим способом решения проблемы может стать оперативное изменение характеристик двигателей тепловозов с высоким средним

эффективным давлением путем совершенствования систем управления частотой вращения коленчатого вала и подачей топлива.

В диссертации рассмотрены теоретические и экспериментальные исследования показателей работы силовой установки тепловоза при расширении области режимов работы дизеля и реализации защиты турбокомпрессора и дизеля в экстремальных условиях при применении электронной системы управления.

### **Степень разработанности темы**

Исследованию повышения эффективности комбинированных двигателей посвящены работы Мазинга Е.К., Стечкина Б.С., Орлина А.С., Глаголева Н.М., Портнова Д.А., Луканина В.Н., Мизернюка Г.Н., Крутова В.И., Деховича Д.А., Шепелева В.А., Володина А.И., Симпсона А.Э., Эпштейна А.С., Коссова Е.Е., Рыжова В.А., Васильева В.Н., Сухопарова С.И., Балабина В.Н., Михаилиди К.Г., Кулешова А.С., Фурмана В.В., Бабела М., Савастенко А.А. и др.

**Объект исследования** – силовая установка магистрального тепловоза.

**Предмет исследования** – показатели работы силовой установки магистрального тепловоза при выполнении поездной операции в широком диапазоне изменения атмосферных условий.

### **Цель и задачи исследования**

Целью диссертационного исследования является повышение эффективности работы силовой установки тепловоза путем расширения области режимов работы дизеля при применении электронного управления силовой установкой.

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

1. Анализ рабочих процессов совместной работы поршневой части дизеля с агрегатами наддува при применении перепуска рабочего тела.
2. Моделирование показателей работы тепловозной дизель-генераторной установки при различных атмосферных условиях.

3. Анализ влияния способов управления системой наддува на показатели работы тепловоза при выполнении поездной операции.

4. Экспериментальная проверка эффективности предлагаемых способов управления силовой установкой тепловоза.

### **Научная новизна**

1. Разработана уточненная математическая модель рабочих процессов совместной работы поршневой части дизеля с агрегатами наддува, отличие которой от существующих моделей состоит в том, что при дополнении расчетной схемы устройствами перепуска рабочего тела и детализации процессов наполнения, продувки и выпуска при определении расхода рабочего тела в качестве условия окончания цикла расчета автором предложено использовать равенство заданного и фактического суммарного массового расхода рабочего тела дизеля вместо равенства единице произведений перепадов давлений в характерных сечениях газоздушного тракта.

2. Проведенный комплекс расчетно-экспериментальных исследований показал, что при регулировании тепловозной характеристики и реализации электронного управления высокофорсированным дизелем обеспечиваются требуемые показатели работы силовой установки, регламентируемые техническими условиями на поставку, во всем диапазоне изменения атмосферных условий без применения систем перепуска рабочего тела.

### **Теоретическая и практическая значимость работы**

1. Результаты проведенных расчетно-экспериментальных исследований показали, что регулирование тепловозной характеристики и реализация алгоритмических защит позволяет упростить комплектацию дизель-генераторной установки путем исключения системы перепуска рабочего тела без ухудшения топливной экономичности.

2. Внесено изменение в ТУ 3129-063-24428398-2014 Электронная система управления впрыском топлива ЭСУВТ.03-16-00, которое исключает

установку системы перепуска рабочего тела для регулирования наддува высокофорсированных дизелей.

3. Предложенные способы управления силовой установкой реализованы на 10 секциях тепловоза серии 2ТЭ116, эксплуатирующихся в грузовом движении на Приволжской железной дороге- филиал ОАО «РЖД» с 2017 г.

### **Методология и методы исследования**

При решении поставленных задач в диссертации использованы обобщение, анализ материалов научно-технической и справочной литературы, применены методы расчета показателей работы комбинированных двигателей, методы тяговых расчетов. Результаты теоретических исследований сопоставлялись с результатами испытаний силовой установки тепловоза на контрольных реостатных испытаниях, полученных автором.

### **Положения, выносимые на защиту**

1. Математическая модель определения показателей работы силовой установки магистрального локомотива при выполнении поездной операции, совмещающая модель движения поезда и модель рабочих процессов совместной работы поршневой части дизеля с агрегатами наддува в широком диапазоне изменения наружных условий.
2. Обеспечение устойчивой работы силовой установки средствами электронного управления и реализацией алгоритмических защит двигателя и турбокомпрессора без установки систем перепуска рабочего тела.

### **Степень достоверности**

Подтверждается приемлемостью допущений, принятых при разработке математической модели, которая определялась сравнением основных характеристик дизеля, полученных расчетными и экспериментальными методами. При моделировании получено удовлетворительное совпадение экспериментальных и расчетных данных, при этом максимальное отклонение мощности и расхода топлива составило не более 1,5 %.

### **Апробация работы**

Основные результаты работы докладывались и обсуждались на:

- IV научно-практической конференции «Безопасность движения поездов» проводимой в ФГБОУ ВО «Московский государственный университет путей сообщения (МГУПС(МИИТ))» в 2013 г.;

- научно-практической конференции «Неделя науки», проводимой в ФГБОУ ВО «Московский государственный университет путей сообщения (МГУПС(МИИТ))» в 2014 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 «ОБРАЗОВАНИЕ-НАУКА-ПРОИЗВОДСТВО», проводимой в «Забайкальский институт железнодорожного транспорта» - филиал ФГБОУ ВО «Иркутский государственный университет путей сообщения (ИрГУПС)» в 2018 г.

Диссертационная работа обсуждалась на заседаниях кафедры «Локомотивы и локомотивное хозяйство» (с 2014 г. кафедра «Электропоезда и локомотивы») ФГБОУ ВО «Московский государственный университет путей сообщения (МГУПС(МИИТ))» в 2013-2015 гг., ФГБОУ ВО «Российский университет транспорта (МИИТ)» в 2017-2018 гг., на заседаниях кафедры «Локомотивы и локомотивное хозяйство» ФГБОУ ВО «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I» в 2019 г., а также на расширенных заседаниях Научно-технического совета отделения «Тяговый подвижной состав» АО «Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта» (АО «ВНИИЖТ») в 2015-2018 гг.

### **Публикации**

По результатам проведенных исследований опубликовано 9 научных трудов, в том числе три статьи в журналах из перечня рецензируемых изданий ВАК при Минобрнауки России: «Наука и техника транспорта», «Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта», «Вестник транспорта Поволжья» и свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

## **Структура и объем диссертации**

Диссертация состоит из введения, четырех разделов, заключения с основными результатами и выводами, списка использованных источников из 109 наименований, пяти приложений и содержит 95 страниц основного текста, 22 рисунка и 18 таблиц.

## **Основное содержание работы**

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

**В первом разделе** диссертационной работы выполнен анализ характеристик современных тепловозных дизелей, и направлений их дальнейшего совершенствования. Проведен обзор работ по повышению удельных и экологических показателей транспортных силовых установок путем применения различных способов управления системой наддува.

Сделано заключение о том, что каждый способ управления решает отдельную задачу и не является универсальным для всех типов транспортных двигателей. Введение дополнительных устройств усложняет компоновочную схему и снижает надежность двигателя в целом. Окончательная оценка эффективности использования систем управления представляет собой технико-экономическую задачу с учетом конкретных режимов и условий работы дизель-генераторной установки, для решения которой необходимо иметь возможность оценивать изменение показателей поездной работы при введении в состав тепловоза новых узлов, агрегатов и алгоритмов управления. Поставлены задачи исследования.

**Во втором разделе** диссертационной работы рассмотрены основные положения математической модели определения показателей работы силовой



установки магистрального локомотива при выполнении поездной операции, совмещающей модель движения поезда и модель рабочих процессов совместной работы поршневой части дизеля с агрегатами наддува.

Показатели работы силовой установки в установившихся и переходных режимах при выполнении поездной операции определялись совместным решением двух систем уравнений:

- алгебраические уравнения, описывающие одномерное квазистационарное течение рабочего тела по элементам газоздушного тракта при постоянных значениях угловых скоростей коленчатого вала дизеля и турбокомпрессора, температуры и давления наружного воздуха, температуры теплоносителей и др.;

- дифференциальные уравнения, определяющих изменения во времени параметров движения поезда и параметров, определяющих состояние элементов дизеля и агрегатов наддува.

При расчете расхода рабочего тела использовалась первая группа уравнений, описывающая изменение давлений и температур при истечении рабочего тела по элементам газоздушного тракта, которая может быть представлена в виде системы (1) алгебраических уравнений:

$$\left\{ \begin{array}{l} 1 \quad \pi_1 = f(G_v, T_0, p_0) \\ 2 \quad p_1 = p_0 \cdot \pi_1 \\ 3 \quad T_1 = f(T_0) \\ 4 \quad \pi_2 = f(G_v, T_0, p_0, \omega_k) \\ 5 \quad p_2 = p_1 \cdot \pi_2 \\ 6 \quad T_2 = f(G_v, T_1, \omega_k, \eta_k) \\ \dots \\ 31 \quad \pi_{11} = f(G_v, T_{10}, p_{10}) \\ 32 \quad p_{11} = p_{10} \cdot \pi_{11} \\ 33 \quad T_{11} = f(T_{10}) \end{array} \right. , \quad (1)$$

где  $\pi_1$  - степень повышения давления в фильтре;  $G_V$  - расход воздуха;  $T_0$  - температура наружного воздуха;  $p_0$  - давление наружного воздуха;  $p_1$  - давление воздуха после фильтра;  $T_1$  - температура воздуха на входе в компрессор;  $\pi_2$  - степень повышения давления в компрессоре;  $\omega_k$  - частота вращения ротора турбокомпрессора;  $p_2$  - давление воздуха за компрессором;  $T_2$  - температура воздуха за компрессором;  $\eta_k$  - КПД компрессора;  $\pi_{11}$  - перепад давлений в глушителе;  $T_{10}$  - температура за турбиной;  $p_{10}$  - давление газов после турбины;  $p_{10}$  - давление газов на выходе из глушителя;  $T_{11}$  - температура газов на выходе из глушителя.

Система уравнений, определяющих изменения во времени параметров движения поезда и параметров, определяющих состояние элементов дизеля и агрегатов наддува, описана с использованием дифференциальных уравнений первого порядка в виде, приведенном в системе (2):

$$\left\{ \begin{array}{l} 1 \quad \frac{dV}{dt} = k_1 \cdot f_y \\ 2 \quad \frac{dS}{dt} = k_2 \cdot V \\ 3 \quad \frac{d\omega_d}{dt} = \frac{1}{J_d \cdot \omega_d} \cdot (P_i - P_e - P_{MEK}), \\ 4 \quad \frac{d\omega_{TK}}{dt} = \frac{1}{J_{TK} \cdot \omega_K} \cdot (P_T - P_K) \\ 5 \quad \frac{dT_w}{dt} = f(m_w, T_8, f_a, f_a', \alpha \dots) \end{array} \right. \quad (2)$$

где  $\frac{d\omega_d}{dt}$  - приращение частоты вращения коленчатого вала на шаге расчета;  $J_d$  - суммарный момент инерции коленчатого вала и присоединенных агрегатов;  $P_i$  - индикаторная мощность дизеля;  $P_e$  - эффективная мощность дизеля;  $P_{мех}$  - мощность механических потерь в дизеле;  $\frac{d\omega_{TK}}{dt}$  - приращение частоты вращения вала турбокомпрессора на шаге расчета;  $J_{TK}$  - суммарный момент инерции вала турбокомпрессора и присоединенных агрегатов;  $P_T$  - мощность

турбины;  $P_K$  - мощность компрессора;  $T_w$  - температура воды, омывающей коллектор;  $m_w$  - масса прогреваемой части коллектора;  $T_8$  - температура на входе в выпускной коллектор;  $f_a, f_{a'}$  - площадь поверхностей  $a$  и  $a'$  соответственно;  $\alpha$  - коэффициент теплопередачи;  $\frac{dV}{dt}$  - приращение скорости на шаге интегрирования;  $k_1, k_2$  - постоянные коэффициенты;  $f$  - удельная равнодействующая сила;  $\frac{dS}{dt}$  - приращение пути на шаге интегрирования;  $V$  - скорость движения поезда.

Для исключения влияния качества изготовления элементов конструкции систем управления дизель-генераторной установкой логические связи представлены идеализированными исполнительными устройствами, в которых скорость изменения управляемой величины прямо пропорциональна величине рассогласования и обратно пропорциональна постоянной времени:

$$\frac{dA}{dt} = \frac{A^* - A}{T_A}, \quad (3)$$

где  $\frac{dA}{dt}$  - приращение управляемой величины на шаге расчета;  $A^*$  - заданное значение управляемой величины;  $A$  - текущее значение управляемой величины;  $T_A$  - постоянная времени управляемой величины.

Для определения суммарных показателей при выполнении поездной операции работа магистрального локомотива представлялась множеством элементарных режимов ведения поезда, зависящих в свою очередь от конечного множества начальных условий – профиля участка пути, веса состава, скорости движения тепловоза и т.д. Количество этих режимов задавалось случайной величиной и записывалось в виде числовой последовательности  $A$ :

$$A = \{ a_k \}, \quad (4)$$

где  $a_k$  -  $k$ -тый член множества  $A$ ;  $k = 1, 2, \dots, n$  - дискретная случайная величина.

Множество начальных условий задавалось случайными величинами, но также может быть задано конечной числовой последовательностью, члены которых могут быть определены, например, с помощью порождающей процедуры. В качестве примера рассмотрим множество значений начальной скорости тепловоза  $B_1$ :

$$B_1 = \{ b_{1j} \mid b_{11} = 0, b_{12} = 10, b_{1j} = b_{1j-1} + 10 \}, \quad (5)$$

где  $b_{1j}$  -  $j$ -тый член множества  $B_1$ .

У множеств значений начальных условий  $B_1, B_2, \dots, B_m$  нет общих элементов, то есть они являются дизъюнктивными. Множества начальных элементов можно представить в виде семейства множеств, перечисленных индексами из  $I$ :

$$\{ B_i \mid i \in I \}. \quad (6)$$

Тогда для получения набора начальных условий достаточно выполнить дизъюнктивное объединение:

$$\bigcup_{i \in I} \{ (x, i) \mid x \in B_i \}. \quad (7)$$

Порядок чередования режимов в этом случае не имеет определяющего значения, для каждого обобщённого режима ведения поезда используется весь набор начальных условий. В (8) в качестве примера приведен набор начальных условий для одного обобщённого режима «Разгон»:

$$B = \left\{ \begin{array}{l} b_{1j} \mid b_{1j} \in Z, 0 \leq b_{1j} \leq 40 \\ b_{2j} \mid b_{2j} \in Z, 20 \leq b_{2j} \leq 80 \\ b_{3j} \mid b_{3j} \in Z, 100 \leq b_{3j} \leq 1000 \\ b_{4j} \mid b_{4j} \in Z, 0 \leq b_{4j} \leq 9 \end{array} \right\}, \quad (8)$$

где  $j = 1, 2, \dots, l$  - количество элементов в множестве начальных условий.

В первой строке множества (5) начальных условий приведены значения начальной скорости движения поезда, во второй строке приведены значения конечной скорости движения поезда, в третьей строке приведены значения координаты начального местоположения головы поезда, в четвертой строке приведены значения величин, характеризующих профиль участка пути.

Структура построения множества начальных условий для других обобщенных режимов аналогична структуре множества (8).

Аналитическая связь множества элементарных режимов и множества начальных условий отражена множеством  $C$ , полученным путем прямого (декартового) произведения множеств (4) и (7):

$$C = \{a_k\} \times \bigcup_{i \in I} \{(x, i) | x \in B_i\}. \quad (9)$$

Приемлемость допущений, принятых при разработке математической модели определялась сравнительным анализом экспериментальных данных с расчетными. При моделировании получено удовлетворительное совпадение экспериментальных и расчетных данных, при этом максимальное отклонение мощности и расхода топлива составило не более 1,5 %.

**В третьем разделе** произведена оценка эффективности различных способов электронного управления частотой вращения коленчатого вала, подачей топлива и системой наддува.

Система управления подачей топлива, частотой вращения коленчатого вала и наддувом силовой установки магистрального тепловоза (далее – ЭСУТПН) создана с учетом положительного опыта применения электронной системы управления подачей топлива на дизелях маневровых тепловозов ТЭМ2, ТЭМ18ДМ и ЧМЭЗ. Разработка, изготовление и установка опытных образцов электронных систем и агрегатов на тепловозах на разных этапах выполнялись специалистами АО «ВНИИЖТ», ООО «ППП Дизельавтоматика», ОАО «Пензадизельмаш» и ООО «СКБТ».

Система ЭСУТПН предназначена для силовых установок типа 1А-9ДГ и 18-9ДГ, устанавливаемых на современных грузовых тепловозах серий 2ТЭ116, 2ТЭ116У и 2ТЭ25КМ соответственно. Система ЭСУТПН выполняет все функции электронного регулятора частоты вращения и мощности ЭРЧМ30Т и ряд дополнительных функций:

- автоматическое формирование и поддержание заданной частоты вращения коленчатого вала дизеля в зависимости от температуры окружающего воздуха;

- автоматическое управление углом опережения подачи топлива в зависимости от текущей частоты вращения коленчатого вала дизеля;
- защиту турбокомпрессора от превышения частоты вращения ротора снижением мощности дизель-генератора;
- самодиагностику элементов системы с возможностью непосредственного визуального контроля машинистом сообщений системы по дисплею на корпусе блока управления.

Расширение области режимов работы дизельного двигателя достигается за счет применения опытного турбокомпрессора ТК35В-36 и алгоритмов управления частотой вращения коленчатого вала, подачей топлива.

Заданные значения частоты вращения коленчатого вала дизеля и продолжительности подачи топлива в зависимости от температуры атмосферного воздуха определяются следующим образом:

- машинист устанавливает позицию контроллера управления;
- в зависимости от температуры наружного воздуха система устанавливает заданную угловую скорость вращения коленчатого вала и продолжительность подачи топлива в цилиндры дизеля при включении нагрузки;
- до смены позиции контроллера система поддерживает выбранную частоту вращения и продолжительность подачи топлива.

На первой позиции контроллера машиниста устанавливается мощность на клеммах выпрямительной установки 100 кВт при частоте вращения коленчатого вала 350 мин<sup>-1</sup>. На всех других позициях заданная мощность определяется по зависимости:

$$P_{BY} = c_{12} + c_{13} \cdot (n_K - 1), \quad (10)$$

где  $c_{12}$  –  $c_{13}$  – постоянные коэффициенты;  $P_{BY}$  – мощность тягового генератора на клеммах выпрямительной установки;  $n_K$  – номер позиции контроллера машиниста.

Заданная частота вращения коленчатого вала определяется по величине заданной мощности  $P_{BY}$  по следующим зависимостям:

- при температуре наружного воздуха от плюс 20 до минус 20 °С:

$$\omega_{\partial} = \begin{cases} c_{14} + c_{15} \cdot (P_{BY} - c_{16}), & 100 < P_{BY} \leq 700, \\ c_{17} + c_{18} \cdot (P_{BY} - c_{19}), & P_{BY} > 700 \end{cases}, \quad (11)$$

- при температуре наружного воздуха от плюс 20 до плюс 40 °С и от минус 20 до минус 40 °С:

$$\omega_{\partial} = \begin{cases} c_{20} + (c_{21} + c_{22} \cdot (T_0 - c_{23})) \cdot (P_{BY} - c_{24}), & 100 < P_{BY} \leq 700 \\ c_{25} + c_{26} \cdot (T_0 - c_{27}) + (c_{28} + c_{29} \cdot (T_0 - c_{30})) \cdot (P_{BY} - c_{31}), & P_{BY} > 700 \end{cases}, \quad (12)$$

где  $c_{14} - c_{31}$  - постоянные коэффициенты.

При реализации рассмотренного алгоритма силовая установка работает по скоростным характеристикам, у которых заданное значение частоты вращения коленчатого вала от холостого хода до номинальной определяется с учетом текущей температуры атмосферного воздуха.

Разработанная математическая модель рабочих процессов совместной работы поршневой части дизеля с агрегатами наддува позволила определить границы регулирования наддува тепловозного дизеля 16ЧН26/26 дизель-генераторной установки 18-9ДГ при работе по полю скоростных характеристик в диапазоне изменения температуры наружного воздуха от минус 40 до плюс 40 °С с имитацией переходных процессов при изменении статических характеристик. В качестве ограничительных приняты предельные показатели работы турбокомпрессора и дизель-генераторной установки, регламентируемые Техническими условиями на поставку:

- частота вращения ротора турбокомпрессора;
- температура газов перед турбиной;
- максимальное давление сгорания.

В качестве дополнительного параметра, характеризующего устойчивую работу дизель-генераторной установки, использован коэффициент запаса устойчивой работы турбокомпрессора.

При работе по полю скоростных характеристик во всем принятом диапазоне изменения температур характеристики дизеля удовлетворяют

ограничениям, кроме величины максимального давления сгорания. При температуре наружного воздуха ниже минус 30 °С необходимо внедрение мероприятий, обеспечивающих снижение максимального давления сгорания.

В диссертационном исследовании рассмотрены штатная и опытные системы управления двигателем, реализующие различные способы ограничения максимального давления сгорания:

1. Штатная система управления дизелем и регулированием наддува путем перепуска воздуха от компрессора за турбину (вариант №1).
2. Опытная система управления дизелем и различными способами регулирования наддува:
  - снижением мощности (вариант №2).
  - путем перепуска воздуха от компрессора к турбине (вариант №3).
  - путем перепуска воздуха от компрессора за турбину (вариант №4).
  - путем перепуска отработавших газов за турбину (вариант №5).

В качестве базового варианта принят вариант №1.

Разработанная математическая модель определения показателей работы магистрального локомотива при выполнении поездной операции позволила провести моделирование работы дизелей типа 16ЧН26/26 с различными способами управления частотой вращения коленчатого вала, мощностью тяговой передачи и системой наддува. Перепуск рабочего тела имитировался при достижении ограничительных параметров при температуре наружного воздуха ниже минус 30 °С. При расчете поездной работы было учтено влияние изменения средней суточной температуры воздуха в течение года. Для умеренного типа климата оказалась невозможна количественная оценка влияния систем управления нагрузкой и наддувом дизеля. Это обстоятельство объясняется низкой (0,2 %) вероятностью наступления температурного режима, для которого требуется регулирование наддува. Для количественной оценки влияния систем перепуска выбран холодный тип климата. Для этого типа вероятностью наступления температурного режима, для которого требуется регулирование наддува, в течение года составляет 6,7 %.



Анализ и обобщение результатов моделирования поездной работы показал, что суммарный расход топлива при применении систем перепуска рабочего тела не зависимо от варианта соизмерим с вариантом № 2, не требующим установки устройств перепуска рабочего тела. Таким образом, наибольшую эффективность имеет вариант № 2, не предусматривающий установку устройств перепуска рабочего тела и обеспечивающий устойчивую работу дизель-генераторной установки тепловоза в диапазоне изменения атмосферных условий от минус 40 до плюс 40 °С.

С целью экспериментальной проверки эффективности системы ЭСУТПН в 2014-2016 гг. проведены сравнительные реостатные и эксплуатационные испытания тепловоза 2ТЭ116 № 1733, оборудованного этой системой.

Эксплуатационные испытания тепловоза, оборудованного системой ЭСУТПН, показали:

- обеспечение длительной устойчивой работы силовой установки по штатной и предложенному полю скоростных характеристик;

- снижение среднеэксплуатационного расхода топлива при фактических режимах загрузки двигателя тепловоза.

В настоящее время системы ЭСУТПН установлены на 10 секциях тепловоза серии 2ТЭ116, эксплуатирующихся в грузовом движении на Приволжской железной дороге- филиал ОАО «РЖД» с 2017 г.

**В четвертом разделе** проведена оценка экономического эффекта от применения электронных систем управления дизелем. В качестве базового варианта принят вариант № 1, в качестве сравниваемых – варианты 2 и 3. В расчете не рассмотрены варианты 4 и 5, так как эти варианты имеют сопоставимую стоимость системы перепуска рабочего тела с вариантом № 3 и заведомо больший суммарный расход топлива.

Стоимостная оценка экономического эффекта выполнена на основе соизмерения затрат и полученных результатов. В качестве затрат рассмотрены капитальные затраты на приобретение и монтаж электронных систем

управления дизелем, в качестве результатов – экономия расходов, обеспечиваемая применением электронных систем управления дизелем.

Применение системы ЭСУТПН, не предполагающей установку систем перепуска рабочего тела, по сравнению с штатной системой управления двигателем обеспечит чистый доход 7,2 млн руб. за принятый горизонт расчета 20 лет. При этом срок окупаемости не превышает 4 лет.

### **Заключение**

По результатам проведенных исследований сделаны следующие выводы:

1. Разработана математическая модель рабочих процессов совместной работы поршневой части дизеля с агрегатами наддува при применении перепуска рабочего тела, которая позволила исследовать изменение показателей работы дизеля при различных внешних атмосферных условиях.
2. Подтверждена эффективность электронной системы управления дизель-генератором, обеспечивающей расширение режимов работы дизеля и реализующей алгоритмические защиты турбокомпрессора и дизельного двигателя. Срабатываний клапанов системы регулирования наддува путем перепуска воздуха от компрессора на вход в турбину, установленных на контрольной группе тепловозов в качестве дополнительной меры по требованию Дирекции тяги, в эксплуатации с 2017 г. не зафиксировано.
3. Разработан метод определения показателей работы тепловоза при выполнении поездной операции с учетом параметров и режимов работы дизель-генераторной установки, ее вспомогательного оборудования.
4. Применение электронной системы управления дизельным двигателем обеспечит положительный экономический эффект, величина которого будет зависеть от режимов загрузки силовой установки, стоимости технического обслуживания и ремонта системы регулирования наддува на протяжении жизненного цикла, стоимости проведения неплановых ремонтов дизеля и его

вспомогательного оборудования.

5. Проведенный комплекс расчетно-экспериментальных исследований позволяет сделать вывод о избыточности применения систем регулирования наддува путем перепуска рабочего тела на тепловозах с высокофорсированными двигателями, оборудованных электронной системой управления частотой вращения коленчатого вала, мощностью тяговой передачи и системой наддува.

**Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:**

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

1. Силюта, А.Г. Выбор способа регулирования системы воздухообеспечения тепловозных дизелей [Текст] / А.Г. Силюта // Наука и техника транспорта. – 2018. - №1. – с. 34 – 39.
2. Силюта, А.Г. Моделирование поездной работы магистрального локомотива [Текст] / А.Г. Силюта, Е.Е. Коссов // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. – 2018. - №4. – с. 46 – 52.
3. Асабин, В.В. Повышение эффективности работы силовых установок тепловозов применением системы электронного управления [Текст] / В.В. Асабин, А.Г. Силюта, Е.Е. Коссов // Вестник транспорта Поволжья. – 2018. - №5. – с. 67 – 71.

**II В научных журналах, материалах конференций**

4. Силюта, А.Г. Оценка эффективности внедрения системы с электронным управлением подачи топлива (ЭСУВТ) [Текст]/ А.Г. Силюта, Е.Е. Коссов// Труды XIII научно-практической конференции «Безопасность движения поездов». – 2013. –с. III-47 - III-48.
5. Силюта, А.Г. К вопросу совершенствования математических моделей тепловозных дизель-генераторов [Текст]/ А.Г. Силюта //Труды научно-практической конференции Неделя науки-2014 "Наука МИИТа -

- транспорту". – В двух частях. – Часть 1. –М.: МГУПС(МИИТ), 2014. – с.III-90.
6. **Силюта, А.Г.** Изменение скоростных характеристик тепловозного дизеля перепуском воздуха и газов [Текст]/ **А.Г. Силюта** [и др.]//Сборник материалов 1V Международной научно-практической конференции, посвященной 140-летию со дня рождения доктора технических наук, профессора Ю.В. Ломоносова. – 2016. –с.21-25.
  7. **Силюта, А.Г.** К вопросу совершенствования математических моделей тепловозных дизель-генераторов [Текст]/ **А.Г. Силюта** //Сборник трудов Девятой международной научно-практической конференции "Транспортная инфраструктура Сибирского региона". – В двух томах. – Том 2. –Иркутск.: ИрГУПС, 2018. –с.366-368.
  8. **Силюта, А.Г.** Повышение эффективности локомотивного парка тепловозов с дизелями Д49 применением отечественной электронной системы управления [Текст]/ **А.Г. Силюта** [и др.]//Сборник материалов всероссийской научно-практической конференции "ОБРАЗОВАНИЕ-НАУКА-ПРОИЗВОДСТВО". – В двух томах. – Том 1. –Чита.: ЗаБИЖТ ИрГУПС, 2018. –с.50-53.

### **III Свидетельство о государственной регистрации программы на ЭВМ**

9. **Силюта А.Г.** Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ «Программа расчета характеристик совместной работы транспортного дизеля с агрегатами наддува T-Diesel», №2019612971 /**Силюта А.Г.**, Коссов Е.Е., Некрасов Г.И. // заявка №2018661141, дата поступления 12.10.2018, дата государственной регистрации в Реестре программ для ЭВМ 05.03.2019.

Силюта Анатолий Геннадьевич

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ СИЛОВОЙ  
УСТАНОВКИ ТЕПЛОВОЗА ПУТЕМ РАСШИРЕНИЯ ОБЛАСТИ  
РЕЖИМОВ РАБОТЫ ДИЗЕЛЯ ПРИ ПРИМЕНЕНИИ ЭЛЕКТРОННОЙ  
СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ**

Специальность 05.22.07 – Подвижной состав, тяга поездов и электрификация

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

---

Подписано в печать	2019	Заказ №	Формат 60x90/16
Усл. печ. л. – 1,25		Тираж 80 экз.	

---